

INSTITUTTET FOR METALLÆRE

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

BYGNING 204 - 2800 LYNGBY

STØRKNING AF METALSMELTER

UNDER INDFLYDELSE AF MEKANISKE PÅVIRKNINGER.

E.W. Langer.

Størkning af metalsmelter
under indflydelse af mekaniske påvirkninger.

Det har i mange år været kendt, at når metalsmelter påvirkes af chok, vibrationer eller omrøring, sker der ændringer med hensyn til kornstørrelse, kornform og størkneforløb i forhold til upåvirkede smelter.

Imidlertid er det først i de seneste år, at man er nået frem til nogenlunde enighed om, hvad de iagttagne effekter skyldes, eftersom antallet af variable, der indgår, er stort, ligesom de enkelte parametres indflydelse er vanskelige at skille fra hinanden.

Den foreliggende oversigt er udarbejdet, fordi forfatteren i forbindelse med nogle orienterende eksperimenter for en del år siden fandt interesse for problemstillingen; fremstillingen er imidlertid baseret på oplysninger fra litteraturen.

Ved mekanisk påvirkning forstås i den foreliggende sammenhæng, hvor det aktuelle medium er en størknende metalsmelte: Frembringelse af relativ bevægelse mellem de enkelte volumenelementer i mediet. Denne bevægelse kan afstedkommes på adskillige måder, der for overskuelighedens skyld kan inddeles f.eks. som vist i tabel 1.

Tabel 1. Frembringelse af relativ bevægelse i smelter.

type	art	betegnelse
Mekanisk	periodisk	højfrekvent lavfrekvent
Magnetoelektrisk	ikke-periodisk	omrøring naturlig konvektion udhældning i form

Effekten af den relative bevægelse må, når vi betragter en krystal, der vokser ud i smelten, afhænge af såvel de i væsken som i krystallen optrædende accelerationer, der via massefylderne i de respektive volumenelementer af fast og flydende materiale er afgørende for de kræfter og dermed spændinger, der vil komme til at optræde i krystallen og for de trykvariationer, som vil opstå i væsken.

Det skal endvidere bemærkes, at bevægelseshastigheden i væsken kan blive så stor, at der optræder kavitation, det vil sige hulrum i væsken under indflydelse af stærkt nedsat tryk, og hvori der højst kan herske metallets eget damptryk ved den foreliggende temperatur. Når der i væsken findes betingelser, der fører til kavitation, er det en kendt sag, at hulrummenes sammenfald ved implosion sker så pludseligt, at f.eks. faste metalflader i havvand (skibspropeller) kan blive kraftigt angrebne ved, at der ligefrem rives metal ud af den faste overflade.

Karakteristiske eksempler på forsøgsomstændigheder, der har været anvendt ved eksperimentelle undersøgelser, er:

ultralyd:	ca. 20 kHz og ca. 1kW udgangsenergi
lavfrekvente svingninger:	15 -1500 Hz, 1/10- 1 mm amplitude, accelerationer på op til 10 g.
rotation af støbeform:	ca. 150-250 omdr./min., evt. reverseret f.eks. hver eller hver sjette omdr.

Iagttagne effekter.

Den iagttagelse, at kornstørrelsen i et størknet emne er mindre, når smelten under størkningen påvirkes af vibrationer, kan gøres umiddelbart og ved simple midler. Det er derimod

betydeligt vanskeligere at afgøre, hvorvidt vibrationerne har fremkaldt kimdannelsen, den såkaldte dynamiske kimdannelse, eller om de har haft effekt på grund af, at de har slået mindre stykker af allerede dannede krystaller, så at disse stykker hver for sig har virket som ophav til et nyt korn, den såkaldte krystalfragmentering.

Richards & Rostoker (4) undersøgte, hvorvidt vibrationsbehandling af Al- 4% Cu-smelter over smeltepunktet havde indflydelse på kornstørrelsen efter størkning. De fandt ingen forskel efter størkningen mellem en ubehandlet blok og det i helt flydende tilstand behandlede materiale, og konkluderer derfor, at kun behandling i det "grødagtige" stadium har effekt.

