

国外资料

大功率軸向輻流式水輪機焊接葉輪 所用鋼的成分的探討

內部資料 注意保存



第一機械工業部

機械科學研究院譯制

1960.12. 北京

Главное управление
Научно-исследовательских и проектных организаций
при Госплане СССР

蘇聯國家計劃委員會科學研究與組織設計總管理局

Центральный научно-исследовательский институт
технологии и машиностроения.

中央機械制造與工藝科學研究院

По Научно-исследовательской работе №21А-61-20.

№21А-61-20 科學研究工作報告

“Изыскание состава стали, применительно к сварным
кошесам мощных радиально-осевых
турбин”

大功率軸向輻流式水輪機焊接叶輪所用
鋼的成分的探討

Москва 莫斯科 1959.

№П-1А-01-20項課題“大功率軸向輻流式水輪機 焊接工作輪所用鋼成分的探索”的簡介

本課題根據前重型機械工業部技術委員會一九五六年八月二號的決定而提出，旨在探索布拉茨克水電站大功率軸向輻流式水輪機焊接葉輪所用的耐氣蝕材料。

本課題研究出一種牌號為16ДХГС-Л的低合金鋼。目前水輪機製造中所採用的鉻不銹鋼可焊性很差，材料在大截面上的機械性能不均勻，本課中對其成份作了很大的改變。這種新鋼材用硬模鑄件檢驗過其性能，本鑄件的截面和布拉茨克水電站的水輪機葉輪葉片相仿。報告里介紹了工作輪葉片的硬模鑄造工藝，本工藝已用來生產過4個20ГС-Л鋼試驗葉片。

從大功率水輪機焊接工作輪所用的耐氣蝕鋼，選材研究中，可以得出以下結論：

1. 從德聶伯水電站國產軸向輻流式水輪機和美造軸向輻流式水輪機工作輪在九年內的使用壽命分析結果來看，說明30-Л號碳素鋼和按ASTM的B-2號鋼一樣都不能滿足氣蝕的要求，因而不能作為大功率軸向輻流式水輪機工作零件的製造材料。

2. 在該課題中研究出了一種不含稀有元素的低合金鋼，按現行鋼號系統和16ДХГС-Л牌號相同，這種鋼在試驗室和半工業條件下作過研究，作檢驗的最大鑄件重750公斤，經正火（溫度900—930°，靜止空氣冷卻）和不高於610°的回火處理後都有穩定而且指標很高的機械性能： $\sigma_s \geq 40$ 公斤/平方毫米； $\delta \geq 14\%$ ； $a_k \geq 8$ 公斤·公尺/平方厘米，其中各元素的含量範圍如下：

C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cr %	Cu %
0.13—0.19	0.6—0.8	0.9—1.2	最大 0.03	最大 0.03	0.9—1.2	0.9—1.2

3. 七種不同的變性劑（Ti, Nb, V, Li, Zr, Ca, Ce）對16ДХГС-Л鋼性能影響的檢驗結果表明，僅含量0.05—0.1%的變性劑Ce對整個綜合性能起良好的影響，其他變性劑都起不良影響，首先是對該鋼種的耐氣蝕性起不良影響。此外，某一些變性劑（Ti, Nb, V）還降低鋼的塑性性能與衝擊韌性。

4. 16ДХГС-Л低合金鋼的焊接前，應預熱，溫度不低於200°。鋼中鉻含量超過1.2%就會使鋼的可焊性劇烈下降。

5. 16ДХГС-Л低合金鋼僅可用來製造工作規範比較平穩的水輪機工作輪和水室，或者是用來製造大功率水輪機中不受氣蝕，但要求金屬有較高強度的其他零件（蝸牛殼和定子）。

6. 確定鉻不銹鋼成分的研究和加熱與冷卻時鋼中產生相變的分析結果說明鋼中的含碳量可以降低，鎳含量可以提高0.5%和加入添加元素——銅。

通过該鋼种的机械性能，耐气蝕性及可焊性的檢驗摸清了鋼中各元素的最合理的組合，使有可能将含有下列成份的鋼推荐來制造大功率水輪机巨型焊接工作輪，作为工业試驗，此鋼的牌号符合10X13HД-Л。

C %	Si %	Mn%	S %	P %	Cr%	Ni%	Cu%
达0.12	达 0.4	达 0.6	最大 0.03	最大 0.03	11.5—13.5	1.0—1.5	0.9—1.2

7. 对模拟布拉茨克水电站水輪机工作輪截面而做的半吨重 10X13HД-Л鋼硬模鑄件的性能与組織結構的分析表明，鑄件的机械性能稳定，組織均匀。

經過1100°，1050°两次正火和680°回火后，在210毫米截面上获得以下的机械性能： $\sigma_s \geq 65$ 公斤/平方毫米； $\sigma_B \geq 75$ 公斤/平方毫米； $\delta \geq 14.0\%$ ； $\psi \geq 30\%$ ； $a_k \geq 4$ 公斤·公尺/平方厘米；而在100毫米截面上的机械性能： $\sigma_s \geq 65$ 公斤/平方毫米； $\sigma_B \geq 76$ 公斤/平方毫米； $\delta \geq 17\%$ ； $\psi \geq 49\%$ ； $a_k \geq 5.5$ 公斤·公尺/平方厘米。

不允許把回火溫度提高到720°以及更高的溫度，因为在推荐的成份范围内各种元素的某些配合情况下，会引起部分相变。鋼的不完全淬火对組織結構有影响。

8. 10X13HД-Л鋼和 20X13H-Л鋼的耐气蝕性的水平一样。这种鋼可焊性較好。根据可焊性的初步检查結果說明有可能补焊气蝕损伤处而无須进行預热。

9. 对10X13HД-Л鋼所做的研究給予可能推荐这种鋼，于工厂条件下制造布拉茨克水力发电站水輪机叶片型的試驗鑄件（不少于5吨重），进行工业試驗。

10. 鑄工处設計了供布拉茨克水电站水輪机叶片用的半內衬硬模，这种硬模能把一般硬模鑄件所具有的很高应力降低到允許的范围。

这种硬模在涅瓦列宁机械厂第22車間里試鑄过四个20ГC-Л鋼的試做叶片。

本課題是大功率軸向輻流式水輪机制造研究綜合工作的一部份，在技術科学博士克良宁И·Р·的领导下进行研究。

本課題的参加人有巴布施金娜Г·И·（課題領導人），莫罗卓娃Г·А·（高合金鋼探索負責人），吉申Т·В·（低合金鋼探索負責人，主任技術員沙尔柯Л·Н，斯莫宁契夫З·И·及謝尔格也夫）。

