

KUML

1964

KUML

ÅRBOG FOR JYSK ARKÆOLOGISK SELSKAB

1964

With Summaries in English

UNIVERSITETSFORLAGET I ÅRHUS

1965

Omslag:

Granatprydet brystsmykke fra Lousgård, Bornholm

Redaktion:

OLE KLINDT-JENSEN OG POUL KJÆRUM

Copyright 1965

by

Jysk Arkæologisk Selskab

Printed in Denmark

by

Aarhus Stiftsbogtrykkerie A/S

INDHOLD

<i>Peter Seeberg og H. H. Kristensen: Mange striber på kryds og tværs</i>	7
<i>Niels Thomsen: Myrthue, et gårdanlæg fra jernalder</i>	15
<i>Ebbe Lomborg: Myrthue-graven. Ældre romertids jordfæstegrave i Syd-vestjylland</i>	31
<i>Ole Klindt-Jensen: Befolkningsgrupper, fundhorisonter og stiltræk i sen jernalder</i>	52
<i>Robert Thomsen: Forsøg på rekonstruktion af fortidige smedeprocesser . .</i>	62
<i>Geoffrey Bibby: Arabiens arkæologi</i>	86
<i>Holger Kapel: Stenalderfund fra Qatar</i>	112
<i>Jysk Arkæologisk Selskab</i>	156

CONTENTS

<i>Peter Seeberg og H. H. Kristensen: Many criss-cross furrows</i>	14
<i>Niels Thomsen: Myrthue—an Iron-Age farm complex</i>	29
<i>Ebbe Lomborg: The Myrthue grave—an Early Roman Period inhumation in southwest Jutland</i>	48
<i>Ole Klindt-Jensen: Population groups, association-levels of finds, and tendencies of style in the Late Iron Age</i>	59
<i>Robert Thomsen: Attempt at reconstruction of prehistoric forging processes</i>	81
<i>Geoffrey Bibby: Arabian Gulf archeology</i>	101
<i>Holger Kapel: Stone Age discoveries in Qatar</i>	148

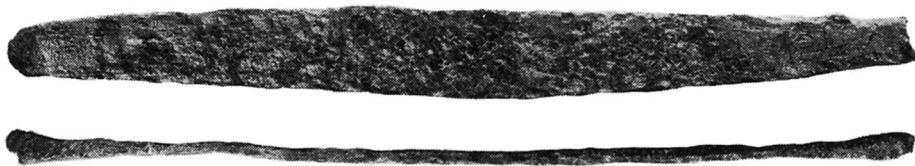


Fig. 1. Jernbarre 3 fra Hedeby, øverst fra fladen, nederst fra siden.
Iron bar no. 3 from Hedeby, from above (top) and from the side (bottom).

FORSØG PÅ REKONSTRUKTION AF FORTIDIGE SMEDEPROCESSER

AF ROBERT THOMSEN

Kemiske analyser og mikroskopiske undersøgelser af fortidens jernredskaber kan give meget værdifulde oplysninger om de metoder, der har været anvendt ved redskabernes fremstilling. Der er foretaget mange undersøgelser af den art [1, 2, 3, 4].

Mere sikre oplysninger får man, hvis man supplerer disse undersøgelser med forsøg på at efterligne de fremgangsmåder, som de kemiske og metallografiske undersøgelser peger hen imod. Processer, som man ville anse for let gennemførlige, fordi tilsvarende metoder har været anvendt i vor tid, byder på betydelige vanskeligheder. Det skyldes først og fremmest fortidsjernet store indhold af slagge og fosfor. Det er derfor nødvendigt at anvende jern af »jernalderkvalitet« ved forsøgene. På den anden side kan man også få nye ideer og finde frem til simple og enklere metoder under rekonstruktionsforsøgene.

Oftentimes kan de strukturformer, man finder ved mikroskoperingen, være opstået på flere forskellige måder. Ved at gennemprøve alle de fremgangsmåder, man kan forestille sig, finder man frem til den, der må anses for mest sandsynlig. Hermed er der ikke ført bevis for, at netop denne proces har været anvendt, men blot at det har været muligt for fortidens smed at gennemføre processen med de hjælpemidler og med den jernkvalitet, der har stået til hans rådighed. Undersøgelsernes resultater må derfor vurderes med et vist forbehold.

De jernstykker, der har dannet grundlaget for undersøgelserne, er venligst stillet til rådighed af Landesamt für Vor- und Frühgeschichte von Schleswig-Holstein.

Som råmateriale ved rekonstruktionsforsøgene er anvendt små jernstykker fra forsøg med jernudvinding på *Varde Staalværk* [5].

Beskrivelse af jernstykkerne fra Hedeby

Jernstykkernes udseende fremgår af fotografiet fig. 1 og af skitserne fig. 2 og fig. 3. De hører alle til et depot på ca. 20 jernbarrer, der blev fundet i Hedeby i foråret 1964.

Den største af stængerne, i det følgende betegnet som barre nr. 3, der er vist på fig. 1, er 450 mm lang, 45 mm bred og ca. 6 mm tyk på det flade midterparti. Mod enderne udvider den sig kileformet til en tykkelse af ca. 15 mm. Den vejer 620 g, medens de to små stykker (nr. 1 og 2), der øjensynligt er afbrækkede endestykker af en stor jernbarre, vejer henholdsvis 67 g og 58 g.

Barre nr. 3 blev gennemsavet på langs. Snitfladerne blev polerede af hensyn til den metallografiske undersøgelse. Den ene kant på barre nr. 1 og 2 blev planslebet og ligeledes poleret. Der blev endelig lagt snit vinkelret på disse første snitflader. Efter en ætsning med 2 % salpetersyre kunne jernstykernes strukturer kortlægges. Strukturformerne blev aftegnet på et stykke genemsigtigt papir lagt over mikroskopets matglasplade, hvorpå billedet blev projiceret med 5 gange forstørrelse. En del af skitserne er senere tegnet om til et andet målestoksforhold.

Undersøgelserne viste, at alle stængerne var sammensvejet af mange småstykker, hvoraf nogle har vejet mindre end 10 g.

Svejsesømmene kan deles i fire typer

- 1) Den ideelle svejsesøm, der kun kan konstateres, hvis den adskiller to vidt forskellige strukturer.
- 2) Den næsten ideelle svejsesøm, der viser sig som en tynd linie. Fig. 4.
- 3) Svejsesøm med slagge eller glødeskal. Fig. 5.
- 4) Svejsesøm med trækul. Fig. 6.

Foruden de normale mikrostrukturer, ferrit og perlit, indeholder jernet store mængder ikke-metalliske indeslutninger, der endog kan ses med det blotte øje på de polerede og ætsede flader. Slaggernes karakteristiske form ses på fig. 7 og fig. 8.

Langt den overvejende del af jernet består af ferrit, og kun de kileformede endestykker indeholder perlit. Fig. 9 viser en ren ferritstruktur.

Øverst til venstre på fig. 2 ses et område af ferrit-perlitstruktur med en brat overgang til næsten ren ferritstruktur. Her har der fundet en sammensvejsning sted. Svejsstedet er mærket a-a på skitsen, og mikrofotografiet fig. 8 viser ferrit-perlitstrukturen i øverste venstre hjørne.

Svejsstedet b-b er af den type, der er nævnt ovenfor under punkt 4. På hver side af svejsesømmen er der et perlitområde med højt kulstofindhold. På flere steder er sammensvejsningen ikke lykkedes. Her findes revner med en sort substans, der må være det kulstof, der har forårsaget opkulingen (Fig. 6). Uden for denne kulstofrige zone, der på sine steder er 1 mm bred, er strukturen rent ferritisk. Sådanne opkullede svejseområder findes flere steder og ses tydeligt på snitfladen af det jernstykke, der er vist på fig. 3.

Tre områder mærket c på fig. 2 har yderst til højre et tyndt ferritlag og derefter en perlitstribе. Resten er ren kulstoffrit ferrit. (Fig. 10). Disse tre områder har øjensynligt hørt sammen til en lang perlitstribе, før rustangrebet satte ind.

På snitfladen fig. 2 ses det, at de kulstofrige områder kun findes ved overfladen. Ejendommelig er en partikel med højt kulstofindhold ved d (fig. 11).