Dette synspunkt må modificeres noget, idet underafkølede væsker viser sig at kunne påvirkes af vibrationsbehandling.

Frawley & Childs (1) fremstillede meget rene Bi-smelter, (mp. $271,3^{\circ}\text{C}$), der var i stand til at underafkøles ca. 60° ved afkøling i ro. De sikrede sig, at en underkøling af lignende størrelse kunne opnås hver gang ved gentagne smeltninger og størkninger af den samme mængde Bi, stadig i ro. Derefter udsattes smelten for lavfrekvente vibrationer i et simpelt knastaksel-lignende apparat, hvor amplituden kunne varieres. Resultatet heraf var, at for amplituder større end 0,13 cm kunne den opnåelige underkøling kun komme op på ca. $9-10^{\circ}$ (størkningen fandt altså sted ved ca. 260°C .), medens mindre amplituder ingen ændringer gjorde i de tidligere målte $60-65^{\circ}$ underkøling, idet størkning skete ved ca. 210°C . Se fig. 1. Ved højere frekvenser, 2 og 20 kHz fandtes analoge forhold.

Forfatterne ser i disse resultater en bekræftelse af teorien om, at der først sker dynamisk kimdannelse i en underafkølet metalsmelte, når amplituden er så stor, at der indtræder kavitation. De forestiller sig, at der i forbindelse med

kavitationsfænomenet optræder negative tryk af størrelsen 20.000 atm.

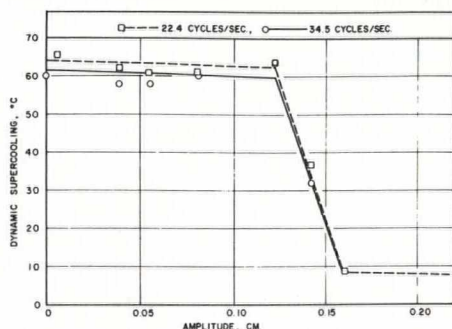


Fig. 1. Effekt af vibration på dynamisk kimdannelse i Bi. Statisk underkøling: 60-65°C. (1).

Southin (2) undersøgte kornforfining ved vibration under størkning af højrene smelter af Al, Bi, Cd, Pb, Sn og Zn i en digel ved 50 Hz. Under de forsøgsomstændigheder, hvor der blev iagttaget kornforfining, blev der fundet en central del af de størknede blokke, hvor kornene var ligeaksede i stedet for at være søjlekrystaller.

To forskellige kimdannelsesmekanismer på grund af vibrationerne foreslås, idet udformningen af størknefronten er afgørende for, hvilken af mekanismerne, der er overvejende. Når grænsefladen er dendritisk, har lavfrekvente, sinusformede svingninger kornforfinende effekt, fordi der da kan ske brud i de udragende dendritter; sker størkningen med plan størknefront eller med celler, skal vibrationerne være i stand til at fremkalde kavitation for at have nogen virkning. Dette kan tydeligt erkendes derved, at kun når der kan høres en metallisk, "kogende" lyd fra digelen og, når der samtidig observeres uregelmæssigheder i sinusformen af svingningerne

på et oscilloskop, sker der en kornforfining i det resulterende størknede materiale. Kun ved den kraftige kavitationspåvirkning er det muligt at løsrive materiale fra den plane eller næsten plane størknefront.

Et tydeligt eksempel herpå er vist i fig. 2. Her ses til venstre en zinkblok, størknet normalt og med veludviklede søjlekrystaller. Til højre er vist den vibrationspåvirkede prøve, hvor kavitation optrådte i de sidste 375 sek. af en total størkningstid på 680 sek. Det fremgår af billedet, at kun under kavitationsbetingelse sker der virkelig en kornforfining og en overgang fra søjlekrystaller til ekviaksede korn. Når der i andre prøver blev fremkaldt kavitation tidligere, blev laget af søjlekrystaller tyndere etc.

