

## DIPLOMNÍ ÚKOL

pro s, Milana Vašíčka  
odbor strojírenská technologie

Protože jste splnil požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomní úkol:

Název tématu: Stanovení schema krystalizace svarového kovu  
při automatickém svarování pod tavidlem

### Pokyny pro vypracování:

- 1) Shrňte literární údaje o určování schema krystalizace svarového kovu.
- 2) Navrhněte zkušební metodiku na měření schema krystalizace při automatickém svarování pod tavidlem.
- 3) Vykonstruujte a pomocí VD-VŠST realizujte výrobu sklopného zařízení na experimentální určování schema krystalizace v závislosti na tvaru a velikosti svarové lázně.
- 4) Na sklopném zařízení proveďte při zvolených podmínkách svařovací zkoušky, ze kterých určete tvar a velikost svařovací lázně a schema krystalizace.
- 5) Experimentálně určené schema krystalizace porovnejte s výpočty udávanými v literatuře.

Autorské práce řídí směrnicemi MŠK pro státní  
závěrečné zkoušky, č. 31 710/52-III/2 ze dne  
13. června 1962 a č. 31 710/52-III/2 ze dne  
31. 8. 1962 a 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

WYSOKA SZKOLA STROJNIA I TEXTYLNIA  
biblioteczka  
LIBEREC 1, STUDENCKA 5

V 86/1967

(12 mol. l.)

Rozsah grafických laboratorních prací: tabulky a grafy, sestavený výkres a schéma zařízení.

Rozsah průvodní zprávy: 40 až 50 stran

Seznam odborné literatury:

- 1) Stejskal: Vliv krystalizace svarového kovu na praskavost za tepla. Diplomová práce na VŠST Liberec, 1966.
- 2) Belda: Praskavost za tepla svarového kovu, Zpráva k aspir. minimu, Liberec 1966.
- 3) Wittke: Gesetzmässigkeiten der Primärkristallization beim Schweissen. Schweisstechnik 16 (1966) H.4
- 4) Erochin: Kinetika metallurgičeskich processov dugovoj svarků. Mašinstrojenje, Moskva 1964.

Vedoucí diplomní práce: prof. Ing. Josef Dítl CSc, Ing. Jaroslav Belda

Konsultanti: Ing. Jaroslav Belda

Datum zahájení diplomní práce: 2.10.1967

Datum odevzdání diplomní práce: 30.10.1967



*J. Dítl*  
prof. Ing. Josef Dítl CSc

Vedoucí katedry

*Cyril Höschl*  
prof. Ing. Cyril Höschl

Děkan

v z. Doc. Ing. M. Kořínek CSc

V Liberci dne 28.8.

196

7

Obsah.

1. Úvod.
2. Studijní část.
  - 2.1. Svařovací lázeň.
    - 2.1.1. Velikost a tvar tavné lázně.
  - 2.2. Primární krystalizace svařového kovu.
    - 2.2.1. Přechlazení taveniny ve svařové lázni při tuhnutí.
      - 2.2.1.1. Tepelné přechlazení svařového kovu.
      - 2.2.1.2. Strukturální přechlazení tavné lázně.
    - 2.2.2. Tvar a velikost krystalů při svařování.
      - 2.2.2.1. Krystalizační zárodky.
      - 2.2.2.2. Výpočet krytické velikosti zárodků.
      - 2.2.2.3. Struktury z tavného kovu.
      - 2.2.2.4. Průběh teploty na mezifázové hranici.
    - 2.2.3. Směr růstu krystalů v závislosti na izo - termách.
  - 2.3. Schema krystalizace.
    - 2.3.1. Výpočet schema krystalizace.
      - 2.3.1.1. Svařování tělesa mohutným rychle se pohybujícím strojem podle /6/.
      - 2.3.1.2. Svařování desek natupo výkonným rychle postupujícím přímočarým zdrojem /6/.
      - 2.3.1.3. Výpočet schematu krystalizace pro přímočarý zdroj s libovolnou rychlostí posuvu /7/.
      - 2.3.1.4. Obecné schema krystalizace /7/.
        - 2.3.1.4.1. Výpočet schematu krystalizace při eliptických izotermách krystalizace.
      - 2.3.1.5. Výpočet podle gradientu teploty G.
      - 2.3.1.6. Výpočet schema krystalizace podle Wittkeho.
    - 2.3.2. Zhodnocení výpočtů.

- 3.0. Experimentální část.
- 3.1. Návrh experimentálního určení velikosti tavné lázně.
- 3.2. Návrh experimentálního určení schéma krystalizace.
- 3.3. Návrh konstrukce experimentálního zařízení.
- 3.4. Provedení zkoušek.
  - 3.4.1. Svaření vzorků.
  - 3.4.2. Značení vzorků.
  - 3.4.3. Příprava vzorků.
  - 3.4.4. Zhodnocení zkoušek.
    - 3.4.4.1. Proměřování tavných lázní.
    - 3.4.4.2. Vyhodnocení schéma krystalizace.
    - 3.4.4.3. Porovnání našeho schématu krystalizace pomocí výpočtu Wittkeho.
      - 3.4.4.3.1. Výpočet dle Wittkeho.
- 4. Závěr
- 5. Literatura
- 6. Přílohy

1. Jeden z nejrozšířenějších způsobů automatického svařování je svařování pod tavidlem. Princip tohoto svařování spočívá v tom, že hořící oblouk i tavná lázeň jsou zakryty tavidlem. Tavidlo chrání roztavenou lázeň před přístupem vzduchu a současně se zúčastňuje metalurgických pochodů, které probíhají v tavné lázni. Rychlost svařování je velmi vysoká a jakost svaru velmi dobrá. Všem i zde se mohou vyskytovat vady svarového kovu. Jednou z častých vad jsou trhliny za tepla, které ohrožují zvláště konstrukce namáhané dynamicky, protože nám vytvářejí vruby. Výskyt těchto trhlin je do značné míry ovlivňován tvarem a rozměry tavné lázně. Tvar a rozměry tavné lázně nám ovlivňují schéma krystalizace.

Úkolem diplomové práce je určení schéma krystalizace v závislosti na tvaru a velikosti tavné lázně. Vyřešením tohoto úkolu, hlavně určením faktorů které schéma krystalizace ovlivňují, je možné částečně vyskyt jednotlivých vad svarového kovu omezit a tím předejít časté vznikající škodám při destrukcích konstrukcí.

Svařováním pod tavidlem se nejvíce svařují nízkouhlíkaté ocele. Z těchto důvodů byl zvolen a zkoumán materiál 11373 tloušťky 12 mm.

Celá diplomová práce je rozdělena do tří částí. V první části jsou shrnuty literární údaje o daném problému, zvláště zaměřeny na schéma krystalizace. Experimentální část obsahuje návrh a provedení zkoušek. V závěrečné části je porovnáváno experimentálně získané schéma krystalizace se současně používaným výpočtem.

## 2.1. Svařovací lázeň.

Svařování pod tavidlem, jak již vyplývá z názvu, probíhá pod vrstvou tavidla, které se zúčastňuje metalurgického procesu probíhajícího v tavné lázni. Tavná lázeň je určena třemi základními faktory, a to velikostí, tvarem a chemickým složením. Na schéma krystalizace mají největší vliv tvar tavné lázně a její velikost.

### 2.1.1. Velikost a tvar tavné lázně.

Současné výpočty velikosti a tvaru tavné lázně vycházejí ze základu Rykalinovy teorie šíření tepla. Izoterma krystalizace dle Rykalina, která odpovídá teplotě tuhnutí kovu při svařování desek nehybně rychle se pohybujícím zdrojem tepla, je dána výrazem:

$$(1.) \quad T(y, t) = \frac{q}{v_s \delta \sqrt{4\pi\lambda c v t}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4at}}$$