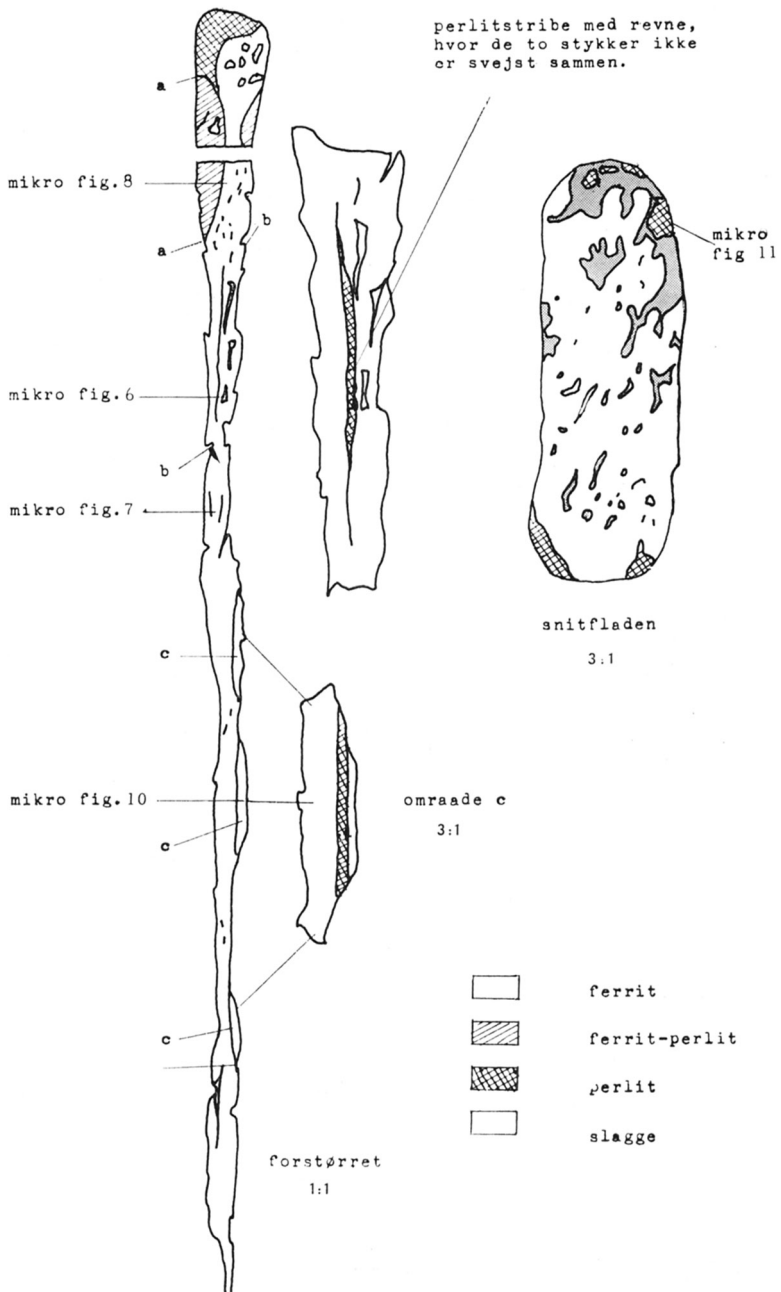


Fig. 2. Endestykke af jernbarre 1. Henholdsvis 1:1 og 3:1.
End of iron bar no. 1. 1:1 and 3:1 respectively.

Partiklen er helt omgivet af slagge eller glødeskal og kan ses med det blotte øje på den polerede og ætsede overflade. Der findes flere steder ved overfladen tilsvarende perlitområder, der ikke er omgivet af glødeskal.

På fig. 3 ses en påsvejset klump med ferrit-perlitstruktur ved e-e. Den svarer i form og størrelse til a-a på fig. 2. Foruden de strukturer, der allerede er nævnt under omtalen af fig. 2, finder man her enkelte perlitøer i en kulstoffri ferritisk grundmasse. En sådan perlitø ses på fig. 12.

Endestykkerne af barre 3 har ganske samme strukturer som de små stykker. En del svejseømme ses tydeligt på fig. 13, hvor den ætsede overflade er vist i $2\frac{1}{2}$ gange forstørrelse. Hele det ca. 300 mm lange midterparti består udelukkende af ferrit. I midten af hele dette stykke er der en slaggefyldt revne, der nogle steder kan ses på snitfladen, og som kan ses på alle tværsnit (fig. 14 og 15). Det er fristende at forestille sig denne revne som en delvis mislykket svejsning, men det har ikke været muligt at finde nogen af de foran nævnte svejsestrukturer i nærheden af revnen. Heller ikke i længderetningen kan man med sikkerhed fastslå, om der har været svejsninger.

Barren blev røntgengraferet, uden at man derved kunne konstatere fejl eller svejsesteder, der ikke allerede var fundet ved de hidtil anvendte metoder. Når røntgenograferingen ikke kan optegne fejlene, skyldes det, at overfladens ujævnheder er meget store i forhold til de indre småfejl og derfor maskeerer disse.

Der er dog noget, der tyder på, at midterstykket er svejset sammen af flere stykker. Der blev derfor foretaget fosforbestemmelser med 50 mm afstand langs stangens kant, og disse analyser synes at bekræfte denne antagelse. Re-

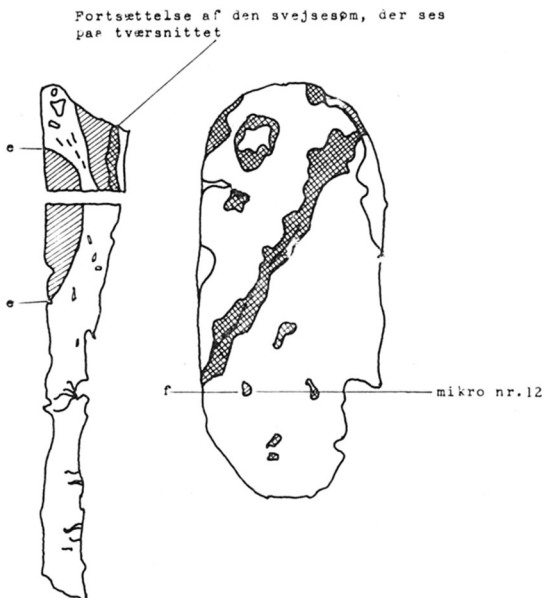
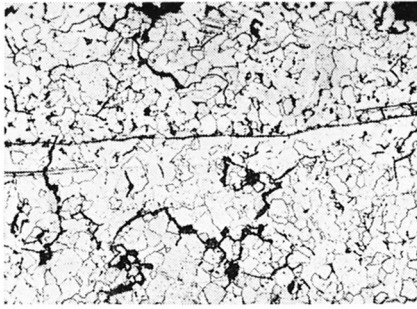


Fig. 3. Endestykke af jernbarre 2. Henholdsvis 1:1 og 5:2. Signaturer som fig. 2.

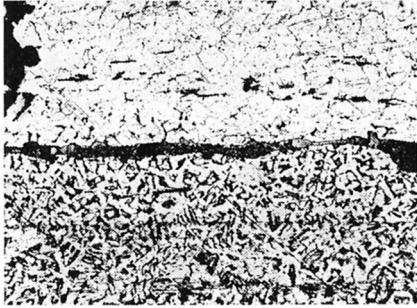
End of iron bar no. 2. 1:1 and 5:2 respectively. Conventional signs as in Fig. 2.



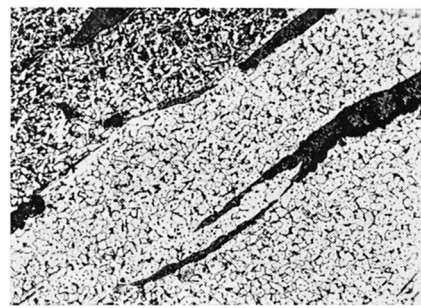
4



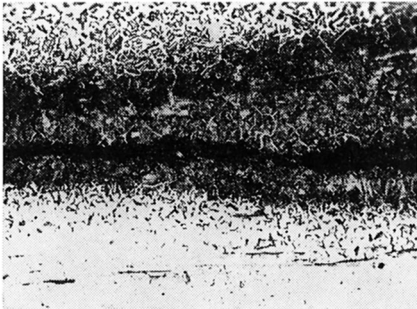
7



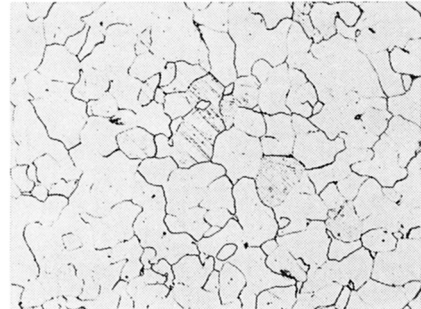
5



8



6



9

Fig. 4. Næsten ideel svejsesøm. 50:1.

Almost ideal welded seam. 50:1.

Fig. 5. Svejsesøm med slagge. 50:1.

Welded seam containing slag. 50:1.

Fig. 6. Svejsesøm med trækul og opkullede zoner. 50:1.

Welded seam containing charcoal and carburized zones. 50:1.

Fig. 7. Ferrit med langstrakte udsmedede slagger. 30:1.

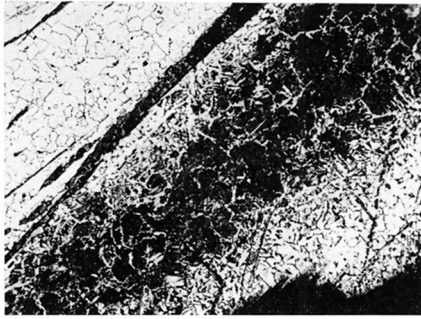
Ferrite containing drawn-out swaged slag. 30:1.

Fig. 8. Overgang mellem ferrit-perlitstrukturer (øverste venstre hjørne) og ren ferrit. 30:1.

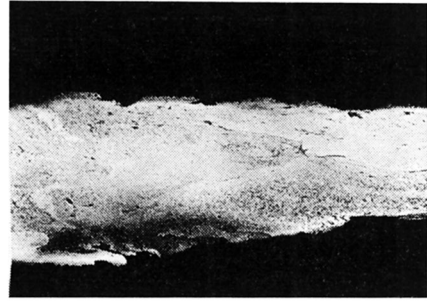
Transition between ferrite and perlite structure (upper left-hand corner) and pure ferrite. 30:1.

Fig. 9. Ren ferrit. 100:1.