10X13HД-Л鋼硬模鑄件的客觀組織研究在試驗室主任列瓦多В·В·领导下由主任技術員瓦尔一奇克娃担任。

硬模与硬模鑄件工艺在鑄工处組长沙高洛夫Н·А·领导下設計的。可焊性与耐气蝕性的研究工作分別由焊接处与腐蝕塗层处进行。这些工作的詳細总结載于綜合工作总结內。

金屬学与热处理处工长：

阿斯达菲也夫А·А·

目 錄

	頁
I 前言.....	4
II 現用軸向輻流式水輪機調查結果.....	5
III 耐氣蝕低合金鋼的探索.....	12
对在試驗室里做的含鉻的錳硅銅鋼鑄件的性能与金相組織的研究.....	13
半工业鑄件里16ДХГС-Л錳硅銅鉻鋼的性能研究.....	15
16ДХГС-Л鋼的可焊性.....	21
各种变性剂对16ДХГС-Л鋼金相組織及性能影响的研究.....	22
加变性剂与不加变性剂的16ДХГС-Л鋼的耐氣蝕性的研究.....	37
16ДХГС-Л鋼的膨脹分析.....	39
对大功率的水輪機工作輪用的低合金鋼探索的結語.....	40
IV 高鉻鋼成分的改善.....	40
試驗室溶煉的各种成分的不銹鋼研究.....	41
10X13ХНД-Л鋼的半工业硬模鑄件的研究.....	47
10X13НД-Л鋼的膨脹研究.....	51
10X13НД-Л鋼奧氏体等溫相变的研究.....	54
10X13НД-Л鋼对重复高溫加热的敏感性研究.....	69
10X13НД-Л鋼半工业鑄件的結晶組織.....	70
10X13НД-Л鋼鑄件應力的測定.....	74
鉻不銹鋼的耐氣蝕性.....	81
10X13НД-Л鋼的焊接.....	82
关于改进鉻不銹鋼成份的研究工作結果的討論.....	83
V 布拉茨克水电站工作輪的叶片硬模鑄造工艺.....	84
工作輪叶片的硬模鑄造簡明工艺規程.....	84
結論.....	90

I 前 言

大功率軸向輻流式水輪機到目前還沒有採用，其原因是當水輪機功率很大時，軸與工作輪的不可分構件的外形尺寸很大，造成加工與運輸上的困難。

功率最大的軸向輻流式水輪機（120兆瓦特）安裝在美國 Грэнд-Кули 水電站（註1）。

目前列寧格勒斯大林金屬工廠為布拉茨克水電站設計了一台實際上切實可行的200—210兆瓦特軸向輻流式水輪機。不久將來還要為克拉斯諾維爾斯克水電站設計功率更大的水輪機。

這樣，在幾年內要設計大功率軸向輻流式水輪機組列，就必須對這樣水輪機的零件，首先是主軸和工作輪的選材與工藝選定進行研究。該課題的目的正是為了解決布拉茨克水電站型水輪機工作輪的選材與工藝選擇。

軸向輻流式水輪機的工作特點與迴轉葉片式或水厚式水輪機不同，它的零件在工作負荷不滿時要受到強烈的气蝕破壞。水電站工作中機組運轉時部分負荷的時間是可能的，這樣就一定會造成工作葉輪受到很大的破壞。因而用來作為工作葉輪的材料毫無疑問應是耐气蝕的材料。

由於停工要造成損失，同時修理工作很複雜，成本又高，所以經常進行修復工作對於大功率機組是非常不利的事。

選材的第二個必備的條件是大厚度的可焊性良好，因為根據布拉茨克水電站水輪機工作輪所採用的生產工藝來看，每個葉片都是一端和法蘭盤相焊，而另一端和下環圈相焊。在很多情況下，所有的工作輪都用貴重的高合金鋼材製造。這樣是不合算的（對大型機械來講），最好是把幾乎占全部制件重量三分之一的上環圈（法蘭）用便宜的而且可焊性良好的低合金鋼20ГC-Л製造。

在其他一些情況下，所有的工作輪最好全部用低合金鋼製造，而受气蝕破壞的部位用1X18H9T奧氏體板料復蓋。

由於我們在今年第二季度結束了油水（泵）水輪機零件用的耐腐蝕鋼探索研究工作*，所以在本課題內我們將不來重複介紹這些研究，只根據需要我們引用一些已經取得的結果。

這項研究工作的主要研究目標是探索耐气蝕材料，但它必須具有清水中水輪機組所需的其他工作性能。

布拉茨克水電站初批試制性水輪機工作輪的構件材料是和列寧格勒斯大林金屬工廠水輪機設計室一道選定的。

在本課題研究開始前我們對德聶伯爾水電站水輪機的碳鋼工作輪磨損進行了觀察，

* №21—A—32—20課題一九五八年六月的研究報告。

現在我們來介紹一下这次观察的情况，观察結果說明了中功率軸向輻流式水輪机組的破坏程度与典型的性質。

II 現有軸向輻流式水輪机調查結果

战后時期修复德聶伯尔水电站要求制造新的机器設備。每台功率为75兆瓦特的九台水輪机組中有三台是由美国 Newport News 公司在一九四七年供貨，而其余六台机組是由列宁格勒斯大林金屬工厂制造的，于一九四八年投入運轉。

美国水輪机工作輪的材料是按ASTM（国家标准A—27—42）的B—2碳素鋼。表1內列出这些工作輪在检查試驗時所获得的机械性能和化学成份。

Newport News 公司的水輪机工作叶輪共有十五个叶片，直徑为5450毫米（計算水头H=36.3米，轉数83.3），由三个部份組成。这三部份的上部通过輪圈紅套連接在一起。