*vztaheno k osám (x, y)*

T ... teplota tání °C

$\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti kal/cm sec°C

q ... množství přivedeného tepla kal/sec

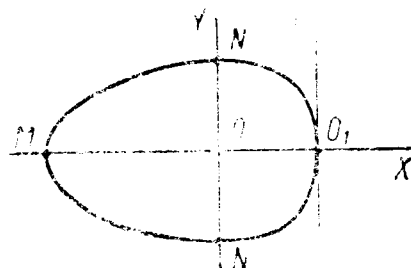
v ... rychlost posuvu oblouku cm/sec

$a = \frac{\lambda}{c v}$  ... koeficient teplotní vodivosti

c ... specifické teplo kal/g°C

$\gamma$  ... specifická váha g/cm<sup>3</sup>

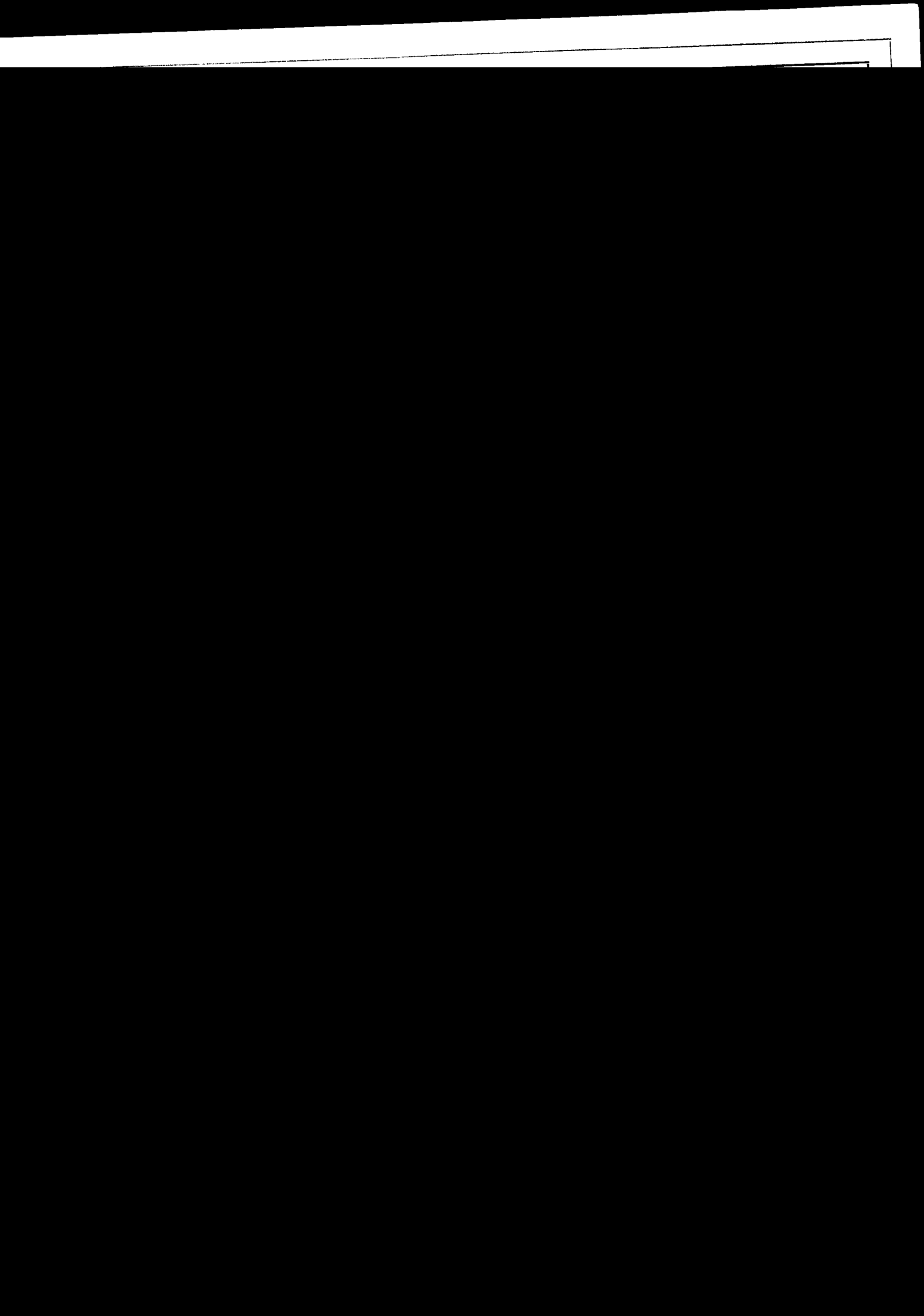
$\delta$  ... tloušťka plechu cm



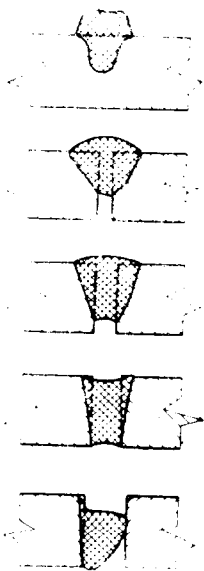
Obr.1.

Izotermny tuhnutí mají při - bližně eliptický tvar jak je patrné na obrázku 1. Při různých svařovacích podmínkách se liší od skutečnosti. Proto byla vypracována řada jiných teorií, částečně opravených, v základě vycházejících z teorie Rykalina

O těchto teoriích pojednáme později.

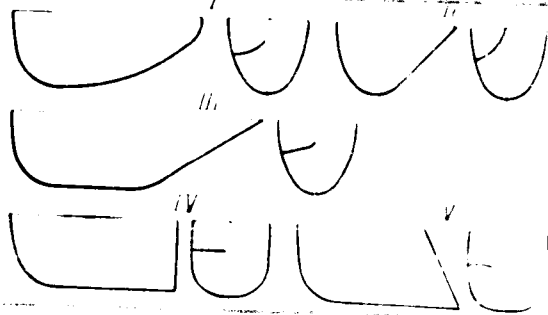


Tavná lázeň je dále závislá na tvaru a velikosti mezery stykových ploch/1/. Při zvětšení mezery se snižuje převýšení svaru, jak názorně ukazuje obr.2.



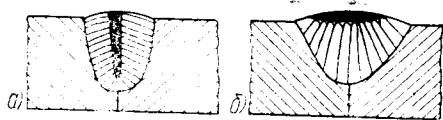
obr.2.

je vhodný tvar, který je znázorněn na obr. 4b.



obr.3.

Tuto závislost lze objasnit z rovnováhy hydrostatického tlaku tavné lázně a tlaku plynů v prostoru oblouku. Tvar tavné lázně je velmi různý při různých parametrech. Jednotlivé tvary jsou patrné z obr.3. Svary o různých tvarech tavných lázní nám vykazují i rozdílné mechanické vlastnosti. Je to způsobeno různým úhlem styku krystalů a tím i vhodným nebo nevhodným vyloučením nízkotajících složek, které nás ovlivňují i technologickou pevností. Z hlediska technologické pevnosti



obr.4.

V případě, kdy úhel styků krystalů je velký, to znamená že většina příměsí se uzavírá mezi krystaly, jak ukazuje obr.4a, je technologická pevnost značně nižší. Po srovnání součinitelů tvaru tavné lázně  $\psi$ , jako poměr šířky svaru k jeho hloubce, obdržíme závislost výskytu trhlin za tepla na činitelích  $\psi$  a % C jež je znázorněna na obr.5.

Naší snahou je, abychom se dostali do pásma omezeného výskytu trhlin.

## 2.2. Přírodní krystalizace svarového kovu:

Při tuhnutí svarového kovu probíhají tyto zá -

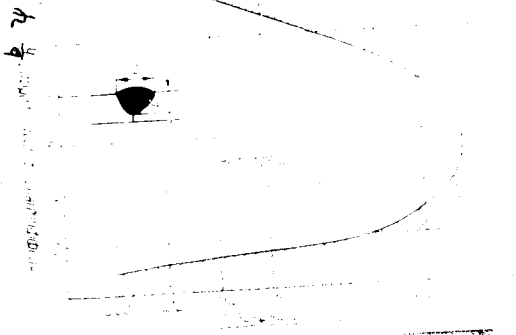


kladní fáze:

a/přechlazení

b/vznik krystalizačních zárodků

c/růst krystalizačních zárodků



obr.5.

2.2.1. Přechlazení taveniny ve svarové lázni při tuhnutí.

K tomu, aby vznikly růsta schopné krystalizační zárodky, je nutné určité přechlazení tavené lázně. Při krystalizaci svarového kovu rozlišujeme dva druhy přechlazení:

a/ tepelné přechlazení

b/ strukturální přechlazení

2.2.1.1. Tepelné přechlazení svarového kovu.

Tepelné přechlazení tavené lázně vztahujeme k rovnovážné teplotě likvidu, to znamená, že je to rozdíl mezi teplotou likvidu a teplotou dané taveniny. Při poklesu teploty na určitou hodnotu se vytváří krystalizační zárodky. Růst těchto zárodků se řídí strukturálním přechlazením.

2.2.1.2. Strukturální přechlazení tavené lázně.

Strukturální přechlazení je způsobeno tím, že technické kovy tuhnou v intervalel tuhnutí, protože se zpravidla jedná o slitiny. Jeho rozsah je vyznačen zašrafováním plechů na obr.6./2/

Při růstu krystalu dochází k tomu, že koncentrace nečistot v krystalech na mezifázové hranici je

malá, naopak koncentrace nečistot v tavenině na mezifázové hranici je podstatně vyšší. Protože ochlazení je velmi rychlé /2/ a tím i rychlý růst krystalů, nemůže dojít k difuznímu vyrovnání koncentrace a vytváří se koncentrační gradient. Koncentrační gradient je tím větší, čím větší je rychlost krystalizace  $v_k$ .

Strukturální přechlazení je tím větší, čím strmější je průběh  $T$  likv., koncentrace / C skut./, a čím pozdější je stoupaní  $T$  skuteč., jak vyplývá z obrázku.

K zachycení průběhu strukturálního přechlazení v závislosti na gradientu teploty  $G$  byla /3/ zavedena kritéria strukturálního přechlazení  $\phi$ .

obr.6.

$$(2) \quad \phi = \frac{v_k r}{G}$$

$G$  ... teplotní gradient

$v_k$  ... průměrná rychlost krystalizace v rovině plechu

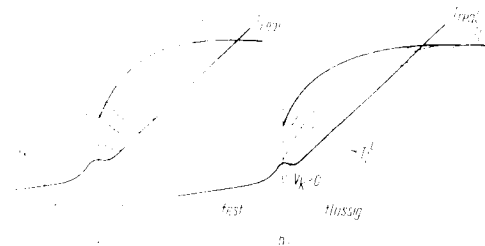
Obr. 7 znázorňuje prostorový průběh strukturálního přechlazení jak uvádí /3/.

Závěrem o strukturálním přechlazení lze říci, že je určující pro krystalizaci technických kovů a slitin, protože nám přímo určuje nepravidelnost

obr.7

růstu krystalů. Na počátku krystalizace vznikne určité přechlazení. Při krystalizaci se uvolňuje skupenské teplo a velikost strukturálního přechlazení se zmenšuje dle obr. 8 a současně se zvyšuje rozdíl kon-

centrací a snižuje se f. teplota likvidu, protože krystalizační rychlost  $\bar{R}$  je větší než odvod tepla.



obr.8.