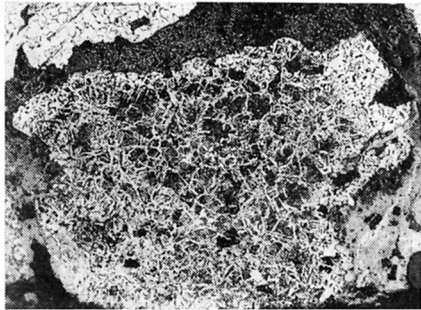
Pure ferrite. 100:1.



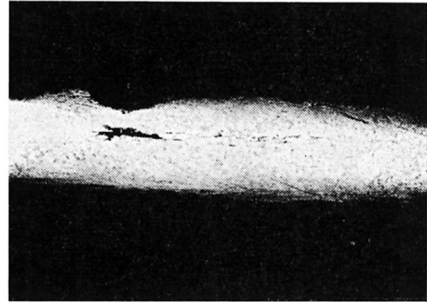
10



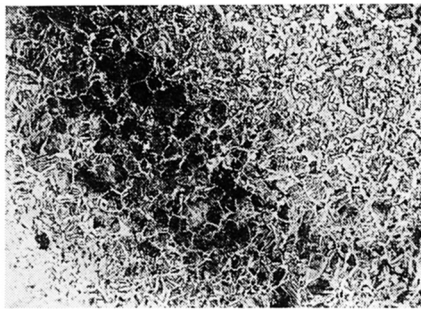
13



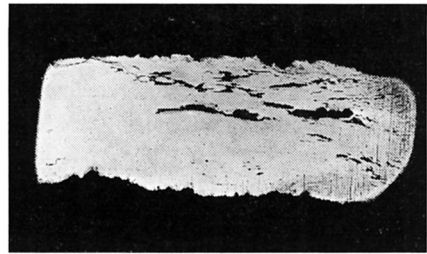
11



14



12



15

Fig. 10. Opkullet zone adskilt fra overfladen ved et tyndt ferritlag. 30:1.

Carburized zone separated from surface by a thin ferrite layer. 30:1.

Fig. 11. Partikel med perlitstruktur. 30:1.

Particle with perlite structure. 30:1.

Fig. 12. Perlitø i ferriten. 30:1.

"Island" of perlite surrounded by ferrite. 30:1.

Fig. 13. Jernbarre 3. Billedet viser en kile svejset ind mellem to pladeformede jernstykker. 5:2.

Iron bar no. 3. The illustration shows a wedge welded between two flat pieces of iron. 5:2.

Fig. 14. Slaggefyldt revne på langs af jernbarre 3's ferritiske mellemstykke. 5:2.

A crack, full of slag, running the length of the ferrite middle portion of iron bar no. 3. 5:2.

Fig. 15. Snit vinkelret på fig. 14.

Section at right-angles to Fig. 14.

sultaterne er angivet nedenfor. Prøve nr. 1 er udtaget i det kulstoffoldige endestykke, medens resten af analyserne stammer fra det ferritiske mellemstykke.

prøve nr. 1	0,086 % P
prøve nr. 2	0,018 % P
prøve nr. 3	0,034 % P
prøve nr. 4	0,012 % P
prøve nr. 5	0,078 % P
prøve nr. 6	0,044 % P
prøve nr. 7	0,018 % P
prøve nr. 8	0,016 % P

Med så store variationer i fosforindhold skulle det være let at finde de enkelte stykker ved ætsning med Oberhoffers reagens, der ætser fosforfattige områder mørkt, men lader fosforrige områder stå blankt. Ætsningen skiller ikke stangen i enkeltstykker, men viser en lamellar fordeling af fosforrige og fosforfattige områder, en fordeling, der ikke har nogen forbindelse med svejsestederne. Fosforbestemmelserne er således afhængige af det sted, hvor boret har ramt under udboringen af analysespånerne. (Fig. 16).

Jernbarrerens kemiske sammensætning fremgår i øvrigt af nedenstående tabel:

	C	Si	Mn	P	S
Løst endestykke, nr. 1	0,19	0,05	<0,01	0,050	0,017
Løst endestykke, nr. 2	0,15	0,38	<0,01	0,068	0,019
Endestykke af store barre, nr. 3	0,37	0,04	<0,01	0,086	0,007
Midterstykke af store barre, nr. 3	0,02	0,10	<0,01	0,078	0,012

Kulstoffindholdet er, som man kunne forvente, meget forskelligt og afhænger af det sted, hvor boret har ramt under udboringen af analysespånerne. Dette gælder dog ikke for den ferritiske del af barre nr. 3, hvor de metallografiske undersøgelser har vist, at der praktisk talt ikke findes kulstof. Heller ikke siliciumbestemmelserne må tillægges for stor betydning, idet man kan gå ud fra, at den overvejende del af dette stof stammer fra slaggeindeslutningerne. Det meget lave indhold af svovl skyldes, at jernet er fremstillet med trækul, der i sammenligning med stenkul indeholder meget ringe svovlmængder. Mest interessant er fosforindholdet, der ganske vist er højt i forhold til moderne jerns fosforindhold, men kun udgør en tiendedel af den fosformængde, man får ved fremstilling af jern ud fra myremalm. Man har tidligere ved Hedeby fundet søm med et tilsvarende fosforindhold (7), og O. Arrhenius (6), fastslår, at sådant jern kun kan være fremstillet af bjergmalm. 32 % af de mere end 300 svenske jerngenstande fra alle perioder af jernalderen, som Arrhenius har analyseret, indeholdt mindre end 0,1 % P. Det er således tænkeligt, at jernet er importeret fra Sverige. I Siegerland har man fundet spor efter ovne, der har været anvendt til jernfremstilling af bjergmalm, og Gilles (8) har påvist, at man kan fremstille jern af bjergmalm i sådanne ovne.

Den kemiske analyse viser således ikke, hvor jernet er fremstillet, men blot at det ikke kan være fremstillet af den lokale myremalm.

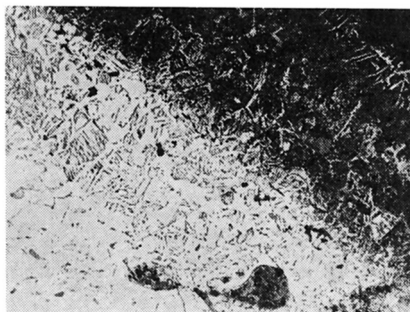
Fig. 16. Ætset med Oberhoffers reagens. Fosforfattige områder ætzes mørkt. 5:2.

Sample treated with Oberhoffer's reagent. Areas poor in phosphorus are etched dark. 5:2.



Fig. 17. Opkullet zone efter 15 min. på 1150° C. 30:1.

Carburized zone after 15 mins. at 1150° C. 30:1.



De kemiske og metallografiske undersøgelser kan resumeres i følgende: Jernbarrerne, der blev fundet ved Hedeby, er ca. en halv meter lange og vejer ca. 600 g. De består af et blødt kulstoffrit mellemstykke og kulstoffoldige hårdere endestykker, der er svejset sammen af mange små stykker. Stykkerne er dateret til tidlig middelalder eller vikingetid og kan ikke være fremstillet af den lokale myremalm.

Laboratorieforsøg udført til belysning af fremgangsmåden ved sammensvejsning af småstykker af jern

Som forsøgsmateriale blev anvendt små jernstykker fra forsøg med jernudvinding af myremalm.

Det fremgår af undersøgelserne, at de opkullede områder ikke er fremkommet ved selve jernudvindingsprocessen, men er opstået under den senere udsmedning og sammensvejsning.

Overfladeopkuling af blødt stål anvendes i stor udstrækning i vore dage til formål, hvor man ønsker en blød og sej kerne med en hård overflade. Denne såkaldte indsætningshærdning foregår på den måde, at blødt stål opvarmes sammen med kul til ca. 900° C. Det opkullede lag er som regel mindre end 1 mm tykt, og lagets tykkelse afhænger af temperaturen og den tid, jernet har været opvarmet sammen med kullet.

På de steder, hvor der er revne i Hedeby-jernet og samtidig et overskud af kul, er det opkullede lag tykke, nemlig ca. 1 mm. Hvis man kender den temperatur, ved hvilken opkulingsprocessen har fundet sted, kan man ved forsøg bestemme opkulingstiden.

Forsøgene blev udført i en elektrisk opvarmet laboratorieovn. Temperaturen blev valgt til 1150° C, eftersom essesvejsning i hvert fald ikke kan udføres ved lavere temperaturer.

Forsøg nr. 1: Tre jernstykker blev nedpakket i digler sammen med trækulspulver. Diglerne blev opvarmet til 1150° C i løbet af tre timer. Et jernstykke blev udtaget 15 minutter efter, at denne temperatur var nået, det næste efter 75 minutter på temperatur, og endelig blev det sidste stykke udtaget efter 105 minutters forløb. Opkulingsdybderne var henholdsvis 0,6 mm, 1,4 mm og 2 mm. Mikrostrukturen af den prøve, der er opkullet 0,6 mm, ses på fig. 17. Jernets overflade er ved den mørke trekant i billedets øverste højre hjørne.

Som et senere forsøg skal vise, skal svejsetemperaturen være betydeligt højere. Fortidsjernet kan derfor kun have været opvarmet til svejsetemperatur i få minutter, før man har opnået en 1 mm tyk opkulingszone. Man kan ikke se bort fra muligheden af, at området med det høje kulstofindhold oprindeligt har været mere end 1 mm tykt og er blevet smedet ned til denne tykkelse.