上述輪圈同時也是上封閉环。在下輪緣上也套有紅輪圈。此外，連接工作輪下部的还有处在工作輪套內部的法兰。

表 1

工作輪編號	試件代号	化 学 成 份 %					机 械 性 能			
		C	Si	Mn	S	P	δ_1 磅/吋 ²	δ_2 磅/吋 ²	δ %	4%
1	A1	0.29	0.51	0.69	0.025	0.043	42100	75850	28.5	42.1
	A2	0.30	0.48	0.64	0.025	0.028	40250	76800	27.0	40.9
	A3	0.27	0.34	0.58	0.026	0.040	44450	75250	25.5	37.8
2	C1	0.23	0.44	0.59	0.027	0.052	40850	72600	28.0	41.8
	C2	0.25	0.48	0.53	0.028	0.033	39250	73200	27.5	44.2
	C3	0.27	0.46	0.71	0.018	0.048	40700	76250	23.0	43.6
3	B1	0.25	0.50	0.73	0.026	0.053	40500	77750	25.5	44.8
	B2	0.25	0.41	0.70	0.024	0.044	39750	78500	26.0	47.7
	B3	0.26	0.44	0.55	0.022	0.015	39650	71450	30.0	50.0

备註：表中机械性能是退火和回火后試驗获得。根据技術条件由退火溫度爐冷到 $t=500^{\circ}\text{F}$ 及由回火溫度爐冷到 $t=400^{\circ}\text{F}$ 。

列宁格勒斯大林金屬工厂供貨的水輪机工作輪为整鑄結構，共有十四個叶片。工作輪材料为30Л鋼，直徑和美制水輪一样为5450毫米。轉数也是83.3。

在下面的表2中列出了八年使用期間內（每隔1—2年修理一次），所有九台水輪机

工作叶片的破坏数字。

图1为气蚀破坏表示图。该图根据1954年德聶伯尔水电站一号美国水轮机大修时工作叶轮的检查结果绘成。图2根据列宁格勒斯大林金属工厂供货的工作叶轮在1947年大修时检查结果绘成。图3—16为列宁格勒金属工厂供货的六号水轮机工作叶轮的每个叶片气蚀破坏详图，这些图是在一九五五年机组修理时检查绘成。

在分析工作轮气蚀破坏数字之前，必须谈一下德聶伯尔水电站的检修工艺。

深的腐蚀空洞及中心用气锤铲除。小的松驰缺陷修复办法是用气锤锤实金属，锤实后再用砂布打光。

叶片背面上破坏中心清除后用UM-7焊条堆焊上金属，焊条直径根据空洞的大小可以取4—6毫米。

堆焊焊珠自下而上地移动，堆焊上一层金属。在腐蚀很深的部位采用“弓形”焊法补焊，也是自下而上，不过是一层重叠一层。

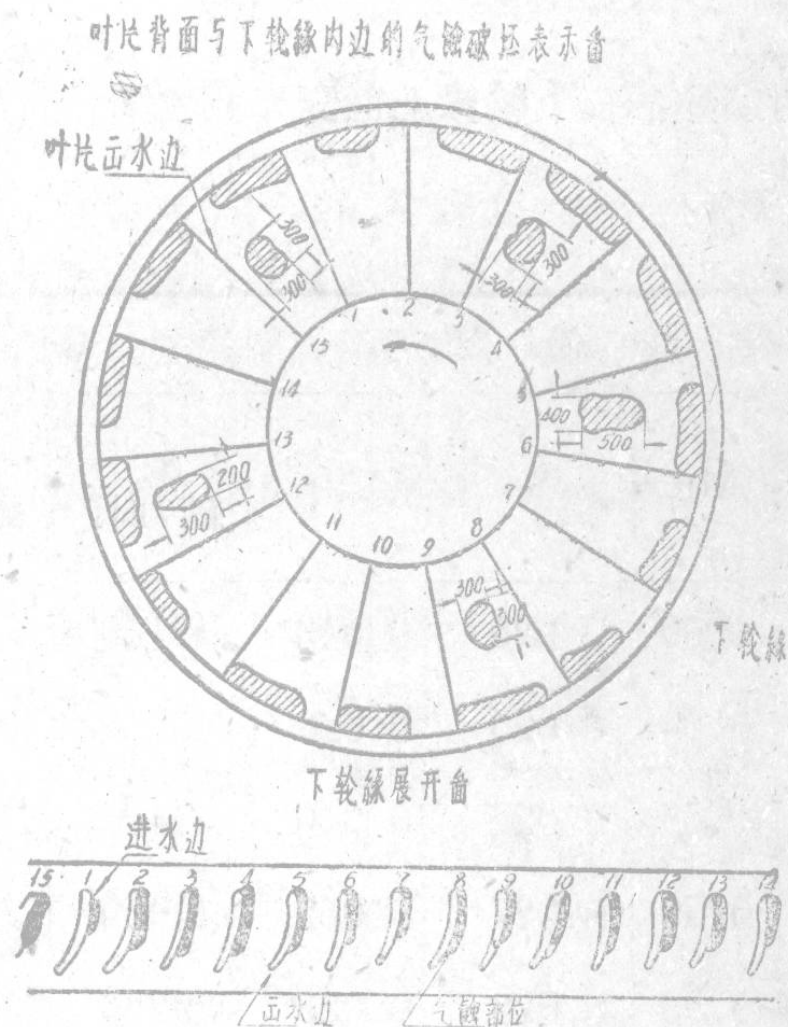


图 1

直径4毫米的焊条采用的电流强度为160—200安培

直径5毫米的焊条采用的电流强度为220—250安培

直径6毫米的焊条采用的电流强度为320—380安培

每个敷焊过的表面都经凿子冲打，然后再用砂布打光。修理后用浸酸法对补焊部位进行细致的检查。

分析上面引述的检查数据结果表明，用碳钢做的中功率轴向辐流式水轮机工作叶轮的破坏很大。这样的结论对美国造与国产的水轮都适合。不过应该说明一点，在使用初期美造叶轮破坏很厉害，显然这是因为B-2钢比BO-Л钢中的含碳量较低，因而叶轮的金属硬度较低。所有以后的破坏就不能从基本金属性质的角度来研究问题。因为受破坏