Z těchto důvodů, jakmile začne růst krystalů, probíhá tento růst do té doby, pokud se špičky krystalů pohybují v oblasti strukturálního přechlazení. Jestliže se rozlišovací hranice dostane oblas-

ti hranice strukturálního přechlazení, růst krystalů se zastaví. Při vytvoření nového přechlazení, probíhá nový krystalizační růst. Tímto pochodem vzniká tzv. vrstevnatá nebo jaderová struktura znázorněná na obr. 9.



obr.9.

Z uvedeného vyplývá, že krystalizační rychlost je rychlostí přetržitou nikoliv plynulou. Ve všech výpočtech pro jednodušost se počítá s rychlostí  $\bar{v}$ , která je ry-

chlostí plynulou/průměrnou/.

### 2.2.2. Tvar a velikost krystalů při svařování.

Ve svarovém kovu rozlišujeme tři základní druhy krystalů:

- a/ rovinné krystaly
- b/ dendritické krystaly
- c/ sloupcovité krystaly/struktura v kolmém řezu buněčná./

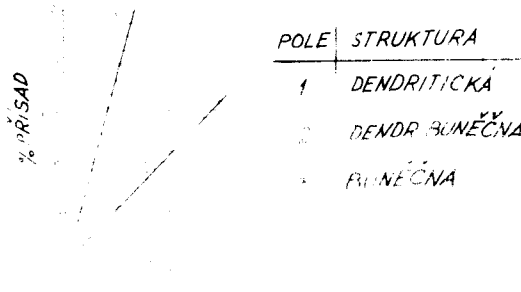
Tiller a Rutter shrnuli možnost vzniku jednotlivých struktur v závislosti na  $\bar{R}$ ,  $G$  a chemickém složení do následujícího diagramu což je na obrázku 10.

Z diagramu je patrné, za jakých podmínek mohou vzniknout jednotlivé struktury tvarového kovu.

#### 2.2.2.1. Krystalizační zárodky:

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole o teplotním přechlazení, je nutná pro vznik krystalizač-

ních zárodků určité velikosti tepelného přechlazení. Rychlost krystalizačních zárodků je přímo závislá na tepelném přechlazení.



obr.10.

Rezlišujeme dva druhy krystalizačních zárodků:

- a/ homogenní krystalizační zárodky
- b/ heterogenní krystalizační zárodky

Homogenní krystalizační zárodky vznikají jen při přechlazení taveniny čistých kovů. Možnost vzniku, je v každém bodě roztaveného kovu stejná. Aby mohlo dojít k růstu, musí zárodek dosáhnout tzv. krytického poleměru. Při tuhnutí svarového kovu nemůže dojít k růstu homogenních zárodků, protože na mezifázové hranici je vždy velké množství zárodků plošných v podobě natavených zrn základního materiálu, příměsí a vrátek. Jak vyplývá z další kapitoly mají plošné zárodky minimální krytickou velikost a tím potřebují ke svému růstu menší množství energie.

Heterogenní krystalizační zárodky mohou být objemové i plošné. Při tuhnutí lázně, se nejprve uplatní plošné zárodky na natavených zrnech základního materiálu. Z těchto natavených zrn se vytvářejí pečateční krystaly svarového kovu, které dále působí jako krystalizační zárodky. Vytváří tzv. první pásmo tuhnutí. Vlivem zonální segregace se může nahromadit větší množství heterogenit uprostřed svarové lázně. Jestliže je velké strukturální přechlazení, může nastat druhé pásmo tuhnutí. Toto pásmo je podmi-

něne tvorbou heterogenních objemových zárodků.

2.2.2.2. Výpočet krytické velikosti zárodků.

Výpočet krytické velikosti lze provést z minimální potřebné energie pro vznik zárodků.

Pro objemový zárodek platí:

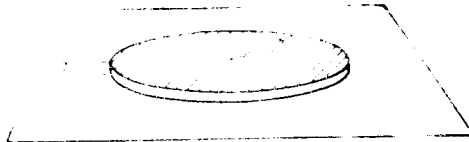
$$(3) \quad \Delta F = -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta F_v + 4 \pi r^2 \sigma$$

Pro plešný zárodek platí: /obr.11./

$$(4) \quad \Delta F = -\pi r^2 d \Delta F_v + 2 \pi r d \sigma_p$$

$\sigma, \sigma_p$  ... měrná povrchová energie

$\Delta F_v$  ... měrná objemová energie



obr.11.

Maximum  $\frac{d(\Delta F)}{dr}$  obdržíme krytický poloměr

pro:

a/ objemový zárodek

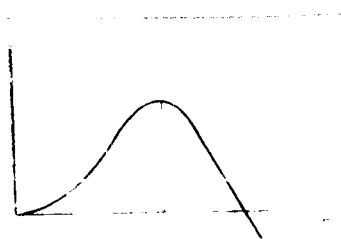
$$r_0^* = \frac{2\sigma}{\Delta F_v} \quad (5)$$

b/ plešný zárodek

$$r_p^* = \frac{\sigma_p}{\Delta F} \quad (6)$$

Jestliže položíme  $\sigma_p = \sigma$ , pak krytický poloměr  $r_p^*$  je plešný než  $r_0^*$ . Z toho vyplývá, že nám snadněji budou růst krystaly z plešných než objemových zárodků při daném tepelném přechlazení.

Velikost zárodků v závislosti na  $F$  a  $T$  je znázorněna na obr. 12 a 13.



obr.12.

obr.13.

### 2.2.2.3. Struktury svařového kovu.

Podle Tillera a Ruttera obr.10 je rozdělení vzniku jednotlivých struktur. Princip tohoto rozdělení je následující. Při vzniku buněčné struktury je velké tepelné přechlazení a malé strukturální přechlazení. Tím se vytvoří velké množství plošných zárodků. Z těchto zárodků vyrůstají krystaly současně. V případě, že by některý vyrazil rychleji kupředu, vyrůstá do té doby, až dosáhne konce strukturálního přechlazení. A protože strukturální přechlazení je malé, posouvá se celá mezifázová hranice stejnou rychlostí. Krystaly se nemohou rozvětlovat a tím vzniká struktura buněčná.

Zvětší-li se rozsah strukturálního přechlazení a zmenší se tepelný gradient, krystaly s příznivou orientací vzhledem k tepelnému gradientu vyrazí velmi rychle do taveniny. Strukturální přechlazení je dostatečně veliké, růst do stran není omezen a krystal začíná růst v ostatních krystalografických směrech  $\langle 100 \rangle$ , začíná větvení a vytváří se dendritická struktura.

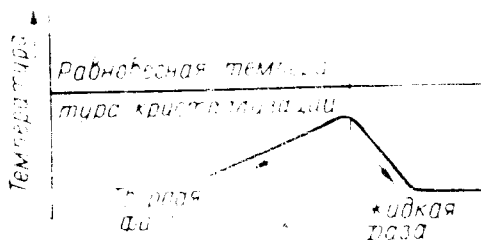
Při tuhnutí svaru nejdříve vzniká struktura buněčná, při posuvu mezifázové hranice směrem do středu svaru se zmenšuje gradient  $G$  a zvětšuje se strukturální přechlazení. Buněčná struktura se mění v dendritickou. Pásmo mezi těmito strukturami se nazývá strukturou dendritickobuněčnou.

Struktura rovnoosých krystalů přichází v úvahu pouze v druhém pásmu tuhnutí a není pro svařový kov charakteristická.

### 2.2.2.4. Průběh teploty na mezifázové hranici.

Ovlivňující faktor pro vznik těchto jednotlivých struktur, je průběh teploty na mezifázové hranici. Tento průběh vysvětluje Weinberg a Chalmers /2/ obr.14. Z obrázku vidíme, že v tavenině musíme mít určité tepelné přechlazení. Směrem k mezifázové hranici nám teplota stoupá. Je to způsobeno uvolně-

vání skupenského tepla. Sáhne k fázi tuhé teple -  
ta opět klesá. Podmínkou je, že všechny teploty mu-  
sí probíhat pod teplotou rovnovážnou s určitým pře-  
chlazením, jinak by došlo k zastavení krystalizace.



obr. 14.

### 2.2.3. Směr růstu krystalů v závislosti na izoter- nách.

Všeobecně se uznává, že směr osy krystalu je kolmý vzhledem k izotermě. To znamená, že je osa krystalu totožná se směrem maximálního gradientu teploty  $\Theta$ . Na základě tohoto názoru je stanoveno schéma krystalizace. Existují i jiné názory. Wittke říká, že osy krystalů nejsou kolmé, ale odchýleny o určitý úhel  $\Delta \frac{\Theta}{2}$ , který určuje experimentálně a zavádí do grafů. Sterenboga říká, že růst krystalů je kolmý k izotermě krystalizace pouze v případě, že je velké ochlazovací zrychlení. Podle Sterenboga by kolmý růst k izotermě krystalizace byl spíše u kružnicové izotermy.

### 2.3. Schéma krystalizace.

Pod pojmem schéma krystalizace rozumíme směr sloupcovitých krystalů vzhledem k podélné ose svaru. Tuto definici zavádí /5/. Schéma krystalizace je závislé jak již bylo řečeno na tvaru a velikosti tavné lázně. Velikost a tvar tavné lázně je závislý na teplotě svařovaného materiálu a na faktorech, které zavádí Rykalin /1/.