Forsøg nr. 2: Et af stykkerne fra ovennævnte forsøg blev smedet ned til en tiendedel af sin oprindelige tykkelse. Det viste sig, at det kulstofholdige hårde perlitlag kun i ringe grad deformeres ved smedningen, og i stedet sprænges for at give plads for den bløde og seje ferrit.

Som tidligere omtalt findes der flere steder på overfladen af jernbarrerne perlit-områder, der kan fortolkes som fastsvejsede partikler af stål med højt kulstofindhold. Man kunne også forestille sig, at disse perlitspidser var fremkommet på steder, hvor glødeskallen har været tynd eller har manglet, og hvor opkulingsprocessen derfor er skredet hurtigere frem.

Forsøg nr. 3: Glødeskallen på hvert af de tre jernstykker blev fjernet i tre striber ved hjælp af en nedstrygerklinge før opkulingsforsøget. Opkulingsdybden var ikke større ud for disse partier af blankt jern, og der kunne ikke findes strukturer, der mindede om perlitspidserne.

For at få en rettesnor med hensyn til svejsetemperaturen for opkullet jern blev der udført følgende:

Forsøg nr. 4: To stykker i forvejen udsmedet jern blev rensed på overfladerne og anbragt i en digel. Mellem stykkerne blev der anbragt et tyndt lag trækul. Efter opvarmning til 1150° C klæbede de to stykker sammen, men temperaturen var for lav til, at en sammensvejsning kunne udføres.

Forsøg nr. 5: Seks småstykker af slaggeholdigt jern, der ikke tidligere havde været smedet, blev opvarmet til 1150° C. Stykkerne var helt omgivet af trækulspulver. Efter en time på temperatur var stykkerne sintret sammen til en klump. Der var løbet så meget slagge fra, at jernet må have indeholdt mere end 50 % slagge. Den resulterende jernklump fra dette forsøg blev opvarmet til 1250° C i en smedeesse. Her blev det æltet og klemt med smedetænger for at få fjernet mere slagge, og endelig blev det smedet ud til en tynd stang af næsten slaggefrit jern.

Størstedelen af jernet fra vore jernudvindingsforsøg findes i form af svampejern, der mest af alt minder om pimpsten. Man kunne forvente, at sådanne stykker af jernsvamp ved opvarmning med trækul og efterfølgende sammen-

svejsning ville danne perlitstrukturer, eftersom de enkelte cellers vægtykkelse er mindre end den opkulingsdybde på 1 mm, som man normalt kan opnå ved kort tids opvarmning til svejsetemperatur.

Forsøg nr. 6: Et stykke svampejern, hvori der allerede fra jernudvindingsprocessen fandtes indlejret små trækulstykker, blev opvarmet til 1150° C i laboratorieovnen. Også dette stykke jern viste sig at indeholde betydelige slaggemængder. Jernet kunne ikke svejses ved 1150° C, men blev senere smedet sammen efter opvarmning til 1250° C i smedeessen. Strukturen var ikke den ventede perlitstruktur, men ferrit med enkelte perlitøer ganske svarende til strukturen på fig. 12.

Fortolkning af undersøgelserne og forsøg på at efterligne de formodede smede- og svejseprocesser

Jernstykker, der vejer mere end 50 g, er lette at smede, når man blot holder smedetemperaturen tilstrækkeligt høj. Når det meste af slaggen er banket ud, er det endog lettere at smede end moderne handelsjern (5). Stykker af denne størrelse lader sig essesvejses sammen til større stykker.

Vanskelighederne ved essesvejsning og ved smedning af småstykker er følgende:

- 1) Stykkerne forsvinder blandt essens kul.
- 2) Stykkerne forbrænder let på grund af den store svampede overflade.
- 3) Stykker, opvarmet til svejsetemperatur, bliver kolde, før de når ud på ambolten.
- 4) Det er vanskeligt at fjerne glødeskallen.
- 5) De indesluttede slagger trænger ud og forhindrer metallisk kontakt mellem jernstykkerne.

Problemet nævnt under punkt 3) kan løses på den måde, at et lille jernstykke påsvejses et stort. En sådan fremgangsmåde ville falde naturlig, eftersom der under smedningen ofte falder små jernstykker af. Disse småstykker kunne man så påsvejses til sidst. Denne metode, hvor man udnytter det store jernstykkets varmekapacitet, har været udnyttet i den japanske Shinto-smedie.

Forsøg nr. 7: I det store jernstykke blev der smedet en fordybning, hvori det lille stykke kunne ligge, og således ikke forsvandt i essen. Sammensvejsningen forløb glat, og resultatet så ud som de to områder i øverste venstre hjørne af fig. 2 og fig. 3 bortset fra, at den påsvejsede klump var kulstoffrit jern.

Det er tænkeligt, at de to jernstykker ved a-a og e-e netop er påsvejsede på denne måde. En lignende fremgangsmåde har været taget i brug ved den svejse-søm fra barre 3, der er vist på fig. 13. Her er en lille kile af jern smedet ind i en gaffel dannet af to andre jernstykker. En sådan svejseteknik kan man se afbildet i smedehåndbøger fra vort århundrede.

Nogle af de kulstofholdige strukturer som f. eks. perlitøerne kan, som tidligere omtalt, stamme fra jernsvamp opvarmet med trækul. Perlitspidserne og den partikel, der ses på fig. 11, kan have en lignende oprindelse. Det er dog

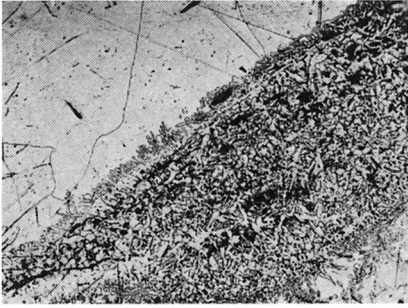


Fig. 18. Forsøg på sammensvejsning af to stykker jern med trækul imellem. 30:1.

Experimental welding together of two pieces of iron with charcoal between. 30:1.

også muligt, at de sidstnævnte stammer fra et bevidst forsøg på at svejse hårde stålpartikler fast på overfladen.

Perlitstriberne ved c-c på fig. 2 har utvivlsomt hørt sammen. De er blevet skilt enten ved korrosion eller ved sprængning under smedningen. De kan høre til en opkullet svejsesøm, men det er også muligt, at de hører til en opkullet overfladezone. Hvis de har hørt til en sådan opkullet zone, må det ferritlag, der findes helt ude ved overfladen, være fremkommet ved en senere afkulning. Ved opvarmning af stål i oxyderende atmosfære får man et afkullet lag af betydelig tykkelse.

Forsøg nr. 8: Det jernstykke, der var blevet opkullet i 75 minutter i laboratorieovnen, blev tre gange opvarmet til 1250°C i smedeessen. Efter hver opvarmning blev det overhamret med små lette slag, som man gør det ved essesvejsning. Herved blev stykket smedet ned til halv tykkelse. Ved undersøgelse i laboratoriet blev det konstateret, at der ikke havde fundet nogen afkulning sted. Årsagen hertil kunne være, at der hele tiden bankes slagge ud af jernet, og at denne slagge beskytter jernets overflade mod oxydation. Stykket blev smedet endnu tre gange ved svejsevarme, så dets tykkelse kun var en tiendedel af den oprindelige, men der kunne stadig ikke findes afkullede partier ved mikroskoperingen.

De sammenføjninger, hvor der findes en zone med højt kulstofindhold i selve svejsestedet, må være fremkommet på den måde, at to stykker jern er svejset sammen med et lag trækul eller et eller andet organisk stof imellem. Man kan tænke sig følgende grunde til en sådan tilsætning af trækul:

- 1) Den nødvendige svejsetemperatur er lavere for stål med højt kulstofindhold end for kulstoffrit jern.
- 2) Kulstoffet forhindrer glødeskalsdannelse. Glødeskallen, der hindrer metallisk kontakt mellem de to jernstykker, udgør en af de største vanskeligheder ved svejsningen.
- 3) Kulstoffet har været tilsat for at omdanne jernet til stål.

At sådanne opkulingsprocesser har været kendt allerede i ældre jernalder, fremgår af fund af knive, hvor ægkanten har været opkullet, medens bagkanten består af rent kulstoffrit jern (1).

Forsøg nr. 9: To jernstykker blev forsøgt svejset sammen med et lag trækul imellem. Forsøgets udfald synes at eliminere mulighed nr. 1. Trækullet drysler ud mellem jernstykkerne, og når det endelig lykkes at holde kullet på plads så længe, at kulstoffet kan blive opløst i jernet, viser det sig at være betydeligt vanskeligere at svejse opkullet end kulstoffrit jern. Jernstykkernes overflader virker slimede og glider mod hinanden selv ved nedsat svejsetemperatur. Det lykkedes dog at få de to stykker til at hænge sammen. Det fremgår af fig. 18, at der har fundet en opkulning sted, selv om kulstofindholdet er lavere end i de fortidige svejseømme.

Foruden den tidligere omtalte metode, hvor man svejser et lille jernstykke på et stort, kan man tænke sig de på side 71 omtalte vanskeligheder ved sammensvejsning af småstykker undgået eller formindsket på to måder:

- 1) Paketsvejsning af tynde plader.
- 2) Sammensvejsning i digel.

Det er sandsynligt, at begge metoder har været anvendt.