原书

缺页

原书

缺页

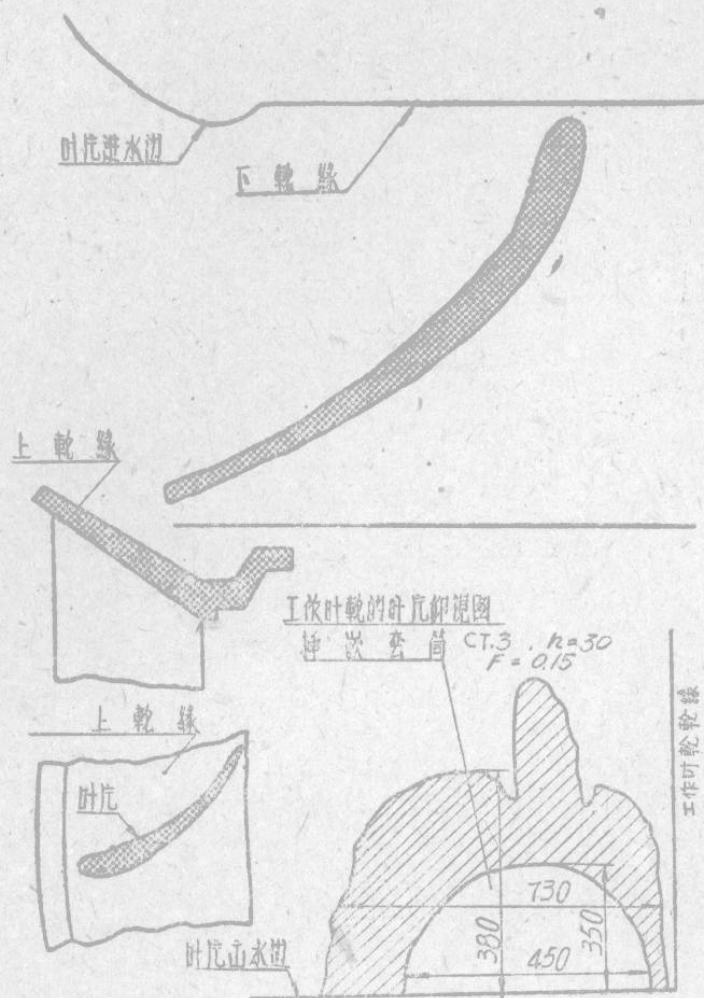


图 5

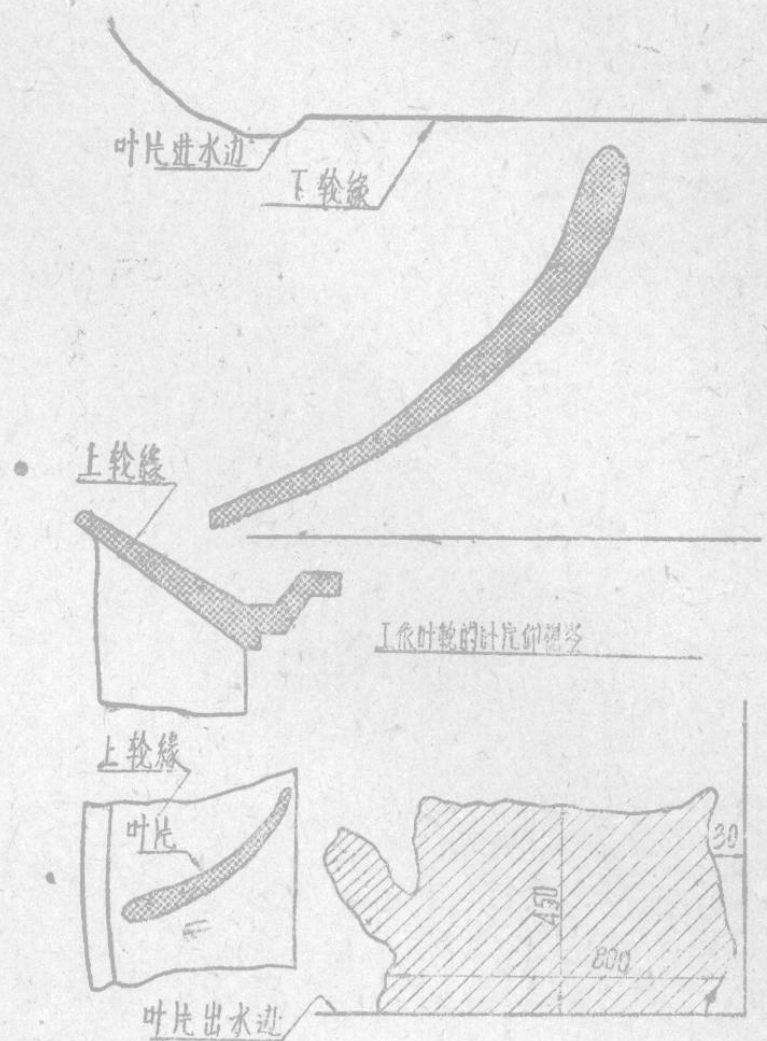


图 7

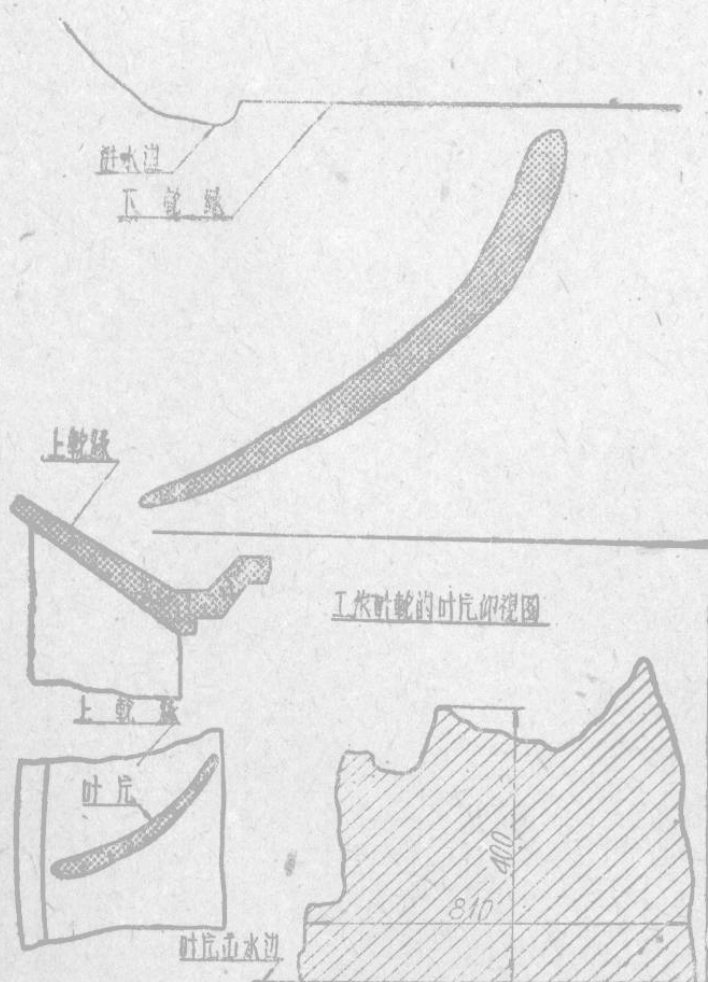


图 6

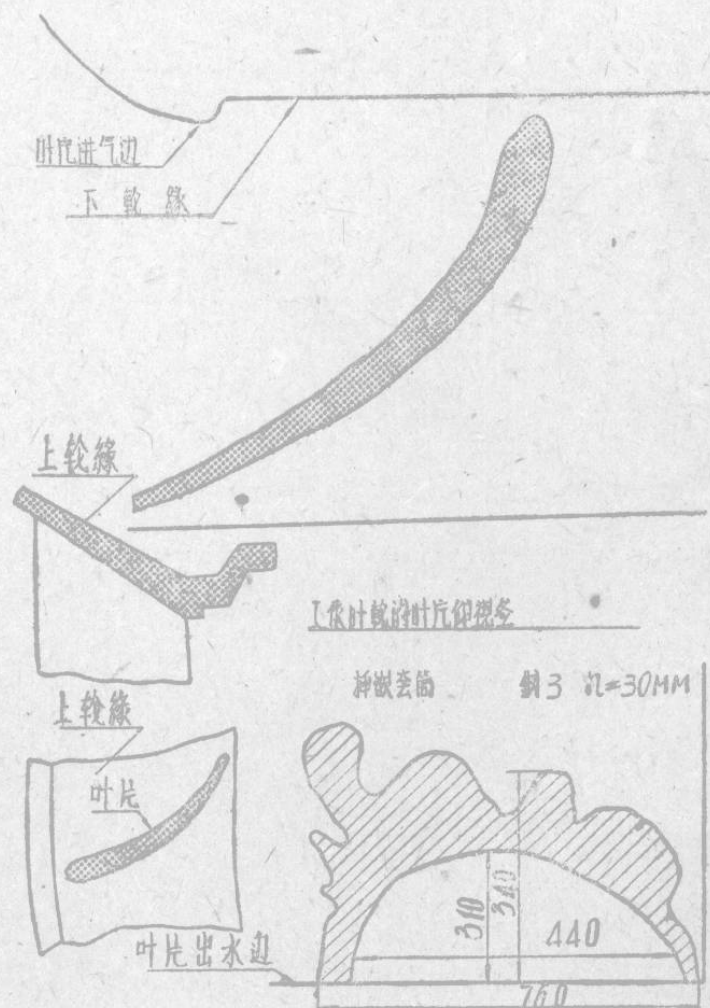


图 8

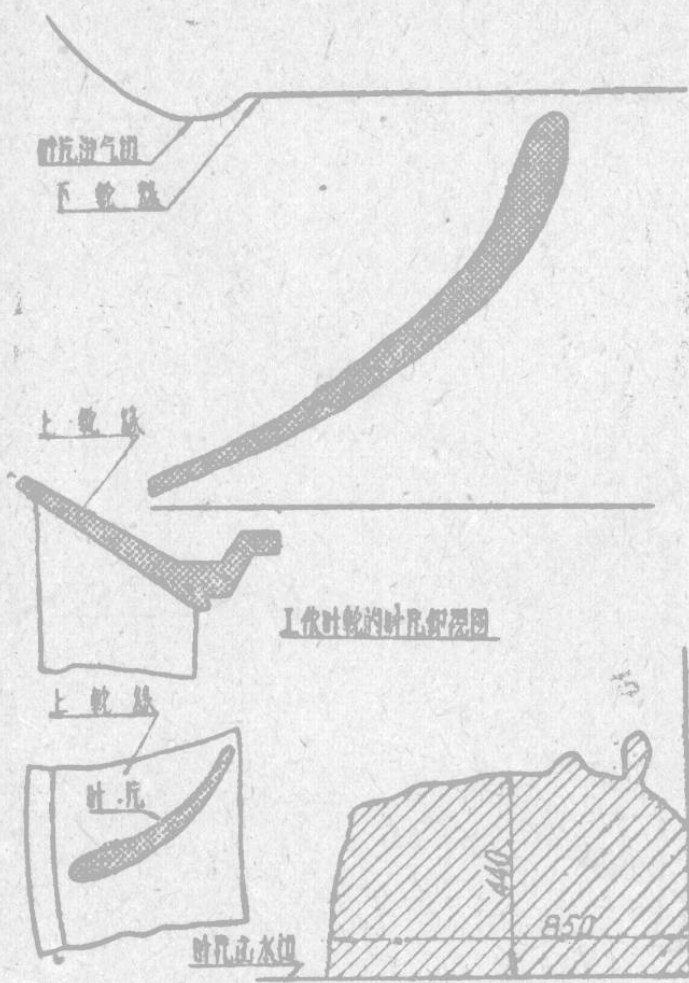


图 9