### 2.3.1. Výpočet schéma krystalizace.

Abychom mohli schéma krystalizace matematicky vyjádřit, byly zavedeny určité zjednodušující předpoklady.

- a/ zdroj tepla se uvažuje jako bodový.
- b/ vodivost materiálu je v rozsahu teplot konstantní
- c/ ve výpočtu se berou fázové přeměny jako exotermické.
- d/ tepelná vodivost se uvažuje ve výpočtu jen u tuhé fáze a je ve všech směrech konstantní.

Je otázkou, do jaké míry nám tyto předpoklady ovlivní výpočet schéma krystalizace. Při dostatečné vzdálenosti od osy svaru nám tyto činitele přesnost výpočtu příliš nezmenšují.

Z Rykalinovy teorie lze matematicky určit množinu bodů o stejné teplotě. Této množině říkáme teplotní pole. Matematickou rovnicí teplotního pole lze zapsat:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (7)$$

Při svařování nebudeme používat rovnici pro prostor, ale pouze rovnici pro rovinu  $x, y$ .

Rovnice soustavy izotermů krystalizace bude pro rovinu  $x, y$ :

$$F(x, y, c) = 0 \quad (8)$$

Diferenciální rovnici ortogonální dráhy lze dosáhnout touto úpravou:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{\partial F}{\partial y}}{\frac{\partial F}{\partial x}} \quad (9)$$

Rovnice soustavy izotermů krystalizace má tvar:

$$F(x + c, y) = 0 \quad (10)$$

Diferenciální rovnici osy krystalů dostaneme zderivováním parciálně podle  $x$  a  $y$  rovnicí 10.

2.3.1.1. Svařování tělesa neohutným rychle se pohybujícím zdrojem tepla podle /6/.



Vycházíme opět z Rykalinovy teorie. Výpočet budeme sledovat na obr. 15.



NMN' ... izoterma krystal.  
NON' ... " tavení  
Zdroj tepla je v bodě O  
a postupuje směrem po ose  
x.

obr.15.

Rovnice /11/:

$$T(y, t) = \frac{r}{2\pi v t \lambda} \cdot e^{-\frac{y^2}{4at}} \quad (11)$$

Pro ulehčení výpočtu nahradíme tuto rovnici izotermy krystalizace v oblouku NMN obloukem elipsy o poloosách OM a ON.

Rovnice elipsy:

$$F(x+c, y) = \frac{(x+c)^2}{(OM)^2} + \frac{y^2}{(ON)^2} - 1 = 0 \quad (11a)$$

Nyní postupujeme podle kapitoly 2.3.1.

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{(OM)^2} \cdot 2(x+c)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{1}{(ON)^2} \cdot 2y$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{\partial F}{\partial y}}{\frac{\partial F}{\partial x}} = \frac{(OM)^2}{(ON)^2} \cdot \frac{y}{x+c} \quad (12)$$

Z /11/ dosadíme za / x + c / do rovnice /12/ a dostaneme diferenciální rovnici osy krystalů.

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

Integrovaním při podmínkách  $x = 0 \Rightarrow y = ON$  dostaneme:

$$x = \frac{ON}{OM} \left[ \sqrt{(ON)^2 - y^2} \right] - ON \cdot \ln \frac{ON + \sqrt{(ON)^2 - y^2}}{y}$$

Zavedeme:  $k = \frac{y}{ON} \Rightarrow k \in \langle 0; 1 \rangle$

Rovnice osy krystalů:

$$x = \frac{(ON)^2}{OM} \left[ \sqrt{1 - k^2} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k^2}}{k} \right] \quad (13)$$

Odvození OM: z rovnice /IV/ pro  $y=0$  dostaneme:

$$T = \frac{q}{2\pi \lambda v t} \quad ; \quad v \cdot t = x$$

$$x = OM = \frac{q}{2\pi \lambda T} \quad (14)$$

Odvození ON: z rovnice /IV/ logaritmováním získáme rovnici pro  $y$ .

$$e^{-\frac{y^2}{4at}} = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot T}{q} \cdot v \cdot t$$

$$e^{-\frac{y^2 v}{4ax}} = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot T}{q} \cdot x = A \cdot x$$

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

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

$$y = 2 \sqrt{\left(\ln \frac{1}{A} + \ln \frac{1}{x}\right) \frac{ax}{v}} \quad (15)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left(\frac{a}{v} \cdot \ln \frac{1}{A} + \frac{a}{v} \cdot \ln \frac{1}{x} - \frac{a}{v}\right)}{\sqrt{\left(\ln \frac{1}{A} + \ln \frac{1}{x}\right) \frac{ax}{v}}} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{a}{v} \cdot (\ln A + \ln x + 1) = 0 \Rightarrow \ln x = -1 - \ln A$$

$$x = \frac{1}{e A} \approx 0,0 \Rightarrow y = y_{max}$$

$$y_{max} = ON = 2 \sqrt{\frac{a}{e A v}} = 2 \sqrt{\frac{a q}{e 2\pi \lambda T v}} = 0,484 \sqrt{\frac{q a}{\lambda v T}} \quad (16)$$

Vyčíslení rovnice /16/.

$$0,0_1 = 0,0585 \frac{q}{\lambda T} \quad (17)$$

$$OM = 0,1 - 0,0 = 0,1006 \frac{q}{\lambda T} \quad (18)$$

Vypočtené hodnoty dosadíme do /13/.

$$x = -2,328 \frac{\lambda}{e \cdot q \cdot v} \cdot \psi \quad (19)$$

$$\text{kde } \psi = \left[ \sqrt{1-k^2} - \ln \frac{1+\sqrt{1-k^2}}{k} \right] \quad (20)$$

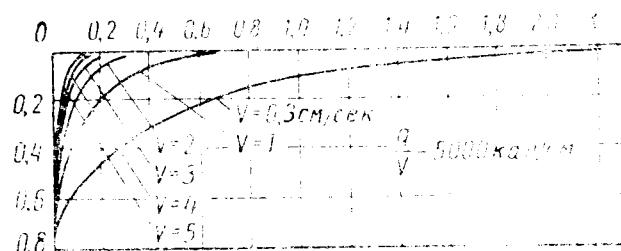
$k$  a  $\psi$  lze vyhledat v tabulkách.

Na obr. 15 je dále znázorněn  $\frac{\theta}{2}$ , což je úhel mezi směrem osy krystalu v určitém bodě a osou x.

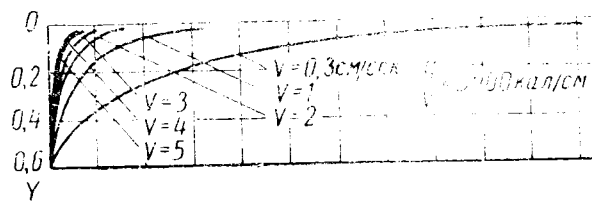
$$\frac{dy}{dx} = t_g \frac{\theta}{2} = \frac{OM}{ON} \cdot f \quad \text{kde } f = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \quad (21)$$

$f$  lze vyčíst v tabulce závislosti na  $k$ .

Na obr. 16 a 17 je znázorněn průběh os krystalů podle rovnice-13/.



obr.16



obr.17

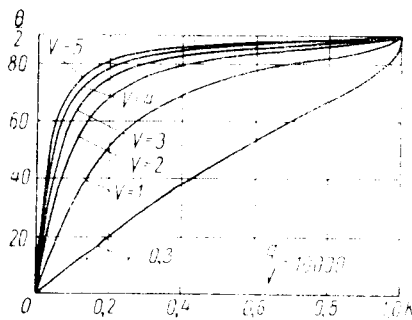
Obr. 18 a 19 nám určuje závislost úhlu  $\frac{\theta}{2}$  na  $k / k = \frac{v}{ON}$  / při různé rychlosti svařování  $v$ , a  $\frac{q}{v}$

Z provedeného výpočtu a obr. 16,17,18, 19 lze vyčíst/učinit/ tyto závěry.

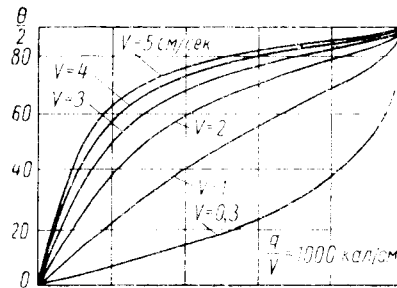
a/ úhel sklonu krystalů  $\frac{\theta}{2}$  se mění při změnách režimu svařování jen v oblastech odlehklých od osy svaru a hranic natavení. Zůstává konstantní v místech pro  $k = 0 / \frac{\theta}{2} = 0^\circ$  a pro  $k = 1 / \frac{\theta}{2} = 90^\circ /$ .

b/ při dané tepelné intenzitě  $\frac{q}{v}$ , velikost úhlu  $\frac{\theta}{2}$  roste se zvětšováním rychlosti svařování  $v$  /při  $k = \text{konst.} /$ .

c/ při dané rychlosti svařování  $v$  a při zvětšováním  $\frac{q}{v}$  se zvětšuje  $\frac{\theta}{2}$ . Tím se blížíme ke schématu krystalizace znázorněného na obr. 20 a/.



obr.18



obr.19



obr.20

2.3.1.2. Svařování desek natupo výkoným rychle postupujícím přinečarým zdrojem /6/.

Zde se neuvažuje odvod tepla ve směru kolmém na povrchovou rovinu desky.