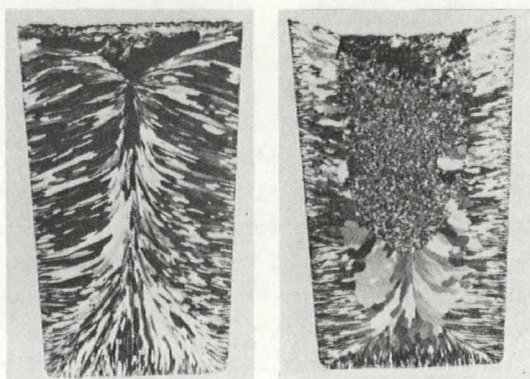


Fig. 2. Zn-blokke. T.v. størknet statisk, t.h. kavitation i den sidste del af størkneforløbet ved vibration med 5,6 g. (2).

Helt lignende resultater er opnået af Seemann & Buxmann (3), hvorfra fig. 3 stammer. Her ses tydeligt inde i midten af et ekviakset korn det oprindelige fragment.

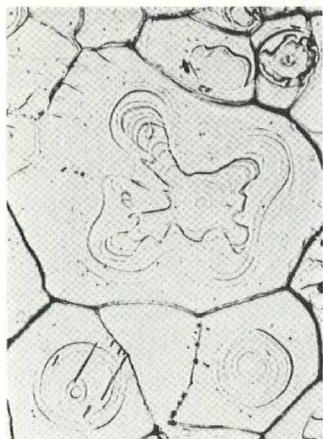


Fig. 3. Dendritfragmenter, der er vokset ud til ekviale korn.
Sn, Vilella-ætsning,
100 x. (3).

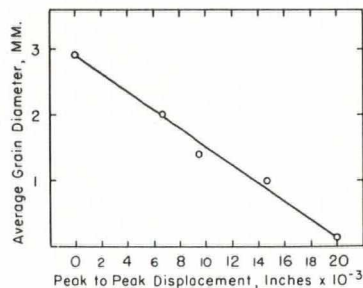


Fig. 4. Sammenhæng mellem kornstørrelse og vibrationsamplitude.
Al- 4% Cu, 60 Hz (4).

Richards & Rostoker (4) har gennemført en række eksperimenter for på systematisk måde at bestemme virkningen af amplitude, frekvens og støbetemperatur af en Al- 4% Cu-legering. Sammenhængen mellem kornstørrelse og amplitude er vist på fig. 4, på figurerne 5 og 6 er medtaget effekten af frekvensen. Det ses, at i området 60 - 1500 Hz er denne ringe, om overhovedet tilstede.

Støbetemperaturen har som bekendt en betydelig indflydelse ved rolig størkning, idet høj støbetemperatur medfører ringe underkøling og derfor grovkornethed. Vibrationsbehandling under afkølingen fra støbetemperaturen gennem størkneprocessen udviser fuldstændig dette billede, se fig. 7; alle vibrationsbehandlede er finkornede, og der kan i dem ikke iagttages dendritisk struktur.

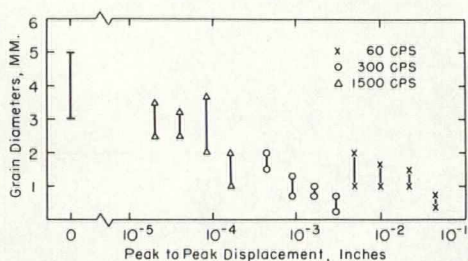


Fig. 5.
Sammenhæng mellem
kornstørrelse og
amplitude for for-
skellige frekvenser.
~~60 Hz~~ (4).