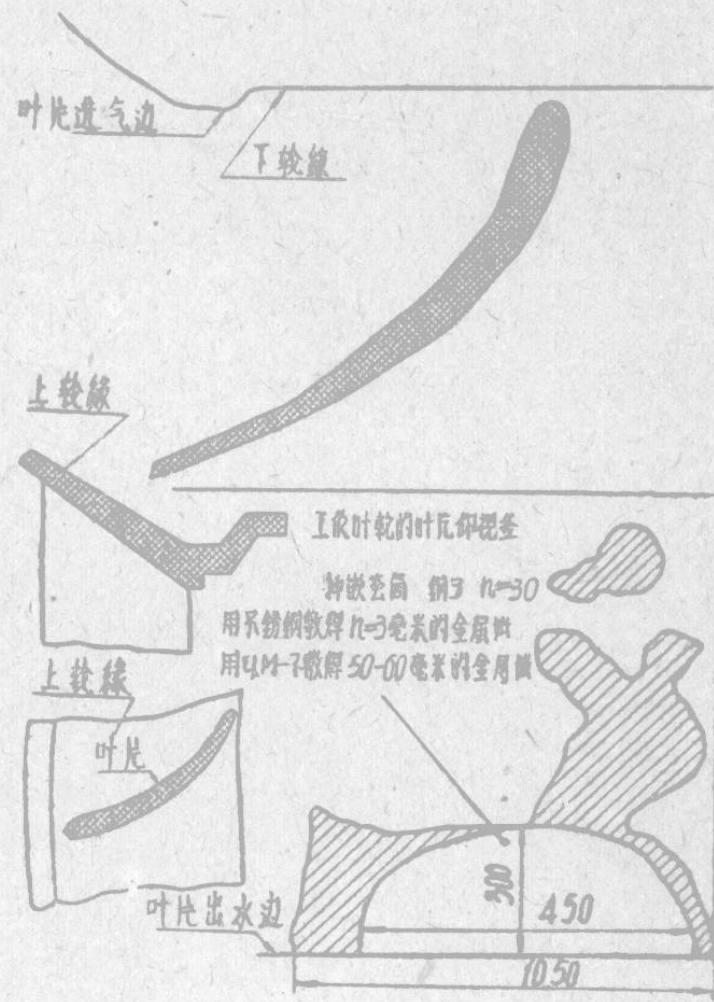


图 10

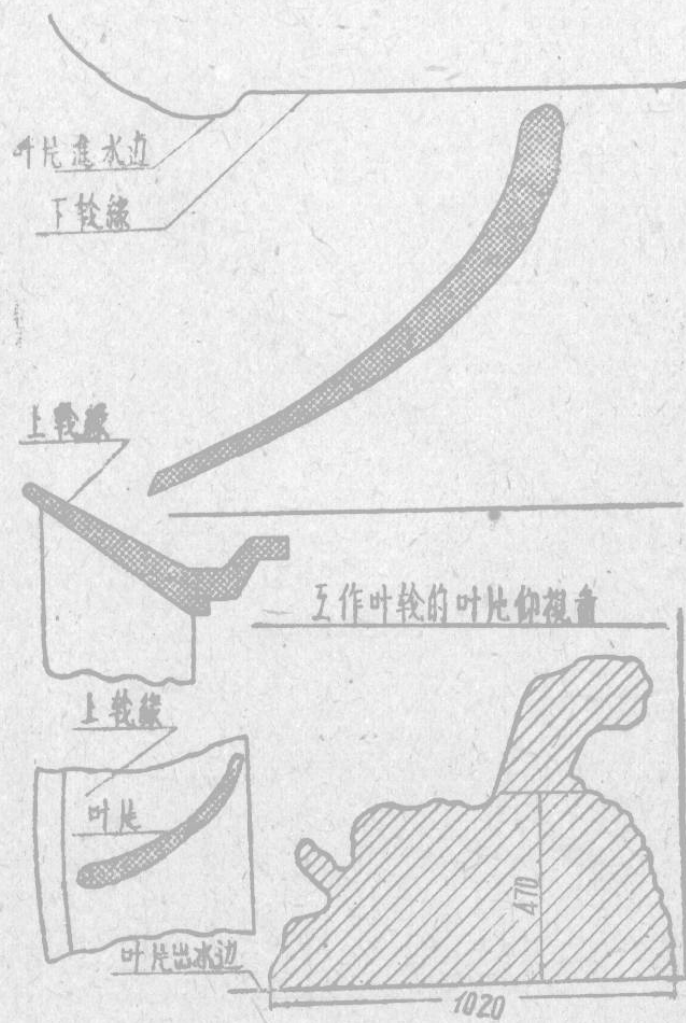


图 11

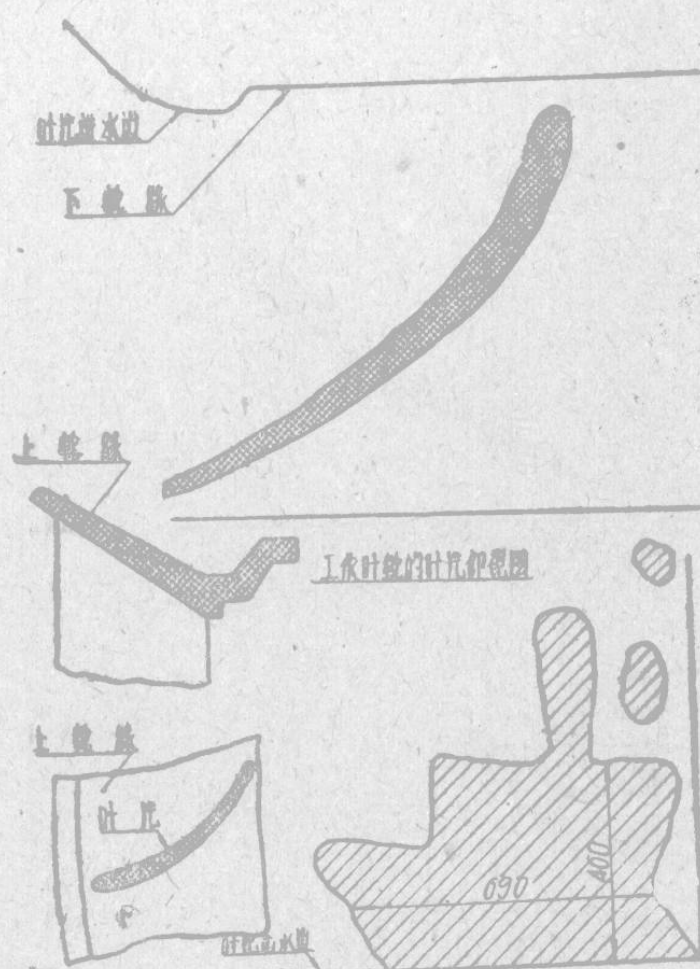


图 12

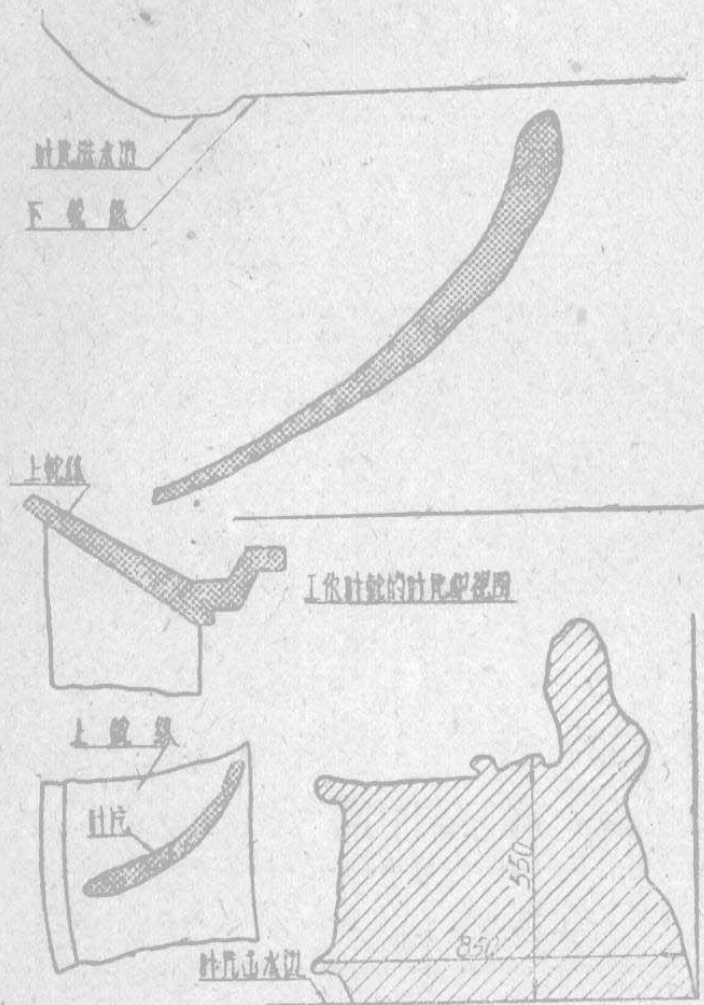


图 13

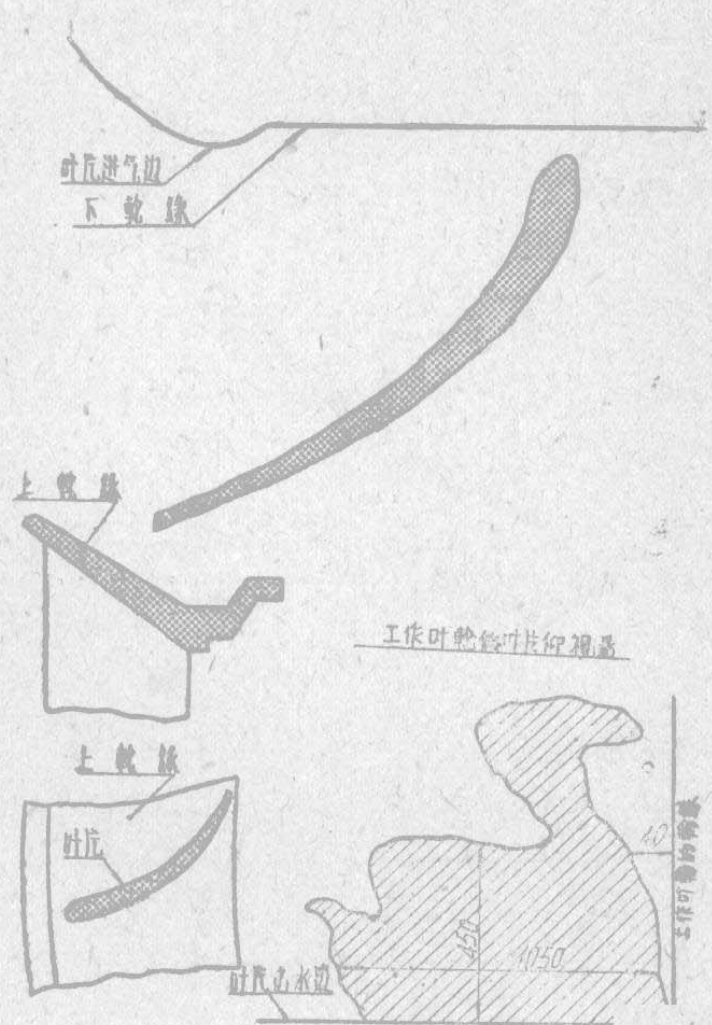


图 14

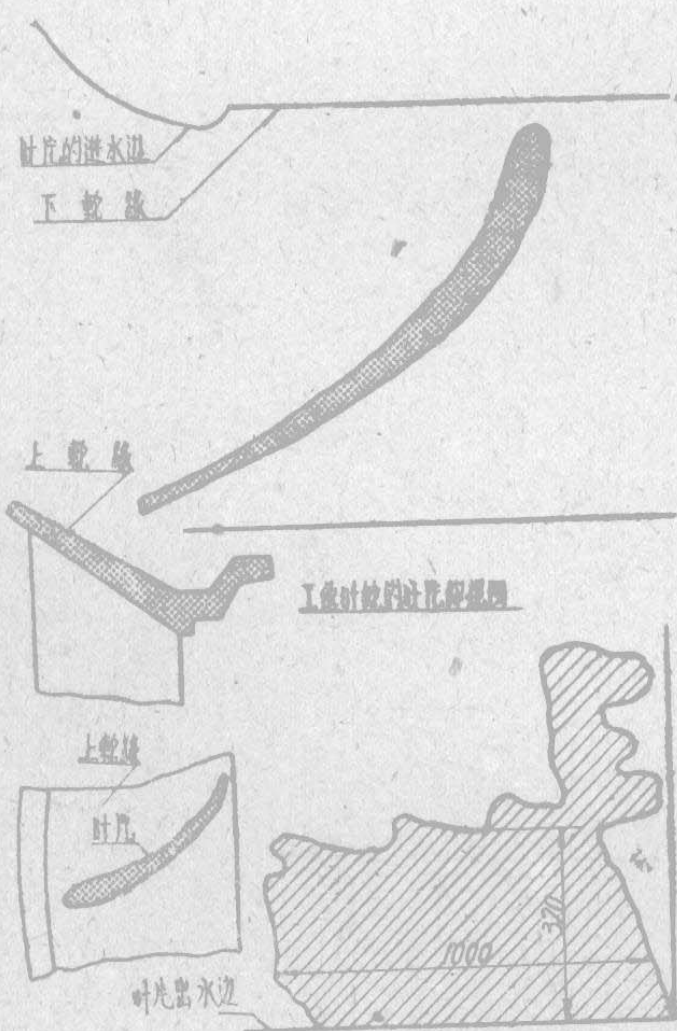


图 15