V tomto případě se použije pro soustavu izotern rovnice/1/

$$T(y, t) = \frac{q}{v \cdot \delta \sqrt{4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot t}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4\alpha t}}$$

Obdobným způsobem jako v kapitole 2.3.1.1. lze odvodit tyto vztahy:

$$(22) \quad O_{1R} = \frac{q^2}{4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot T^2 \cdot v \cdot \delta^2}$$

$$(23) \quad O_{0R} = \frac{q^2}{4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot T^2 \cdot v \cdot \delta^2 \cdot e}$$

$$(24) \quad OM_R = O_{1R} - O_{0R} = 0,0503 \frac{q^2}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot v \cdot \delta^2 \cdot T^2}$$

$$(25) \quad ON_R = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot c}}}{2 \cdot v \cdot c \cdot \rho \cdot \delta \cdot T} = 0,242 \frac{q}{v \cdot c \cdot \rho \cdot \delta \cdot T}$$

Index R značí, že se jedná o mežutný přinečarý zdroj, který se pohybuje velkou rychlostí.

Rovnice osy krystalu:

$$x = 1,164 \frac{\lambda}{v \cdot c \cdot \mu} \cdot \psi \quad (26)$$

Rovnice pro úhel  $\frac{\theta}{2}$ :

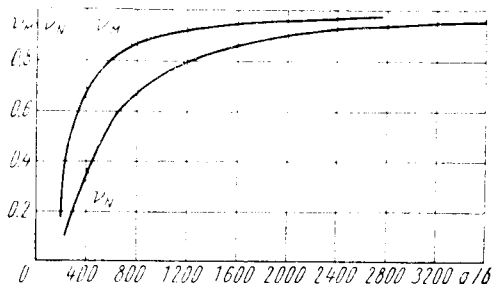
$$\frac{\theta}{2} = \arctg \left( 0,208 \frac{q}{\lambda \cdot \sigma \cdot T} \cdot f \right) \quad (27)$$

Rovnice rychlosti krystalizace:

$$v_k = \frac{v}{\sqrt{1 + 0,043 \frac{q^2}{\lambda^2 \cdot \sigma^2 \cdot T^2} \cdot f^2}} \quad (28)$$

2.3.1.3. Výpočet schématu krystalizace pro přímocha-  
rý zdroj s libovolnou rychlostí posuvu. /7/

Pro tento výpočet se zavádějí opravné koefi-  
cienty  $\nu$ , které jsou uvedeny na obr. 21.



obr.21

Současně platí:

$$\begin{aligned} OM &= \nu_N OM_R \\ ON &= \nu_R ON_R \end{aligned} \quad (29)$$

Dosaďme do rovnice  
26,27,28 a dostaneme:

$$x = \frac{\nu_N}{\nu_R} \cdot 1,164 \frac{\lambda}{v \cdot c \cdot \mu} \cdot \psi \quad (30)$$

$$\frac{\theta}{2} = \arctg \left( \frac{\nu_N}{\nu_R} \cdot 0,208 \frac{q}{\lambda \cdot \sigma \cdot T} \cdot f \right) \quad (31)$$

$$v_k = \frac{v}{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu_N}{\nu_R}\right)^2 \cdot 0,043 \cdot \frac{q^2}{\lambda^2 \cdot \sigma^2 \cdot T^2} \cdot f^2}} \quad (32)$$

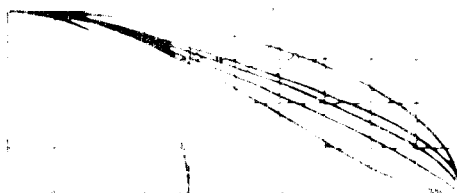
2.3.1.4. Obecné schéma krystalizace /7/.

Mastrjakova se snaží zachytit tvar izotermy  
krystalizace jedinou rovnicí pomocí bezrozměrných  
koeficientů A a n.

Rovnice pro x zní:

$$(33) \quad x = \left[ 1 - A \sqrt{\left(\frac{v}{ON}\right)^n} \right] \cdot \frac{OM}{ON} \cdot \sqrt{ON^2 - v^2}$$

A...opravný bezrozměrný koeficient / $A \in \langle 0,1 \rangle$ /  
 $a...1,2,3$  nebo 4  
 Kombinací těchto koeficientů dostává se autoroka různých tvarů izoter, jak je znázorněno na obr.22.



obr.22

Rozbor rovnice / 33 /:

- Křivka: 1 ...  $A = 0$ ;  $OM = ON$  /elipsa/  
 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 ...  $A = 0.5$ ;  $n = 4$  / " " /

$$(34) \quad \frac{dy}{dx} = -\frac{ON^2}{OM} \cdot \frac{(ON)^{\frac{n}{2}-1}}{2 \cdot \sqrt{ON^2 - y^2} [1 - A \sqrt{(\frac{r}{ON})^n}] 2y + A_n \cdot (ON^2 - y^2) y^{\frac{n}{2}-1}}$$

Rozborem rovnice 34 dojdeme k závěru:

- a/ v bodě N / při  $y = ON$  / při libovolném  $n$  je  $\frac{dy}{dx} = 0$   
 b/ v bodě M / při  $y = 0$  / rovnice závisí na  $n$ :

- $n = 1$  je tečna rovnoběžná s osou  $x$   
 $n = 2$  tečna protíná osu  $x$  pod určitým úhlem  
 $n > 2$  je tečna kolmá k ose  $x$

V případě stykové spojky desek je určeno

OM a ON takto:

OM je úměrná  $\frac{q^2}{\lambda \cdot c \cdot r \cdot v \cdot \delta^2 \cdot T}$  analog.rov.24

ON je úměrná  $\frac{q}{v \cdot c \cdot r \cdot \delta \cdot T}$  analog.rov.25

Z toho vyplývá:

$$(35a) \quad OM = \frac{1}{\delta} \frac{q^2}{\lambda \cdot c \cdot r \cdot \delta^2 \cdot T^2 \cdot v}$$

$$(35) \quad ON = \frac{1}{p} \frac{q}{v \cdot c \cdot \gamma \cdot \sigma \cdot T}$$

$\frac{1}{\sigma}, \frac{1}{p}$  ... koeficienty úměrnosti

$\sigma, p$ , se získává experimentálně proměřením  $OM$  a  $ON$  na konkrétním svaru a dosadí se do následujících vztahů:

$$(36) \quad \sigma = \frac{1}{ON'} \cdot \frac{q^2}{\lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot \sigma^2 \cdot T^2} = f\left(\frac{q}{v}\right)$$

$$(37) \quad p = \frac{1}{ON'} \cdot \frac{q}{v \cdot c \cdot \gamma \cdot \sigma \cdot T} = f\left(\frac{q}{v}\right)$$

Pro nízkouhlikatou ocel je:

$$(38) \quad \sigma = 0,014 \frac{q}{v} \quad p = 0,003 \frac{q}{v}$$

Určení koeficientu  $A$ :

Určuje se porovnáním experimentálně získané izotermy krystalizace s vypočtenými křivkami. Hodnota  $A$ , při které se vypočtená křivka shoduje s experimentální, se bere do výpočtu.  $A$  se vynáší v závislosti na  $\frac{q}{v}$  do grafu.

#### 2.3.1.4. 1. Výpočet schématu krystalizace při eliptických izotermách krystalizace.

Výpočet se provádí z rovnice 33, kde  $n = 4$

$$(39) \quad x = \left[1 - A \left(\frac{k}{ON}\right)^2\right] \frac{OM}{ON} \sqrt{ON^2 - \gamma^2}$$

Z této rovnice se odvodí následující vztahy pro osu krystalu:

$$(40) \quad x = \frac{ON}{OM} \cdot \frac{1}{1+2A} \cdot \left[ -\frac{ON}{2} \ln \frac{1+\sqrt{1-k^2}}{1-\sqrt{1-k^2}} + ON \sqrt{\frac{1-A}{3A}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1-k^2}{\frac{1-A}{3A}}} \right]$$

$$(41) \quad \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{OM}{ON} \cdot \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \cdot [1 + A \cdot (2 - 3k^2)]$$

$$(42) \quad v_k = \frac{v}{\sqrt{1 + \left(\frac{OM}{ON}\right)^2 \cdot \frac{k^2}{1-k^2} \cdot [1 + A \cdot (2 - 3k^2)]}}$$

Osy krystalů takto vypočtené nám vykazují velmi malé odchylky od experimentálně získaných hodnot.

2.3.1.5. Výpočet pole gradientu teploty  $G$ .

Gradient teplotního pole v rovině je určen složkami v osách  $x$  a  $y$ .

$$(43) \quad \frac{\partial T}{\partial n} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$$

Úpravou rovnice (1), to znamená, zavedením  $t = \frac{x}{v}$ , diferencování  $\frac{\partial T}{\partial x}$  a  $\frac{\partial T}{\partial y}$ , logaritmování a zavedením opravných koeficientů  $m$  a  $n$  a vypočítání  $y^2$  dostaneme gradient teplotního pole:

$$(44) \quad G = \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{T}{2x} \sqrt{\left(\frac{n^2}{m} \cdot \frac{y^2 v}{2ax} - 1\right)^2 + \left(-\frac{n^2}{m}\right)^2 \frac{y^2 v^2}{a^2}}$$

kde

$$(45) \quad y^2 = -\frac{m}{n^2} \cdot \frac{4a}{v} \cdot x \cdot \left[ \ln \frac{2T \cdot v \cdot \delta \sqrt{\frac{\pi \lambda \cdot c \cdot \delta}{v}}}{q} + \frac{1}{2} \ln(m+x) \right]$$

Opravné koeficienty  $m$  a  $n$  v [5] byly stanoveny pro ocel St 3 takto:

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

$$n = 0,00049 \frac{q}{v_s} + 0,2$$

Jak je patrné na obr.23 upravené hodnoty teplotního gradientu jsou menší.