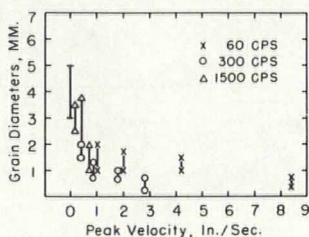


Fig. 6.
Sammenhæng mellem korn-
størrelse og max. hastighed
for forskellige frekvenser.
~~60 Hz~~ (4).

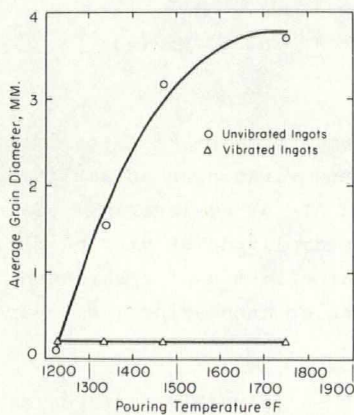


Fig. 7.
Kornstørrelsen i af-
hængighed af støbetempe-
ratur for statisk størk-
ning og med vibration
til 3,5 g, 60 Hz (4).

I diskussionen hælder Richards & Rostoker til fragmenterings-teorien som dækkende for deres eksperimentelle data; de mener på den anden side ved en tidligere lejlighed at have vist, at grafitten i gråt støbejern, der vibrationsbehandles under størkningen, bliver grovere, og viser som bevis herfor de i fig. 8 gengivne to mikrobilleder. De foreslår en hypotese,

der er baseret på trykinducerede ændringer af de termodynamiske egenskaber, som har betydning for kimdannelsen for at redegøre for forgrovnningen.

Dette citeres hos Bruce Chalmers (5), der ikke accepterer hypotesen, men nok forgrovnningen.

Imidlertid kan man ved at forestille sig de rumlige grafit-strukturer, der kan tilordnes de to viste mikrobilleder, let indse, at der til det venstre svarer et stærkt forgrenet krystalnetværk, sammenhængende i rummet, medens der til det højre, tilsyneladende grovere svarer isolerede, skrueformede krystaller. Der er således til højre langt flere enkelt-individer tilstede, netop som fragmenteringsteorien forlanger det.

Iagttagelserne, som Richards & Rostoker gjorde med hensyn til gråt støbejern, er altså i overensstemmelse med den teori, de fandt gyldige for Al-legeringen.

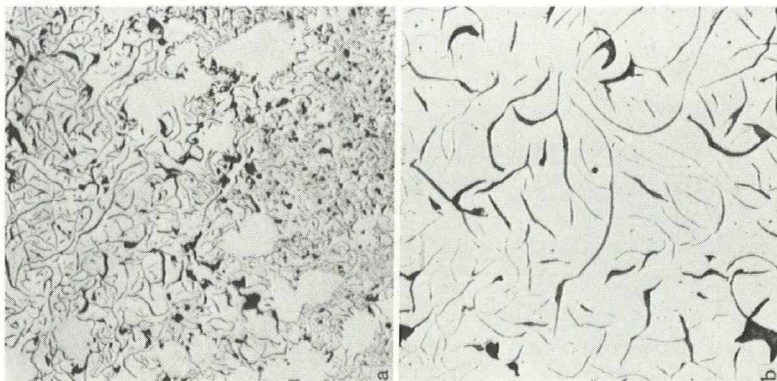


Fig. 8.

Udseendet af grafit i støbejern, t.v. statisk og t.h. vibreret (4).

At det for støbejerns vedkommende ikke alene er grafitten, der kan blive mere finkornet, ses af fig. 9. Her er antallet af eutektiske celler stærkt forøget, hvilket angiveligt har medført en 20% stigning i styrke af materialet, der er beregnet til støbte krumtapaksler (6).