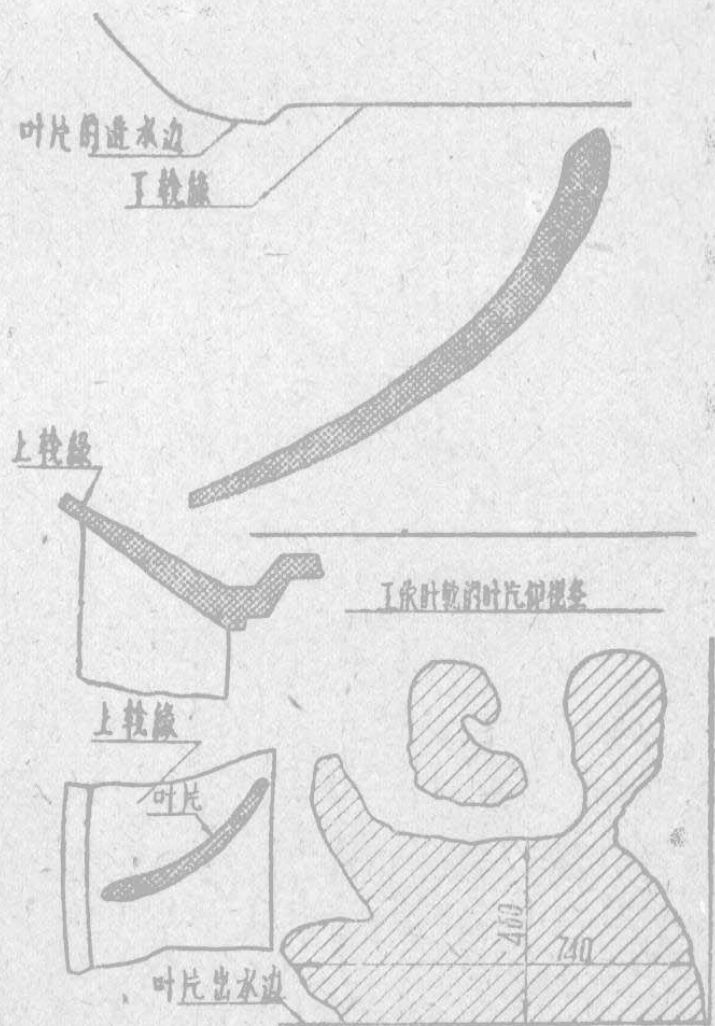


图 16

的**金屬**主要是上次修理時堆焊的**金屬**。在兩次修理間的一年期限內，很多工作葉輪由于**氣蝕**而損失的**金屬**達400公斤，大約為工作葉輪全部重量的0.5%。如果工作葉輪的計算功率更大，在其工作負荷不滿的期間，對於用**碳鋼**或者**低合金鋼**做的葉輪，如果又沒有表面防護，是會受到更加嚴重的**氣蝕**破壞。

德聶伯河水電站的資料說明須要修復的損傷面積和破壞深度很大，（有時達30—40 mm），這樣要用很大的工作量和化很多的時間才能來修復好。