Ved at hamre jernet ud i tynde plader opnår man, at slaggen fjernes fra jernet, og at de lange stykker ikke så let forsvinder i essen. Flere pladeformede stykker kan samles i en pakke (heraf navnet paketsvejsning, der anvendtes for sammensvejsning af pudeljern). Herved mindsker man også risikoen for glødeskalsdannelse og forbrænding. Endelig opnår man en så stor masse, at jernet kan holde svejsetemperaturen i et rimeligt tidsrum. Det, at Hedeby-jernet indeholder mindre slagge end det jern, vi har fremstillet, tyder på, at i hvert fald barre 1, der er vist på fig. 2, er fremstillet ved paketsvejsning. Slaggen kan jo lettest fjernes ved udhamring, og jo tyndere jernstykket bliver, desto lettere har slaggen ved at finde frem til overfladen.

Forsøg nr. 10: Som råmateriale for paketsvejsforsøgene blev anvendt jernstykker fra de forsøg med digelsvejsning, der skal omtales senere. Stykkerne blev smedet ned fra 8 mm til 1–2 mm tykkelse. Overfladerne blev rensed for glødeskal, og jernpladerne blev pakket som vist på fig. 19. Der blev anbragt lidt trækulpulver mellem de enkelte plader for at gøre endnu et forsøg på at fremkalde opkullede zoner ved svejsestederne. Paketten blev varmet langsomt op i essen. Det er nødvendigt at varme langsomt for at få de enkelte lag på svejsetemperatur samtidigt. Varmen ledes dårligt gennem overfladerne. Essekullene var i forvejen brændt til koks for at fjerne svovl, der ville kunne ødelægge forsøgene.

Efter flere opvarmninger og overhamringer var pakken svejset sammen til



Fig. 19. Paketsvejsning. Skitsen viser pakken før og efter sammensvejsningen.
Packet welding. The sketch shows the packet before and after welding.

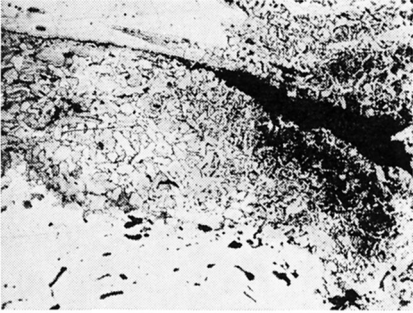


Fig. 20. Paketsvejsning. Opkullet område, hvor den yderste flig er påsvejset (samme struktur som fig. 6). 30:1.

Packet welding. Carburized area where the outermost layer has been welded fast (showing same structure as Fig. 6). 30:1.



Fig. 21. Ren ferrit med slagge eller glødeskal. 30:1.

Pure ferrite, with slag or oxide scale. 30:1.

et kompakt stykke bortset fra den yderste korte flig, der ikke ville hæfte på grund af glødeskaldannelse. Da det ikke var muligt at fjerne glødeskallen ad mekanisk vej, blev der drysset lidt trækulpulver ind under fligen. Herefter hæftede fligen godt til resten af pakken. Som det fremgår af fig. 19, fig. 20 og fig. 21 opnår man ved paketsvejsning samme udseende og samme mikrostrukturer som dem, man ser på fig. 2. Der er derfor god grund til at antage, at i hvert fald denne jernstang med sin fibrede struktur og sine langstrakte slaggeindeslutninger er fremstillet ved paketsvejsning.

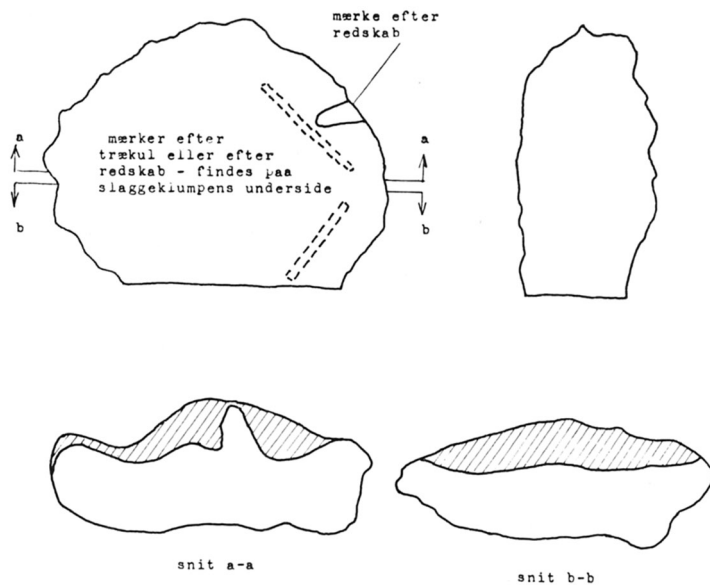
Medens man i og for sig godt kunne forestille sig, at denne jernstang var fremstillet af et enkelt stykke jern, der var banket tyndt og derefter foldet sammen flere gange, så fremgår det af udseendet af barre nr. 2, der er vist på fig. 3, at man her har sammensvejset små massive klumper. Det er som tidligere omtalt praktisk talt ugørligt at sammensvejs sådanne småstykker i en almindelig åben esse, og det er naturligvis fristende at tænke sig jernstykkerne svejset sammen i en digel.

En sådan fremgangsmåde anvendes af primitive afrikanske stammer, men der har så vidt vides ikke været fundet spor af en digelsvejsproces fra fortiden. Det var derfor overordentlig heldigt, at Olfert Voss i efteråret 1964 ved udgravning af slaggegruber på jernudvindingspladsen i Drengsted fandt en lille slaggeklump, der kun kan stamme fra en digelsvejsproces. Slaggeklumpen blev fundet løst i pløjelaget.

Beskrivelse af digelaggen fra Drengsted, Sønderjylland

Slaggeklumpens udseende fremgår af skitsen fig. 22 og fotografierne fig. 23 og fig. 24. Største tværmål er ca. 80 mm, og omridset er næsten cirkulært. Den plane flade er opstået ved, at et stykke er hugget af for undersøgelse af brudfladen.

Fig. 22. Digelslaggen
fra Drenghsted.
Crucible slag from
Drenghsted.



Klumpen vejer 290 g, og den smeltede underste del har følgende kemiske sammensætning:

FeO	49,6 %
SiO ₂	30,0 %
MnO	0,27 %
P ₂ O ₅	0,86 %
Glødetab	10 %

Glødetabet stammer fra små indesluttede trækulstykker. Man kan desuden se små metalliske jernpartikler i slaggen. Hele oversiden er dækket af et tykt lag af sammensintret sand.

På slaggekumpens overside er der et tydeligt mærke efter et redskab, der tilsyneladende har været anvendt til at vrikke noget løs fra slaggen. Der er to mærker i bunden. Disse mærker kan stamme fra redskaber eller kan være aftryk efter trækulstykker.

Slaggekumpens kemiske sammensætning svarer ganske til sammensætningen af de store slaggeblokke, der blandt andet også findes ved Drenghsted. Der er ingen tvivl om, at slaggen er et affaldsprodukt efter en proces, ved hvilken man har villet rense slaggeholdigt jern. Store jernstykker renses let for slagge i en almindelig esse. Dette kan ikke lade sig gøre med småstykker. Man må på en eller anden måde søge at holde stykkerne sammen, og den mest nærliggende måde er vel, at opvarme jernet i en digel.

Man kan ikke på forhånd vide, om diglen har været opvarmet udvendigt, eller om der har været blæst luft direkte ind i en trækulsfyldt digel. I sidste tilfælde må man måske snarere tale om en digelformet esse.

Fra vore jernudvindingsforsøg ved vi, at man selv uden kunstig blæst kan opnå temperaturer på over 1300°C i en trækulsfyret ovn. Der kan således intet være til hinder for, at man kan komme op på svejsetemperatur med en udvendigt opvarmet digel.

For den digelformede esse er problemet, om den mængde trækul, der kan rummes i essen kan udvikle tilstrækkelig varme til at smelte slaggen og bringe jernet op på mindst 1250°C . Der er jo ingen mulighed for at fylde efter med trækul. En digel, 80 mm i diameter og 150 mm høj, kan rumme 100 g trækul, der ved fuldstændig forbrænding udvikler ca. 700 kcal. Der kræves ca. 100 kcal for at smelte slaggen og opvarme jernet fra 400 g slaggeholdigt jern til 1250°C . Selv ved ufuldstændig forbrænding og med relativt store varmetab til omgivelserne skulle en sådan fremgangsmåde være mulig.

Processen ved sammensvejsning i digel med udvendig opvarmning har været følgende: I en lerdigel med indvendig diameter ca. 80 mm anbringes trækul eller muligvis træpinde som en rist til at holde jern og slagge adskilt. Trækullet har desuden tjent til at holde atmosfæren reducerende, hvilket gør slaggen letflydende ved en lavere temperatur end i en oxiderende atmosfære og formindsker tendensen til glødeskalsdannelse. Oven på trækullet anbringes små stykker slaggeholdigt jern, der sikkert igen har været dækket af trækul. Diglen opvarmes til $1200\text{--}1300^{\circ}\text{C}$ i en esse.

Når jernet er tilstrækkeligt varmt, og det meste af slaggen er løbet fra, vil der dannes glødeskal. Glødeskallen består af jernoxider, der smelter ved ca. 1400°C . Det er nødvendigt at fjerne glødeskallen for at få metallisk kontakt mellem de enkelte jernstykker. Ligesom vor tids smede har fortidssmeden omdannet disse jernoxider til jernsilikater, der er letsmetelige, ved at drysse sand på jernets overflade. Herfra stammer det sammensintrede sandlag på slaggeklumpens overside.