Rovnice pro výpočet teplot podél osy  $x$  je:

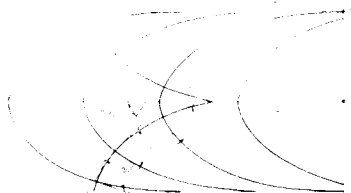
$$(46) \quad T = \frac{q}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4\pi \lambda \cdot c \cdot \delta}} \frac{1}{r_x}$$

obr. 23

2.3.1.6. Výpočet schéma krystalizace podle Wittkeho [17]

Při výpočtech se všeobecně používá podmínky, že osy krystalů jsou kolmé k izotermě podle obr.24.

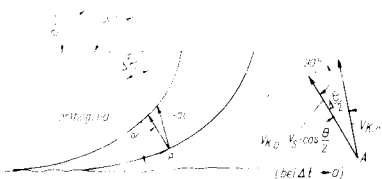




obr.24

Podmínka kolmého růstu osy krystalu na izotermu, je zachována pouze u tuhnutí čistého kovu. Technické kovy a slitiny, které tuhne v intervalu teplot, tuto podmínku nezachovávají.

Proto Wittke upravuje rovnici (47) podle obr.25 na rovnici (48).



$$(47) \quad v_k = v_s \cdot \cos \frac{\theta}{2}$$

$$(48) \quad v_r = v_s \cdot \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\cos \Delta \frac{\theta}{2}}$$

obr.25

kde  $v_r$  ... skutečná rychlost krystalizace

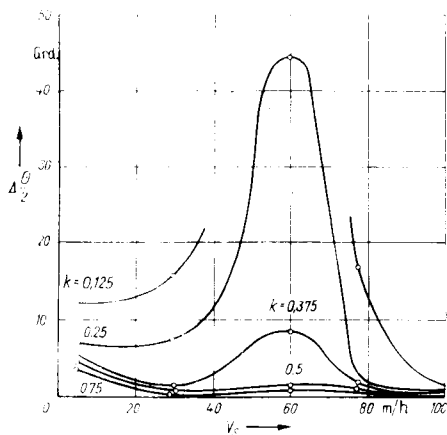
$v_s$  ... rychlost svařování

$\theta$  ... vypočítaný úhel

$\Delta \frac{\theta}{2}$  ... úhel mezi  $v_r$  reál a  $v_k$  ortog.

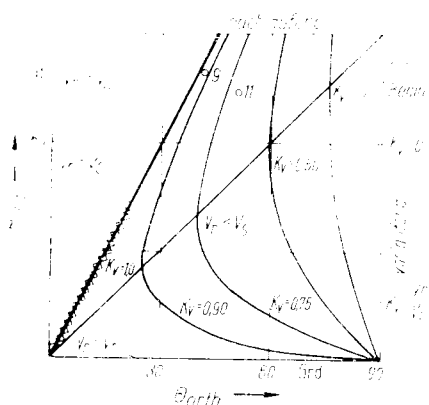
$\Delta \frac{\theta}{2}$  se experimentálně určí v závislosti na  $v_s$

obr.26, kde  $k = \frac{v_r}{v_s}$ .



obr. 26

Skutečnou krystalizační rychlost  $v$  v závislosti na úhlech  $\theta_{reál}$  a  $\theta_{ortog}$  lze převést podle obr.27. Příčka, vedená z počátku O do protilehlého rohu diagramu, určuje, ortogonální podmínku pro  $\Delta \frac{\theta}{2} = 0$ .



obr. 27

Vynesením odečteného  $\frac{\theta_{real}}{2}$  a vypočteného  $\sqrt{\frac{\theta_{ortho}}{2}}$  dostaneme bod, pro který odečteme určité  $K_v = \frac{v_r}{v_s}$ .  
Z tohoto výrazu určíme  $v_r$ .

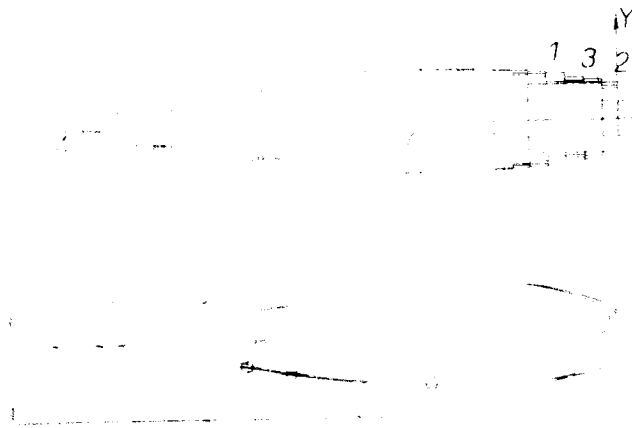
### 2.3.2. Zhodnocení výpočtů.

Ve všech výpočtech, které byly uvedeny, mimo výpočet podle Wittkeho, se uvažuje, že osy krystalů jsou ortogonální k izotermám. S tímto předpokladem lze souhlasit pouze v oblastech vzdálenějších od osy svaru. Proto se projevuje určitá nepřesnost výpočtu, kterou se snaží jednotliví autoři opravit opravnými koeficienty. Dále nebylo uvažováno skupenské teplo tání, změna tepelné vodivosti, vliv vláken atd.

Mastrjukova se snaží o vyřešení obecné rovnice krystalizace, protože se ukázalo, že izoterny krystalizace mají v některých případech tvary zcela jiné / zbořené elipsy /.

Wittke uvádí velmi jednoduchý výpočet, který se ukazuje dosti v hodný. V jiných pramenech se zabývá také prostorově řešeným schématem krystalizace. Tímto prostorovým řešením se také zabývá Prochorev se svým kolektivem /9/. Na základě statistické metody určují tvar tavné lázně viz obr. 28.

STUDIJNÍ ČÁST.



obr. 28

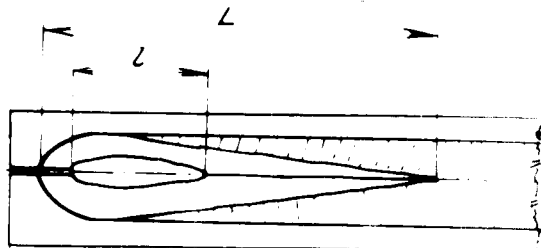
V podstatě lze říci to, že základ všech vý -  
počtů spočívá v eliptické izotermě krystalizace a v  
ortogonálním růstu krystalů k izotermě krystalizace.

3.0. Experimentální část.

3.1. Návrh experimentálního určení velikosti tavné lázně.

Jak bylo popsáno v kapitole 2.1. existuje velké množství zkušek a měření, kterými se buď přímo a nebo nepřímo určuje tavná lázeň. Podle našeho názoru bude nejspolehlivější metoda ta, která nám zaručí přesný tvar tavné lázně tím, že odstraní velmi rychle reztavený kov.

Po vylití reztaveného kovu bude možno sledovat velikosti a tvary vzniklých svařových lázní. Při <sup>měřování</sup> svařových lázní si budeme všimnout vzdálenosti  $L$ ,  $l$  jak je vyznačeno na obr. 29 a tvarů, které byly uvedeny na obr. 3., v závislosti na režimu svařování a počáteční teplotě svařovaného materiálu.



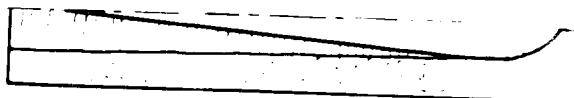
obr. 29

Tuto závislost se budeme snažit vyhodnotit.

3.2. Návrh experimentálního určení schéma krystalizace.

Definice schéma krystalizace byla popsána ve studijní části 2.3. Proto také jsme se rozhodli k získání svařových lázní, které budou základem k určení schéma.

Ze svařových lázní uděláme řadu řezů kolmých a podle obr. 30 určíme optimální úhel  $\alpha$  sklonu krystalů, a pod tímto sklonem nařezáme podélné řezy tavných lázní jak je na obr. 31.

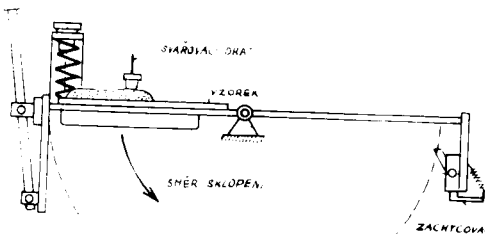


obr.30

obr.31

Vedle řezů podélných <sup>nařezáme</sup> i svarovou vanu v řezech kolmých, a to ve vzdálenosti řezů 10 mm. Z těchto řezů budeme určovat přírůstky krystalů a tím i rychlost  $V_A$ . Takto získanou krystalizační rychlost porovnáme s teoretickým výpočtem Wittkoha/2.3.1.6./3.3. Návrh konstrukce experimentálního zařízení.