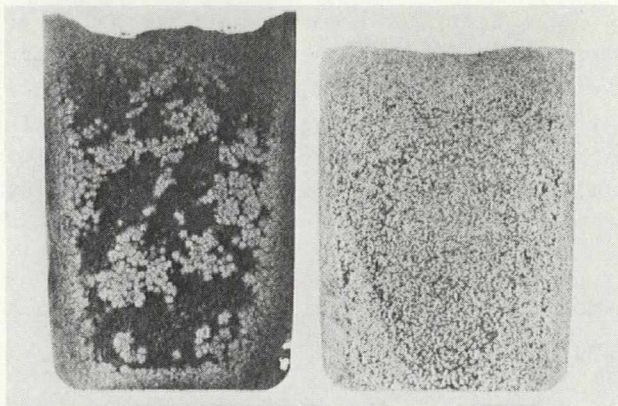


Fig. 9.

Statisk støbt støbejern t.v., t.h. oscilleret under størkningen. 125°C overhedning. (6).

Som nævnt indledningsvis har også rotation af et smeltebad eller i det hele taget blot turbulens i smelten en vis effekt.

Kondic (7) fandt, at ihældning af Al i en form havde samme forfinende virkning på kornstørrelsen som en reverseret rotation af den fyldte digel, medens størkning fandt sted. Derimod sås intet resultat af rotation med konstant omløbsretning.

Roth & Schippers (8) foretog omrøring i Al-smelter ad induktiv vej og konstaterede, som vist i fig. 10, at de søjlekrystaller, der dannedes fra den ydre formvæg, ikke længere voksede radialt, men var afbøjede, således at de pegede mod strømmen. I figuren er vist et udsnit af en cylindrisk blok, hvor omdrejningsretningen blev skiftet to gange. Det er bemærkelsesværdigt, at søjlekrystallerne fortsætter deres vækst med to knæk på; dette viser, at ændringerne af rotationsretningen må være sket stille og fredeligt og at størknings-hastigheden har været lille i forhold til rotationshastigheden, således at der formentlig kun har været tale om laminar strømning.

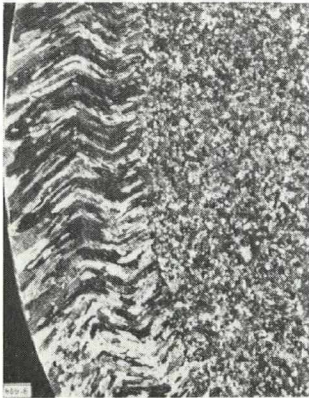


Fig. 10.

Tværsnit i Al-blok, der er roteret under størkningen, og hvor omdrejningsretningen er ændret to gange. 2,2x (8).

Det tilsyneladende paradoksale er nu, at rotation med konstant omdrejningsretning kan have en effekt, der ophæver virkningen af den naturlige konvektion. Normalt tages konvektionen ikke i betragtning ved overvejelser over væskens bevægelser og de deraf følgende konsekvenser med hensyn til varmeovergang, sejring, dendritvækst etc.

En jævn og regelmæssig rotation eller omrøring viser sig at have den virkning, at den fragmentering, der altid normalt fremkaldes af den naturlige konvektion, undertrykkes, så at søjle-

krySTALLISATIONEN bliver endnu mere udpræget og mængden af ekviakset materiale også falder. Se iøvrigt fig. 11 (9).

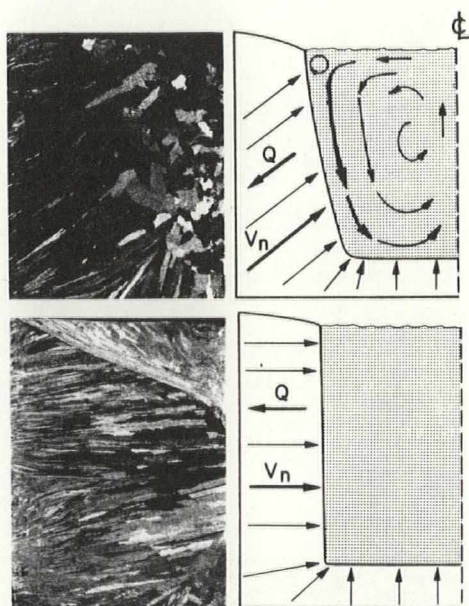


Fig. 11. Øverst: Naturlig konvektion, skrå søjlekrystaller og mod midten ekviaksede korn.