Det er klart, at sandet er tilsat på et tidspunkt, hvor slaggen er løbet fra de rå slaggeholdige jernstykker og har efterladt jernet som et luftigt skelet (fig. 26), der tillader sandet at drysse ned til diglens bund. Hvis sandet var tilsat tidligere, ville det være sintret sammen øverst i diglen.

Der er god grund til at tilsætte sandet på et sent tidspunkt.



Fig. 23. Slaggeklumpen set fra undersiden.
The lump of slag viewed from below.

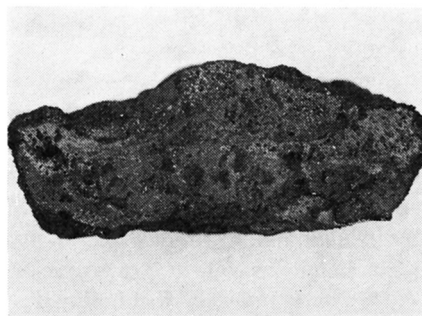


Fig. 24. Snit gennem slaggeklumpen.
Section through the lump of slag.

Fig. 25 viser smeltepunktsdiagrammet for FeO-SiO₂-CaO. I de følgende ræsonnementer erstattes CaO med den blanding af CaO, Al₂O₃, P₂O₅, der fås som rest, efter at FeO og SiO₂ er bestemt kemisk. Dette er ikke helt korrekt, men er tilladeligt for en kvalitativ begrundelse.

I trekantdiagrammet er kun de isotermer indtegnet, der har betydning for udredning. Alt, hvad der ligger inden for den tykt optrukne linie, har smeltepunkt mindre end 1300° C.

Glødeskallen, der kan betragtes som FeO, er repræsenteret ved punkt 1 i diagrammet. Den har et smeltepunkt på ca. 1400° C og er altså ikke flydende ved svejsetemperatur.

Tilsætter man 50 g rent sand til 100 g glødeskal, vil man få en sammensætning, der svarer til punkt 2. Den omdannede glødeskal har et smeltepunkt på 1150–1200° C og er letflydende ved svejsetemperatur. Den kan fjernes, ved at jernstykkerne slås mod ambolten.

Forsøger man på samme måde at fjerne glødeskal fra jernalderjern, der ikke er smedet slaggefrit, vil man opdage, at slaggen bliver helt tør og usmeltelig ved sandtilsætningen. Den slagge, der trænger ud fra indeslutningerne i jernet, indeholder ca. 50 % FeO og ca. 30 % SiO₂, svarende til punkt 3 i smeltepunktsdiagrammet. Dens smeltepunkt er ca. 1150° C. Hvis man smelter 100 g af denne slagge sammen med 50 g sand, vil man få en slagge med en sammensætning, som vist ved punkt 4. Dens smeltepunkt er 1600° C. Selv relativt små sandmængder kan let bringe smeltepunktet op på 1400–1500° C.

Ligesåvel som man ved for tidlig sandtilsætning før essesvejsning af jernalderjern ville forskertse sine muligheder for at skaffe metallisk kontakt mellem to flader, så ville man ved samme fremgangsmåde under digelsvejsning ødelægge slaggens muligheder for at løbe fra jernet. Slaggen har i forvejen det laveste smeltepunkt, som en FeO-SiO₂ slagge kan have. Sandtilsætning kan kun forhøje smeltepunktet.

Når først slaggen er løbet fra jernet, er billedet et ganske andet. Nu dannes der glødeskal, der praktisk talt består af ren FeO, og denne glødeskal kan naturligvis gøres letsmeltelig ved sandtilsætning.

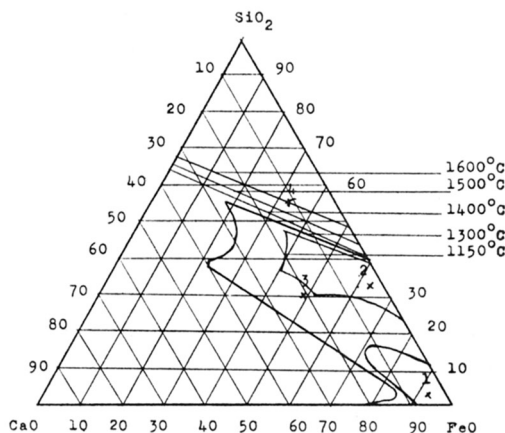


Fig. 25. Smeltepunktsdiagram for slagge.
Melting-point diagram for slag.

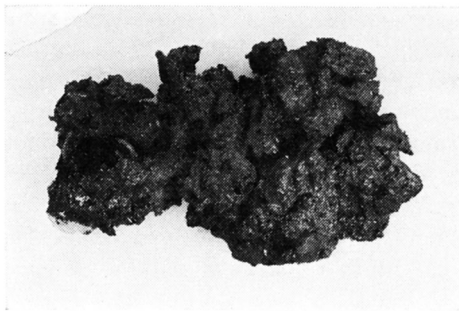


Fig. 26. Svampejern. Resultat af svejseforsøg med udvendigt opvarmet digel.

Sponge iron. Result of welding experiment with crucible heated from without.

Det har således været yderst fornuftigt af fortidssmeden at tilsætte sandet så sent som muligt.

Forsøg nr. 11: Det første forsøg på sammensvejsning af små jernstykker i en digel opvarmet i smedeessen mislykkedes. Som digel blev anvendt en tyndvægget lerkrukke, og denne krukke smeltede efter mindre end en times forløb. Det termoelektriske pyrometer, der var anbragt midt mellem diglens indhold af jernstykker, viste på dette tidspunkt 1020°C , men digelvæggens temperatur har været betydeligt højere.

I det næste forsøg blev der anvendt en chamottedigel med 10 mm vægtykkelse. Den nederste fjerdedel af diglen blev fyldt op med trækul, der skulle give plads for slaggen, efterhånden som den smeltede ned. Oven på trækullet blev der lagt slaggeholdige jernstykker og øverst i diglen igen et lag trækul. Diglen var forsynet med låg, og gennem et hul i låget førte et termoelement af typen Pt/Pt-Rh ned midt i jernet. Temperaturen blev målt potentiometrisk.

Diglen blev anbragt i essen og blev varmet langsomt op uden blæst, indtil temperaturmåleinstrumentet viste 400°C . Herefter blev der sat blæst på, og temperaturen nåede i løbet af 40 minutter op på 1280°C . Digelindholdet var sunket sammen, og der blev tilsat mere jern og mere trækul. Efter yderligere 45 minutters forløb var temperaturen steget til 1320°C , og forsøget blev afsluttet.

Der var kun lidt slagge i diglen, idet der også i dette tilfælde var brændt hul i digelbunden. Slaggen var imidlertid størknet hurtigt og sad fast udvendigt på diglen. Man kunne se, at slaggen havde tæret hul indvendigt fra.

Jernstykkerne var kittet sammen til et stort stykke svampejern af udseende som det svampejern, der blev fremstillet ved jernudvindingsforsøgene (5). Jernklumpen er vist på fig. 26. Denne klump blev senere smedet ud og anvendt til forsøg med paketsvejsning.

Der blev anvendt 85 jernstykker på tilsammen 755 g.

Slaggen vejede i alt 490 g.

Jernsvampen vejede 260 g.

Hvis man går ud fra, at fortidsjernet har haft samme slaggeindhold, kan man ud fra disse tal, Drenghed-slaggens vægt og rumfanget af de 85 jernstykker skønne, at den digel, fortidssmeden har anvendt, har været ca. 80 mm i diameter og ca. 80 mm høj.

Der blev fremstillet en digel af omtrent disse dimensioner og med en væg-

tykkelse på 30 mm (fig. 27). Forsøgene blev udført ganske som de foregående. Da jernets temperatur var nået op på 1300° C, blev den dannede jernsvamp klempt sammen ved hjælp af en smedetang med vinkelbøjede kæber. Diglen blev igen varmet op, og jernet klempt sammen indtil det dannede en lodretstående firkantet stang.

Denne stang blev smedet færdig i essen. Når resultatet blev flere småstykker i stedet for en hel stang, skyldes det dels manglende håndværksmæssig rutine hos den, der har udført disse forsøg, dels at jernstangen ikke straks blev klempt sammen i længderetningen. Når stangen varmes i essen, har den en tilbøjelighed til at knække på de steder, hvor slaggen ikke er klempt ud. Det største af jernstykkerne vejede 17 g og viste sig ved den mikroskopiske undersøgelse at være sammensvejet af tre eller fire stykker.

Sammensvejsning af små slaggeholdige jernstykker i en udvendigt opvarmet digel er altså mulig, og man må anse denne svejseproces for let gennemførlig for en rutineret smed.

Ved de sidste forsøg, der skulle belyse mulighederne for sammensvejsning i en digelformet esse, var der ikke mere jern af »jernalderkvalitet« til rådighed. Forsøgene kunne derfor kun vise, om det var muligt at opnå så høje temperaturer, at slaggen smeltede.

Digelessens fortrin frem for den åbne esse er, at den kan holde sammen på de små jernstykker. Slaggeklumpen fra Drengsted viser ikke, om essens vægge har været cylindriske, eller om essen har været kegleformet. Det er dog mest sandsynligt, at den har været cylindrisk, hvilket ikke alene vil give den mest koncentrerede varme, men også vil formindske tendensen til brodannelse.