Naší metodou bude metoda vylití tavné lázně. Vylití tavné lázně budeme provádět na sklepném zařízení dle obr. 32.



obr. 32

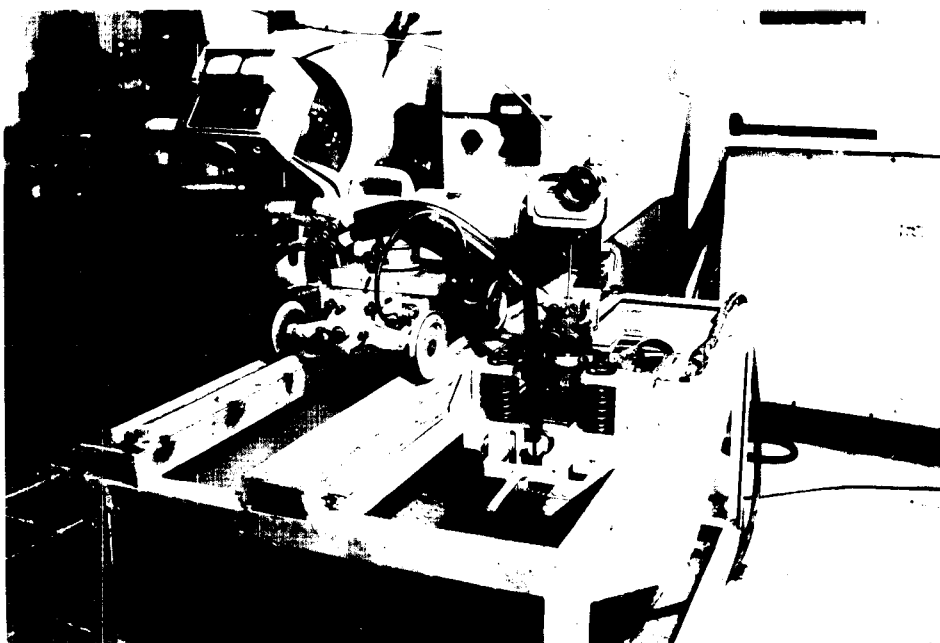
Při konstrukci tohoto zařízení narážíme na problém rychlosti vylití a způsobu vylití. Rychlost vylití se snažíme získat co největší, Bylo to provedeno tím způsobem, že k urychlení vylévání vzorku

byly použity dvě pružiny, které v okamžiku vylévání působí silou 200 kp. a vytváří tak kroučící moment 60 kpm. vzhledem k ose. Možnost zmenšení kroučícího momentu lze provést stavěcím šroubem, který drží pružinu.

Směr svařování byl zvolen takový, aby chladnější místo tavné lázně bylo na větším poloměru než místo teplé, což zaručuje dokonalejší vylití roztaženého kovu.

Zařízení bylo opatřeno koncevým derazem z pěnové gumy a zachyčovačem vzorku. Natahování pružin se provádí přes páku - viz výkres.

Na obr. 33 je sklopné zařízení s automatem v pracovní poloze. Obr. 34 a 35 nám ukazují jednotlivé polohy sklopného zařízení.

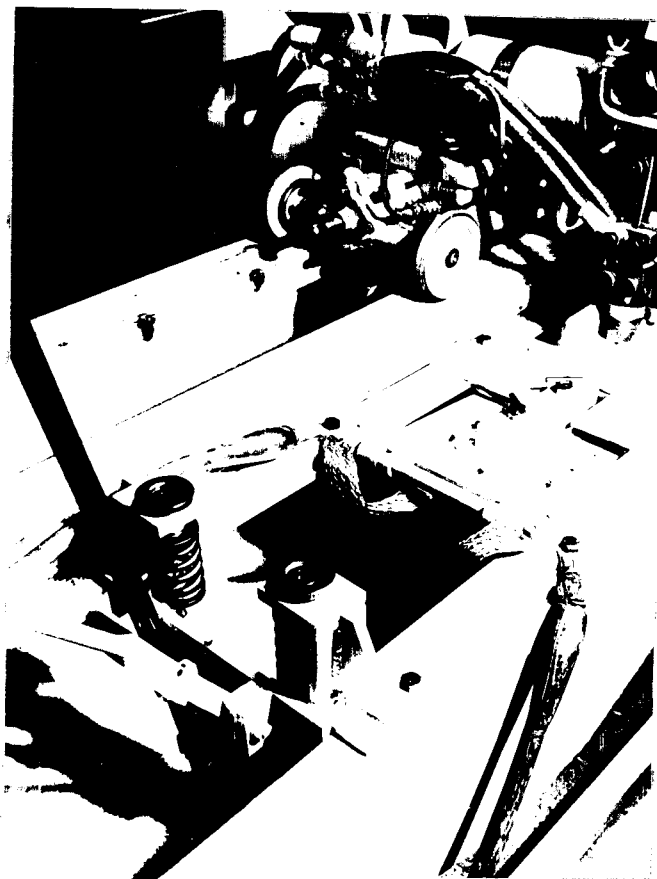


obr.33

Přesto, že zařízení je velmi jednoduché, projevilo se jako velmi účinné s možností univerzálního použití i při vylévání tavných lázní při ručním svařování.



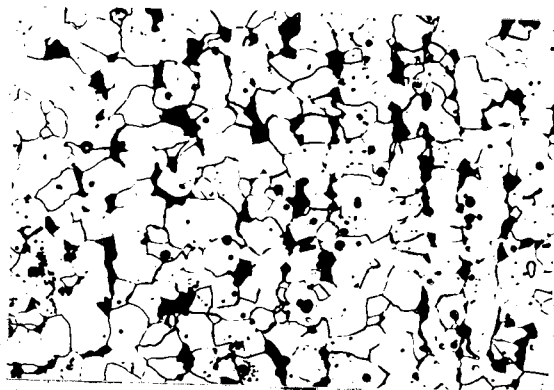
obr. 34: Poleha základové desky přípravku se vzorkem před sklopením.



obr. 35 : Pracovní deska v zachycené poloze.

3.4. Provedení zkoušek.

Pro zkoušky byl zvolen materiál 11373 tloušťky 12 mm. Z tabule plechu bylo nařezáno 72 vzorků o rozměrech 170x100 mm. Vzorky byly normalizačně vyžehány na teplotu 960 °C po dobu 30'. Základní struktura materiálu je na obr. 36.



Zvětšeno 200 x. LEPTANO A LEŠTĚNO  
ELEKTROLITICKY V.KYS.  
CHROMOVÉ

obr. 36

Vzorky byly otryskány a nabodovány tak, aby byly připraveny pro svařování. Šířka mezery byla 2 mm.

3.4.1. Svaření vzorků.

Svaření vzorků bylo provedeno na sklopném zařízení. Před svařením byly vzorky rozdělány do tří tříd.

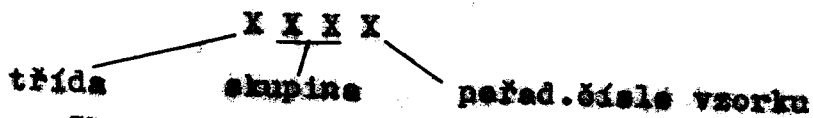
První třída A - byla svařena za normální teploty.

Druhá třída B - byla předehřáta na 200 °C.

Třetí třída C - ochlazena na - 49 °C.

3.4.2. Značení vzorků.

Značení vzorků bylo provedeno následujícím způsobem:



Skupiny vzorků jsou rozdělány podle obrázku čís. 37. Šipky určují směr válcování materiálu.



obr. 37

Každá třída obsahuje 4 vzorcích všech tří skupin.

Různé směry válcování na jednotlivých vzorcích byly zvoleny proto, aby se mohlo posoudit, jak dalece působí vliv směru válcování na tavnou lázeň.

#### 3.4.3. Příprava vzorků.

Po svaření desek bylo prováděno fotografování tavných lázní a nařezání vzorků. Z makroskopických základních svařených vzorků byl určen optimální úhel sklonu krystalů  $\alpha$  viz příl.1.

Průměrný úhel našich proměřených svarů činí 32°. Měření bylo provedeno z průsečíku spojnice vrchních hran plechů a osu svaru - viz obr. 30. Základní úhel pro šikmý řez rovnoběžný s osou svaru byl vzat 30°. Pod tímto úhlem byla ohoblována jedna polovina svařové lázně. Druhá polovina svařové lázně byla rozřezána kolmo k ose svaru. Ze všech těchto vzorků byly provedeny metalografické výbrusy. Fotografie těchto výbrusů nám dává názorný přehled o schémě krystalizace.

#### 3.4.4. Zhodnocení zkušek.

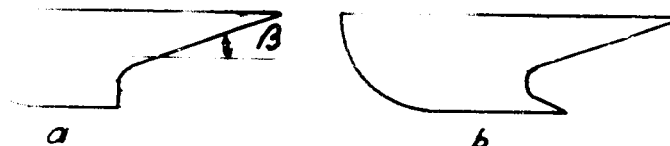
##### 3.4.4.1. Proměření tavných lázní.

Při proměření tavných lázní podle obr.29 byly zjištěny hodnoty, které jsou sestaveny na obr. čís.38.

VZOREK	I [A]	U [V]	L [mm]	Z [mm]	B [mm]	VZOREK	I [A]	U [V]	L [mm]	Z [mm]	B [mm]
ARR1	860	39	103	46	18	BRS1	860	39	105	79	20
ARR2	840	41	105	42	17,5	BRS2	860	39	100	71	18
ARR3	850	40	98	40	18	BRS3	-	-	-	-	-
ARR4	840	49,5	100	52	18,5	BRS4	860	39	110	72	13,5
ARS1	840	40	105	48	18	BTT1	860	39	110	70	19
ARS2	840	39	100	40	17,5	BTT2	855	39,5	105	68	19
ARS3	860	39	105	53	20	BTT4	860	39	105	65	20
ARS4	-	-	-	-	-	CRR1	860	39	100	54	18
ATT1	860	39	110	54	17	CRR3	840	40	96	45	18
ATT2	860	39	95	55	18	CRR4	850	39	95	37	18
ATT3	860	39	105	48	18	CRS1	860	39	90	40	18
ATT4	855	40	100	46	17	CRS3	860	39	94	42	-
ARR1	860	39	105	70	20	CRS4	840	38	100	40	-
ARR2	860	39	107	68	20	BTT2	860	39	95	40	-
ARR3	860	39	110	64	18	BTT3	860	38,5	95	40	-
ARR4	860	39	110	55	17	BTT4	860	39	100	40	-

obr. 38.