For neden: Konvektion elimineret ved induktiv omrøring; søjlekrystaller helt til centrum. (9).

En sammenligning mellem undertrykkelsen af den naturlige konvektion ved magnetisk henholdsvis rotationsstabilisering er vist i fig. 12. Den på ordinaten anførte kritiske betingelse for konvektion har relation til et karakteristisk, kritisk Reynold's tal, og det er i figuren vist, hvorledes økonomien er ved de to metoder til sammenligning. Rotation er så langt den billigste måde at fjerne konvektionen og derved at fremkalde en gennemgående søjlestruktur.

Som eksempel på, hvad der kan opnås ved strukturmanipulation ved programmer kombineret af rotation, oscillation og stilstand skal vises to støbte turbinehjul, der er støbt af samme smelte, men på forskellig måde, fig. 13. Det ses, at det ene (t.v.) har grovkornede blade og finkornet midte, medens det

andet (t.h.) har den omvendte kornstørrelsesfordeling (6).

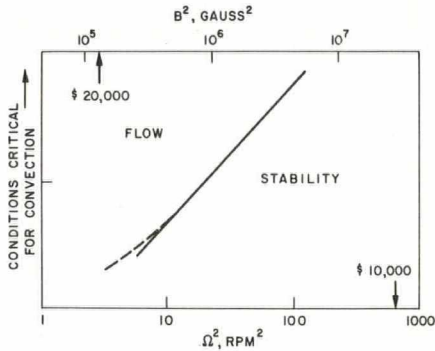
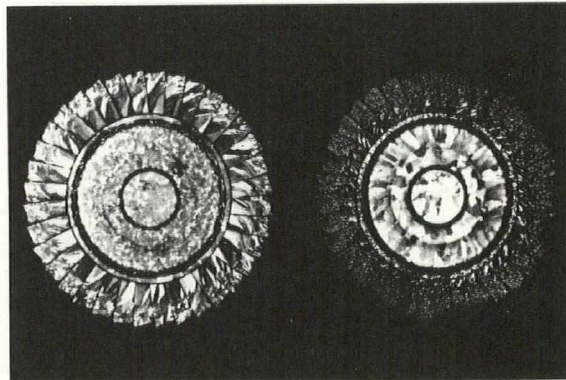


Fig. 12.

Stabilisering mod naturlig konvektion ved magnetisk eller mekanisk rotation. Det sidste er væsentlig billigere end det første. (6).

Fig. 13.

To turbinehjul støbt af samme smelte, men forskelligt behandlet m.h.t. rotation, reverseret rotation og stilstand. (6).



De eksempler, der indtil nu er blevet omtalt, har alle refereret til støbeprocessen.

Imidlertid synes det at være en naturlig sag at udnytte den opnåelige kornforfining og forøgelsen af den ekviaksede andel af det størknede materiale i forbindelse med svejsning. Dette har da også været forsøgt, en sammenstilling af undersøgel-

ser i forbindelse med svejsning af stål foreligger i (10).

Generelt angives vibrationspåvirkning af svejsninger at forfine kornstørrelsen, at forhindre dannelsen af varmrevner samt at forbedre de mekaniske egenskaber af svejsemetallet.

To metoder at overføre vibrationerne til smeltebadet er antydnet i fig. 14 og 15, for henholdsvis elektroslaggesvejsning og lysbuesvejsning. I fig. 14 overføres lydenergien via vandkølet kobberlydhoved, i fig. 15 benyttes en vibrerende tilsats-tråd. Det gælder om, at tråden føres ned i den koldeste del af smeltebadet, idet virkningen da er størst, iøvrigt bør afstanden fra transduceren til smeltebadet ikke overstige 5-6 cm.