Essens dimensioner kan nogenlunde bestemmes ud fra slaggeklumpens størrelse og rumfanget af den nødvendige trækulsmængde. Drengsted-slaggen viser ikke noget om placeringen af en eventuel luftindføring, og det er mest sandsynligt, at denne klump stammer fra en udvendigt opvarmet digel. Indvendig blæst vil bevirke, at størstedelen af slaggen vil samle sig nær ved blæsehullet, hvor temperaturen bliver højst. I bunden af diglen længst fra blæsehullet kan man endog forvente, at blæsten bliver for ringe til at forbrænde trækullet, således at slaggen bliver skæv i bunden.

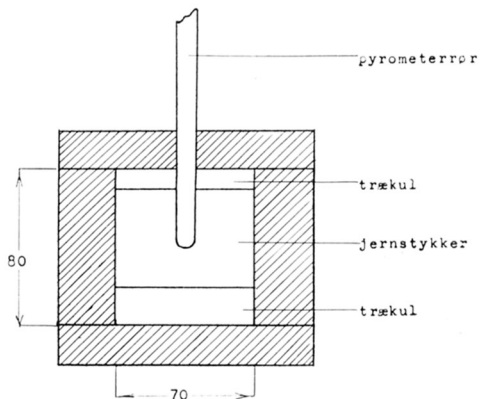


Fig. 27. Udvendigt opvarmet digel.
Outside-heated crucible.

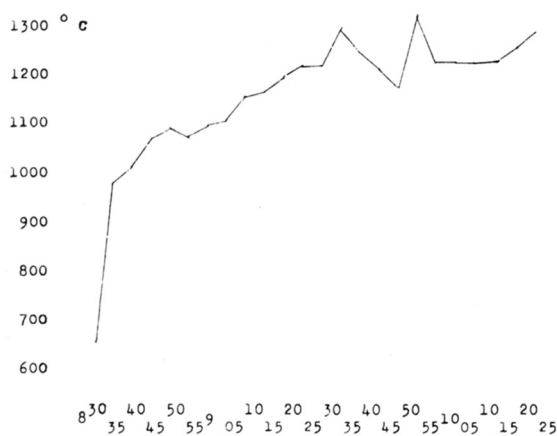


Fig. 28. Temperaturforløb i digelformet esse.

Temperature succession in crucible-shaped forge.

Medens disse forsøg stod på, fandt Olfert Voss en sådan »skæv« slaggeklump i en smedie i Trans kirke. Denne slaggeklump, der stammer fra 1100-tallet, har samme størrelse som Drenghed-slaggen. Man kan her se et mærke efter blæseluften, og dette mærke går tangentielt ind mod digelvæggen 30 mm over digelbunden.

Forsøg nr. 12: Der blev fremstillet en chamottedigel 70 mm Ø indvendig og 150 mm høj. 30 mm over digelbunden blev der indført et 8 mm rør tangentielt mod digelvæggens indvendige overflade. Jernrørets ende uden for diglen blev sat i forbindelse med en blæsebælg. Der blev desuden boret huller til termoelementer i digelvæggen.

Diglen blev fyldt med trækul. Ved hjælp af blæsebælgen lykkedes det efter en times forløb at få temperaturen op på 1100° C. Der blev anbragt 400 g slaggestykker øverst i diglen. Da kullene var brændt ud, var der i digelbunden nærmest ved blæsehullet 60 g slagge, der havde været letflydende. Oven over blæsehullet var der en sammensintret slaggeklump og øverst løse slaggestykker. Når forsøget kun delvis lykkedes, skyldes det, at blæsebælgen ikke kunne levere tilstrækkeligt luft.

Ved det næste forsøg blev der derfor anvendt to blæsebælge, og diglen blev gjort større (110 mm Ø – 200 mm høj). Der blev denne gang opnået temperaturer op til 1280° C. Temperaturforløbet fremgår af fig. 28. Resultatet afveg i øvrigt kun fra det foregående forsøg derved, at der ikke var løse slaggeklumper tilbage i essen.

Forsøgene viser, at man kan opnå tilstrækkeligt høje temperaturer til at kunne udføre en digelsvejsning også i en digelformet esse.

Når der efter nye forsøg på jernudvinding af myremalm igen bliver jernstykker til disposition, vil der blive udført flere digelsvejsningsforsøg.

Det, man især vil fæste sig ved efter en sådan undersøgelse, er den store omhu og tålmodighed, der er lagt for dagen ved fremstillingen af disse jernbarrer. Det vil utvivlsomt have krævet en dags arbejde at sammensvejs 100 g

jernstumper til ét stykke. Heraf får man et billede af jernets værdi i vikingetiden.

På en fagmand vil det især gøre indtryk, at meget af den smedeteknik, der anvendes i vore dage, har været kendt i 1000 år. Det er, som om vikingetiden ikke ligger så mange år tilbage.

Attempt at reconstruction of prehistoric forging processes

Chemical analysis and microscopic examination of prehistoric iron implements can give valuable information about the processes used in their production. But more precise information can be gained by attempting to reproduce the processes suggested by analysis.

Prehistoric iron contains considerable quantities of slag and of phosphorus, and these impurities cause difficulties in the use of processes employed in more modern times. It is therefore necessary to use in the experiments iron of "Iron-Age" quality. For the following experiments iron from a hoard of 20 iron bars found at Hedeby in 1964 was used as a basis of comparison, while the raw material for the reconstruction experiments was small pieces of iron from the iron extraction experiments carried out by Varde Steelworks (5).

Longitudinal and cross sections were sawn through the three bars from Hedeby, and the resultant surfaces polished and then etched with nitric acid to reveal the structure of the iron. From this it could be seen that all the bars consisted of many small pieces of iron welded together, some weighing less than 10 grams.

In addition to the normal microstructure of ferrite and perlite the iron contained large quantities of non-metallic inclusions the characteristic form of this slag being visible in Figs. 7 and 8.

The welding seams show a considerable charcoal content. For example at point b-b there is on either side of the seam a perlite area with high carbon content. At several points (Fig. 6) welding has been unsuccessful, and cracks can be seen full of a black substance which must be the charcoal which caused the carburization, while outside this carbon-rich zone, at some places 1 mm. wide, the structure is purely ferritic. The section in Fig. 2 shows that the areas rich in carbon only occur at the surface.

A chemical analysis was made of the Hedeby iron, and tests of phosphorus content carried out at intervals of 50 mms. along the edge of the longest bar (cf. tables in Danish text). The considerable variations in phosphorus and carbon content are due to the lack of uniformity in structure, while the very low sulphur content is caused by the iron being produced with the help of charcoal, which contains much less sulphur than does hard coal. The phosphorus content is more significant; though high compared with modern iron, it only amounts to a tenth of that obtained in iron produced from bog ore. O. Arrhenius (6) has shown that such iron can only be produced from mined ore, and, as 32 % of the over 300 Swedish iron objects from all periods of the Iron Age analysed by Arrhenius contained less than 0.1 % phosphorus, it is possible that the Hedeby iron was imported from Sweden.

To sum up: the iron bars found at Hedeby are about a half meter long and weigh about 600 grams. They consist of a soft carbon-free central portion and harder carburised ends, made up of many small pieces welded together. They date to the early Middle Ages or the Viking Period, and cannot have been produced from the local bog ore.

Laboratory experiments

1. Carburized layers up to 1 mm. in thickness occur in the Hedeby iron. Surface carburization is widely used nowadays to give a hard surface to a soft tough core, and the object of the experiment was to determine the period of carburization required to give a layer of this thickness. An electrically heated laboratory furnace was used, with a temperature of 1150° C, the minimum temperature for forge-welding. Three pieces of iron were placed in

crucibles with charcoal powder, and the crucibles heated to 1150° C over a period of three hours. One piece of iron was removed 15 minutes after this temperature was reached, the next after 75 minutes and the third after 105 minutes. The depth of carburization was 0.6, 1.4 and 2 mms. respectively. As a later experiment shows, the welding temperature must have been considerably higher, and the prehistoric iron can therefore only have been heated to this temperature for a very few minutes before achieving a carburization layer 1 mm. thick. The possibility must, however, be taken into account that the carburized zone may originally have been thicker, and have been wrought down to the thickness found.

2. One of the pieces from the former experiment was wrought down to a tenth of its original thickness. It appeared thereby that the hard carboniferous perlite layer was not appreciably deformed by the process, but instead split off, leaving the soft tough ferrite exposed.

3. Perlite areas are found on the surface of the iron bars, and can be interpreted as particles of steel with high carbon content welded deliberately to the surface. The possibility was also present, however, that these perlite spots occurred naturally at points where the oxide scale was thin or missing, and carburization occurred more rapidly. The oxide scale was therefore removed in three stripes on each of the three iron pieces before the carburization experiment. The resultant depth of carburisation was not greater at these points, nor could any structures be found resembling the perlite spots.

4. In order to estimate the welding temperature for carburized iron, two pieces of already wrought iron were surface cleaned and placed in a crucible with a thin layer of charcoal between. After heating to 1150° C the two pieces adhered together, but the temperature was too low for the pieces to be welded together.

5. Six small pieces of iron, containing slag and not previously wrought, were heated to 1150° C surrounded by charcoal powder. After an hour at this temperature so much slag had run off that it was clear that the iron must have held more than 50 % slag, and the pieces were cindered into a single lump. This was heated to 1250° C in a forge hearth, kneaded and worked with smith's tongs to remove more slag, and finally wrought to a thin bar of almost slag-free iron.