Z těchto hodnot lze učinit závěr, že varštatující teplotou předehřátí se tavná lázeň prodlužuje a současně se sčítáje úhel  $\beta$  koncevé šláci tavné lázně. Naopak při snižování počáteční teploty tavná lázeň je užší a kratší a úhel  $\beta$  dle obr. 39 se zmenšuje. Při sledování koncevé tavné lázně bylo zjištěno, že se často vyskytují tavné lázně, které jsou snáz zorněny na obr. 39.



obr. 39

Tyto tvary tavných lázní zvláště tvar obr. čís. 39b, jsou nepříznivé a hlediska technologické pevnosti. K prvnímu spojení krystalů dochází ve středních partiích svarového kovu. V příloze 9. je názorný vznik trhliny za tepla. S největší pravděpodobností vznikla z těchto důvodů: Po spojení středních krystalů / řez 6 / v bodu O nám tuhnou partie nad tímto bodem i pod tímto bodem. Protože rychlost ochlazování ve středních partiích je větší než nad bodem O a bod styku je vzhledem k těmto místům relativně pevný, musí dojít v místě nad bodem O k tahovému namáhání. Toto namáhání může způsobit trhliny, jako se stalo v našem případě.

Z toho vyplývá, že sledování tvaru tavné lázně lze částečně řešit i vznik trhlín za tepla.

#### 3.4.4.2. Vyhodnocení schéma krystalizace.

Ve výpočtech schéma krystalizace se vychází z ortogonálního růstu krystalů k izotermní krystalizaci. Jestliže budeme sledovat tuto podmínku i na našich přílohách, vidíme, že tato závislost není splněna / v přílohách vyznačeno kroužky /. Zjistilo se, že krystaly se snaží zachovávat původní směr, který získaly na počátku krystalizace. Je to způsobeno tím, že na počátku krystalizace vyrůstají krystaly z krystalizačních zárodků natavených zrn. Protože nízkouhlíkaté ocele nám nevykazují silnou texturu, dochází k usměrnění krystalů do kolmého růstu k izotermní krystalizaci. Jakmile se vytvoří první krystaly stane se mezifázová hranice silně texturní a krystaly se budou snažit růst v daném směru textury. Nebudou nám tedy zachovávat podmínku ortogonálního růstu.

Z těchto důvodů lze považovat výpočet schéma krystalizace podle Wittkeho za základ k dalším rovinným výpočtům. Nyní půjde o to, zachytit odchylku mezi ortogonálním a skutečným směrem os krystalů, nikoliv empiricky, jak to provádí Wittke, ale mate-

maticky pomocí možnosti deformování krystalů při epitaxiálním růstu a tím i natáčení textury / os krystalů / vzhledem k izotermě krystalizace.

3.4.4.3. Porovnání našeho schematu krystalizace pomocí výpočtu Wittkeho.

Wittke se zabýval zkoumáním schema krystalizace při svařování pod tavidlem /11/. Z těchto důvodů, jsme zvolili porovnání našeho experimentálně získaného schema krystalizace s výpočty Wittkeho.

Wittke stanovuje schema krystalizace u svařování pod tavidlem za normální teploty svařovaných desek. A proto, pro porovnání budeme sledovat pouze vzorky označeny počátečním písmenem A. Z tabulky obr. 38 vidíme, že délka L se pohybuje v průměru okolo 100mm,  $l \approx 50\text{mm}$ . Proto si za představitele při porovnání vezmeme vzorek ARR4, který vykazuje hodnoty průměrné.

Vzorek byl svařen těmito parametry:

I.....840 A

U.....40,5 V

v .....28m/hod = 7,8mm/sec

3.4.4.3.1. Výpočet dle Wittkeho.

Vycházíme z rovnice (48)

$$V_r = V_s \frac{\cos \frac{\theta}{2} \cos \theta}{\cos \Delta \frac{\theta}{2}}$$

Pro výpočet v budeme považovat izotermu krystalizace jako přímku, která svírá s osou svaru poloviční úhel šípu  $\frac{\theta}{2}$ , měřeného v rovině x, y = s horní rovinou plechu, tak jak to určuje Wittke.

V našem případě bylo naměřeno:

$$\frac{\theta}{2} = 8^\circ 30'$$

$$\Rightarrow \theta_{\text{ext}} = 17^\circ 30'$$

Při výpočtu koeficientu k, vycházejme z rovnice (47)

$$v_k = v_s \cdot \cos \frac{\theta}{2} \quad (47)$$

položme  $v_r = v_k$ . Tento předpoklad můžeme učinit při malých úhlech  $\frac{\theta}{2}$ , jako je v našem případě.

Z toho vyplývá:  $v_r = v_s \cos \frac{\theta}{2}$

$$k = \frac{v_r}{v_s} \Rightarrow k = \cos \frac{\theta}{2}$$
$$k = \cos 81^\circ 30'$$
$$k = 0,14781$$

Z grafu, který je na obr. 26 odečteme pro danou rychlost  $v_s$  a  $k$  odchylku  $\Delta \frac{\theta}{2}$ .

Porovnáním hodnot  $\frac{\theta}{2} = 8^\circ 30'$  a  $\Delta \frac{\theta}{2} = 12^\circ$  dojdeme k závěru, že není možné, aby tato podmínka byla splněna. Pro náš případ by měla být odchylka  $\Delta \frac{\theta}{2}$  maximálně  $8^\circ 30'$ , jinak by rostly krystaly proti směru svařování, což je vyloučeno.

Z hlubšího prostudování diagramu obr. 26 v rozmezí  $k = 0,125$  až  $k = 0,25$ , docházíme k závěru, že v těchto oblastech je  $\Delta \frac{\theta}{2}$  velmi malá a jeho určení velmi nesnadné.

Protože při doporučených režimech svařování, pro náš svařovací traktor SUM 1000, se izoterma krystalizace pohybuje právě v tomto rozmezí, kde  $k$  se pohybuje mezi 0,125 a 0,25, je nutné pro naše schéma krystalizace částečně poopravit závěry Wittkeho.

Opravu je nutné provést ve smyslu zmenšení  $\Delta \frac{\theta}{2}$  v rozmezí  $k = 0,125$  až 0,25.

Po těchto malých opravách by nám výsledky podle Wittkeho vyhovovaly velmi dobře.

Pro zjištění oprav, by bylo nutné provést řadu zkoušek, při různých parametrech svařování, pohybujících se ve zmíněné oblasti. V současné době

4. Závěr.

V první části diplomové práce byl pokus o objasnění daného problému. Z této části vidíme, že názor a přístup k výpočtu schéma krystalizace je u různých autorů jiný. V každém případě všichni vycházejí z teorie Rykalinovy. Domníváme se, že tato teorie by měla být podrobena hlubšímu zkoumání, protože naše experimentálně získaná tavná lázeň neodpovídá této teorii.

Problém, schéma krystalizace, není jen problémm teoretický. Na schématu krystalizace závisí mechanické vlastnosti svarových spojů. Proto i nadále je nutné zkoumat a studovat tavnou lázeň a růst krystalů.

V závěrečné části diplomové práce je porovnání s dosavadním nejběžněji používaným schématem krystalizace, popsán rozpor s našim naměřeným schématem krystalizace, a možnost jak tento rozpor odstranit.

5. Literatura.

1. Dončenko - Vlivání zepora v styke na rozměry poperečnove sečenija šva pri avtomatičeskoj svarke pod fljusem SP 1964 No 9
2. Movčan - Mikroskopičeskaja neodno - radnost v litych splavach Gosudarstvennoje izdatěl - stvo techničeskoj literatury - Kiev 1962
3. Belda - PRASKAVOST za tepla svaro - vého kovu. VŠST Liberec 1966 - KSM
4. Sterenbogen - O kristalizacii svaročnoj vany i osobennostech jeve rasčeta AS 1966 No 6
5. Prochorov - Mastrjukeva - Rasčet schemy kristalliza - cii metalla šva pri svarke plastin vstyk. SP 1962 No 6
6. Stejskal - Diplomová práce Liberec 1966
7. Mastrjukeva - Prochorov - Rasčet schemy kristalliza - cii pri svarke plastin vstyk. SP 1963 No 8
8. Prochorov - Mastrjukeva - Pjervičnaja struktura i ee značenijs pri ocenke pročnosti metalla šva AS 1965 No 8
9. Prochorov - Jakušin - Technologická pevnost kovov v procese kryštalizácie pri zvárání Zváračské zprávy 1967 č.5
10. Erechin - Kinetika metallurgičeskich processev dugovej svari. Mašinostrojénie, Moskva 1964
11. Wittke - Gesetzmässigkeiten der Pri - markristallization beim Schweißen. Schweisstechnik 16 1966 H.4 H.6

PŘÍLOHY.

6. Přílohy.

I: Základní řezy svarů.

II: vzorek čís. ARR4

III: vzorek " BRS1

IV: vzorek " CTT2

V: vzorek " ARS3

VI: vzorek " GRR3

VII: vzorek " BRR4

VIII: vzorek " CSR3

IX: vzorek " ARR2

X: vzorek " BRB1

XI: vzorek " CRS1

Výkres sestavy sklopného zařízení.