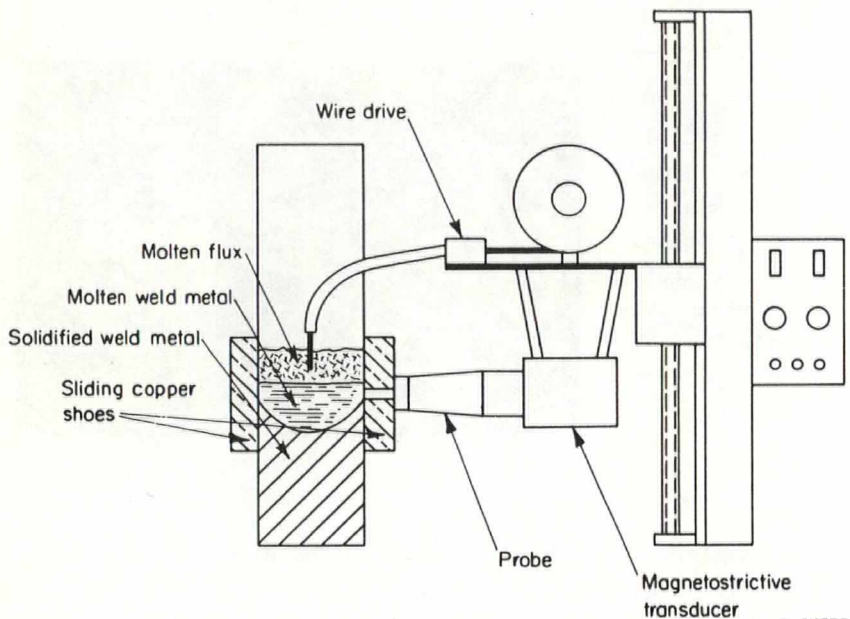


Fig. 14. Vibration af svejsemetal ved elektroslaggesvejsning.
(10).

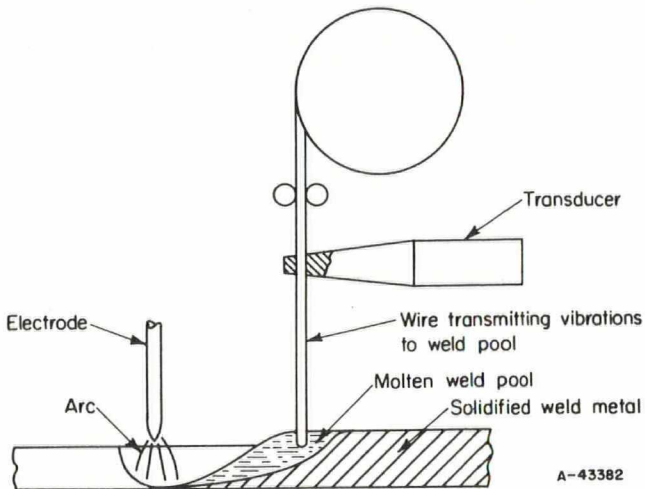


Fig. 15. Vibration af svejsemetal ved hjælp af en til-satstråd.

Hovedindtrykket af de undersøgelser af vibrationspåvirkning af svejsemetal, der er omtalt i ref. (10) er, at metoden på grund af kornforfiningen og de bedre mekaniske egenskaber synes lovende, men indebærer betydelige apparative problemer. Det vides, at frekvensen af vibrationerne ikke har betydning, både ultralyd og lavfrekvente svingninger kan anvendes. Naturligvis er det en beklagelig mangel ved metoden, at den ikke også er i stand til at frembringe en fin kornstørrelse i den ikke-opsmeltede, varmepåvirkede zone i grundmaterialet. Det væsentligste attraktive punkt synes at ligge i de muligheder, der er for ved hjælp af vibrationer at ændre søjle-

krystallisationen til ekviakset krystallisation, således at tendensen til dannelse af varmvrevner nedsættes eller helt elimineres.