6. The greater part of the iron from the extraction experiments is in the form of sponge-iron, and it could be expected that such sponge-iron, heated with carbon and thereafter welded together, would form perlite structures, as the wall thickness of the individual cells would be less than the carburization depth of 1 mm. A piece of sponge-iron, already containing charcoal particles from the extraction process, was accordingly heated to 1150° C, but was later wrought after heating in a forge hearth to 1250° C. The structure was not the expected perlite, but ferrite with some "islands" of perlite corresponding exactly to the structure in Fig. 12.

7. While pieces of iron weighing over 50 grams are easy to forge together to larger units, providing the temperature is high enough, smaller pieces are more difficult, because: (a) they are lost among the forge coals, (b) they burn up because of their spongy surface, (c) they lose their heat before reaching the anvil, (d) it is difficult to remove the oxide scale, and (e) the presence of slag prevents metallic contact between the pieces. The loss of heat can, however, be avoided by welding a smaller piece to a larger, using the heat capacity of the larger piece as in the Japanese Shinto-smithy. Accordingly a hollow was wrought in the larger piece, in which the smaller could lie. The welding was successful, and the result resembled the two areas in the upper left-hand corner of Figs. 2 and 3. A similar process has been employed with bar 3 (Fig. 13), where a little wedge of iron has been wrought into a fork formed by two other pieces. A similar technique is illustrated in handbooks for smiths from the present century.

8. The perlite strips at c-c in Fig. 2 may belong to a carburized welding seam, but may also belong to a carburized surface zone. If so the ferrite layer closest to the surface must have arisen from a later decarburization. A considerable thickness of decarburization is obtained by heating steel in an oxidizing atmosphere. Accordingly the piece of iron which had been carburized for 75 minutes in the laboratory furnace was heated three times to 1250° C in the forge hearth. After each heating it was hammered with light strokes, as in forge welding, and thereby wrought down to half thickness. Laboratory tests showed no

decarburization, perhaps because slag, continuously hammered out of the iron, protected the surface against oxidization. The piece was wrought three more times, to a tenth of its original thickness, but the microscope still showed no decarburized portions.

9. The zones with high carbon content along a welding line must have arisen by two pieces of iron being welded together with a layer of charcoal or other organic matter between. The addition of carbon may have been motivated by: (a) the fact that the welding temperature is lower for carbon-rich steel than for carbon-free iron, (b) the fact that carbon hinders the formation of oxide scale which prevents metallic contact between the pieces and forms one of the greatest difficulties in welding, or (c) a desire to convert the iron to steel. (That this carburization process was known even in the Early Iron Age is shown by the discovery of knives where the cutting edge has been carburized, while the back consists of carbon-free iron (1)). Accordingly an attempt was made to weld two pieces of iron together with a charcoal layer between. The experiment appears to eliminate (a), as, even when the charcoal did not fall out from between the pieces, it proved to be considerably more difficult to weld carburized than carbon-free iron, as the surfaces slide the one upon the other even at lowered temperatures. It did, however, prove possible to get the two pieces to adhere, and a carburization did take place (Fig. 18), though with a lower carbon content than in the prehistoric welding seams.

10. The difficulties of welding together small pieces of iron might also be reduced by either packet-welding or welding in crucible. Both methods were probably used. Packet-welding involves hammering pieces of iron thin, which tends to remove much of the slag, and then welding them together in a pack, and the fact that the Hedeby iron contains less slag than the iron we produce suggests that at least bar 1 (Fig. 2) was produced by packet-welding. For the experiment in packet-welding iron from the crucible-welding experiment (below) was used. The pieces were wrought down from 8 mms. to 1–2 mms. thickness, the oxide scale removed from the surfaces, and the sheets packed as shown in Fig. 19. Charcoal powder was introduced between the sheets in order to try once more to produce carburized zones at the welding points. The packet was heated slowly in the forge, to allow the single layers to reach welding temperature simultaneously. The hearth coals had been burnt to coke previously to remove the sulphur, which would have ruined the experiment. After several heatings and hammerings the packet was welded into a compact mass apart from the outermost sheet which would not adhere on account of formation of oxide scale. However, after a little charcoal powder was scattered under the sheet this too adhered satisfactorily. Figs. 19, 20 and 21 show that by packet-welding the same appearance and microstructure was achieved as is seen in Fig. 2.

While it is possible that bar 1 was produced from a single piece of iron, hammered thin and then folded together several times, the appearance of bar 2 (Fig. 3) shows that it was welded from small solid pieces. As it is practically impossible to weld such small pieces in an open forge it is tempting to imagine them welded together in a crucible. African tribes use this method, but there was no evidence of this method being used in prehistoric Denmark until Olfert Voss, excavating slag-pits at the iron-producing site at Drensted in the autumn of 1964, found a little lump of slag in the topsoil which can only have come from a crucible-welding process.

The lump of slag (Figs. 22, 23 and 24) was almost circular, with a greatest diameter of about 80 mms., and weighed 290 grams. The whole upper surface was covered with a thick layer of cindered sand. This sand must have been added at a late point in the smelting, after the slag had run off, in order to remove the oxide scale by the well-tried method of converting the iron oxide of the scale, with its high melting point, to iron silicate, which has a low melting point.

Whether a crucible heated from outside was used, or an internally heated "crucible-forge", could not be immediately determined. Our iron-extraction experiments had shown that welding temperatures could easily be reached with an outside-heated crucible, while the amount of charcoal which a crucible 80 mms. in diameter and 150 mms. high could contain also appeared probably to be sufficient to reach the required temperature.

11. The first attempt at welding small pieces of iron in a crucible heated on a forge failed. A thin-walled pottery vessel was used as crucible, and melted after less than an hour.

The thermoelectric pyrometer among the iron pieces showed at that point 1020° C, but the temperature of the crucible walls must have been considerably higher. A chamotte crucible with walls 10 mms. thick was then employed. The lower quarter was filled with charcoal, which would give place to the slag as it melted down. Above this were pieces of iron with slag content, and above this again a layer of charcoal. The crucible had a lid, and a thermo-element of type Pt/Pt-Rh was set in the middle of the iron. The crucible was heated slowly on the forge without forced draught until the meter showed 400 ° C, when forced draught was applied and in 40 minutes the temperature reached 1280° C. More iron and charcoal was added, as the contents had sunk. After a further 45 minutes the temperature had reached 1320° C and the experiment was terminated. The 85 pieces of iron, originally weighing 755 grams, had coalesced to a large lump of sponge-iron weighing 260 grams. The slag weighed 490 grams. Judged from these figures and the weight of the Drensted slag, the crucible used at Drensted was about 80 mms. in diameter and about 80 mms. high.

Accordingly a crucible was made to these dimensions and with walls 30 mms. thick (Fig. 27), and the experiment repeated. The resultant sponge-iron was squeezed with tongs at 1300° C into a vertical square-section bar and was wrought further in the forge. Here it broke into several pieces, partly through inexperience. It is undoubtedly possible for an experienced smith to weld small pieces of iron with slag-content in an exterior-heated crucible.

12. The final experiment was to test welding in a crucible-forge, but as no more iron of "Iron-Age quality" was available it was only possible to test whether temperatures sufficient to melt slag could be reached. Such a forge has an entrance for draught, and as the Drensted slag shows no sign of this it is probable that it is from an exterior-heated crucible. However, while the experiment was in process Olfert Voss found a lump of slag in a smithy at Trans church, dating to the 12th century and about the same size as the Drensted lump, but with marks from the draught and of the sloping shape which results from the heat being greatest at the point of draught entrance.

For the experiment a chamotte crucible was made 70 mms. in interior diameter and 150 mms. high, and an 8 mm. pipe was introduced 30 mms. above the crucible bottom tangential to the interior surface. A bellows was attached and the crucible filled with charcoal. By use of the bellows the temperature was raised in the course of an hour to 1100° C. 400 grams of slag pieces were placed at the top of the crucible and when the charcoal was burnt out there were 60 grams of melted slag in the bottom, a cindered lump of slag above the draught-hole, and loose pieces of slag at the top. The partial failure was due to insufficient draught. The experiment was therefore repeated with a larger crucible and two bellows. This time the temperature reached 1280° C and there were no loose pieces of slag left in the forge. The experiment thus showed that crucible-welding could also be carried out in a crucible-forge, and they will be continued when more extracted bog-iron is available.

One thing which the series of experiments makes very obvious is the great care and patience expended on the production of these iron bars. It required undoubtedly a full day's work to weld 100 grams of pieces of iron into one piece. This fact serves to give a picture of the value of iron in the Viking Period.

To one in the trade it is particularly impressive to see that much of the technique of the smith used today has been known for a thousand years. It is as though the Viking Period is not so many years distant.

*Robert Thomsen,
Varde Steelworks.*

NOTER

1. Radomir Pleiner: Alteuropäisches Schmiedehandwerk. Praha 1962.
2. Rädiker und Naumann: Untersuchungen vor- und frühgeschichtlicher Spitzbarren. Arch. für das Eisenhüttenw. Sept. 1961. p. 593.
3. G. T. Brown: Roman bloom from Cranbrook, Kent. Journal of The Iron and Steel Institute. June 1964. p. 502.
4. J. Piaskowski: The manufacture of mediaeval damascened knives. Journal of The Iron and Steel Institute. July 1964. p. 561.
5. KUML 1963. p. 70.
6. O. Arrhenius: Die Grundlagen unsere älteren Eisenherstellung. Stockholm 1959.
7. E. Schürmann: Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer. Stahl u. Eisen 78 (1958) p. 1299.
8. J. W. Gilles: Versuchsmeltze in einem vorgeschichtlichen Rennofen. Stahl und Eisen 78 (1958) p. 1690.