Umiddelbart synes en undersøgelse af dette forhold påkrævet.

Det fremgår ikke med nogen særlig tydelighed af litteraturen, hvilken virkning vibrationer har i specielle størkningstilfælde, såsom ren eutektisk størkning til lamellar struktur eller ved størkningsforløb, som det kendes f.eks. fra type-metal og hvidtmetal, hvor en højeresmeltende fase udskilles i væsken i form af isolerede, ekviaksede krystaller. De tidligere refererede undersøgelser angår næsten alle rene metaller eller simple faste opløsninger, undtagelser er dog de beslægtede systemer: Støbejern og Al-Si-legeringer.

En effekt, som forfatteren har haft lejlighed til at iagttage i lejemetal på Pb-Sn-Sb-basis med lidt Cu, fremgår af følgende: Der dannes ved afkøling først nåleformede Cu-Sn krystaller, der derefter forhindrer de lidt senere dannede Sn-Sb-krystaller, der har mindre massefylde end væsken, i at stige til vejrs (tyngdesejring). Af hensyn til egenskaberne ønsker man, at Sn-Sb-krystallerne skal være jævnt fordelt over tværsnittet. En vibrationsbehandling slår tilsyneladende de lange Cu-Sn-krystaller i stykker, hvorefter Sn-Sb-krystallerne næsten alle stiger til vejrs og lægger sig i de øverste partier af metallet.

Her er således tale om en væsentligt mere kompliceret indvirkning på mikrostrukturen, end de tidligere nævnte eksempler. Uden tvivl kunne der fremdrages mange andre tilfælde, hvor en omhyggelig analyse af størkningsforløbet ville være gavnlig, især hvis man bevidst ønskede at manipulere med størknestrukturerne i teknisk målestok.

Litteratur.

- (1) J.J. Frawley &
W.J. Childs : Dynamic Nucleation of Supercooled
Metals. Trans. Met. Soc. AIME, 242
(1968) 256.
- (2) R.T. Southin : The Influence of Low-Frequency Vibra-
tion on the Nucleation of Solidifying
Metals.
J. Inst. Metals, 94 (1966) 401.
- (3) H.J. Seemann &
K. Buxmann : Quantitative Untersuchungen über Erstar-
rungsbeschallung von Zinn.
Metall, 26 (1972) 1.
- (4) R.S. Richards &
W. Rostoker : The Influence of Vibration on the Soli-
dification of an Aluminum Alloy.
Trans. ASM, 48 (1956) 884.
- (5) B. Chalmers : Principles of Solidification.
(1964) 280, John Wiley & Son.
- (6) G.F. Bolling : Manipulation of Structure and Proper-
ties.
Solidification, ASM (1971) 341.
- (7) V. Kondič : Macrostructure of cast Metals.
Acta Met. 6 (1958) 660.
- (8) W. Roth &
M. Schippers : Gusstextur von Al-blöcken.
Z. Metallkunde, 47 (1956) 78.
- (9) G.S. Cole : Transport Processes and Fluid Flow in
Solidification.
Solidification, ASM (1971) 201.
- (10) J.G. Kura &
H.W. Mishler : Literature Survey on the Effect of Sonic
and Ultrasonic Vibrations.
DMIC Memorandum 166 (1963).

Haustrup forsyner den danske levnedsmiddel- og drikkevareindustri med emballager



2/3 af Haustrups blikemballageproduktion er eksportemballage, der leveres til dansk kød-, bryggeri- og mælkekonservesindustri.

I 1973 eksporterede kødkonservesindustrien for 1,7 mia. kroner, mælkekonservesindustrien eksporterede for 0,4 mia. kroner, og bryggeriindustrien eksporterede dåseøl for 0,2 mia. kroner.

HAUSTRUP

A/S HAUSTRUPS FABRIKER · 5100 ODENSE
PLM i Danmark