水輪機組的停工會造成電能的損失，从而使國家遭受數百萬盧布的損失。很明顯 30-Л鋼不能滿足工作葉輪材料的要求。因此，探索延長兩次修理之間的期限的可能，即提高工作葉輪耐**氣蝕**壽命是一項非常重要的問題。

III 耐**氣蝕**的低合金鋼的探索

在研究合金元素對 18ДГC-Л* **錳**鋼性能影響的工作中，我們研究過加鉻對上述鋼的影響。曾經在小截面鑄件上獲得很好的機械性能，鑄件的化學成份如后：

C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cu %	Cr %
0.15	0.63	1.31	0.026	0.020	1.50	1.53

用這種鋼做的試棒抗**氣蝕**強度也很高。檢驗抗**氣蝕**強度所用的儀器為磁致變形振盪器，三小時的重量損失等於43.3毫米。可是對於18ДГC-Л鋼，重量損失等於56.6毫克（試棒硬度等於207—229H_B）。但是這些數據不僅不是以將上述成份的鋼提交工業採用，就是提交工業試用也是不夠的。

在水輪機製造中採用能滿足技術條件規定的機械強度同時又有良好的耐**氣蝕**性能與可焊性的低合金鋼的發展遠景是非常吸引人的，以致有必要對獲得這樣不含**鎳**的便宜鋼材進行詳細的探索研究。

以前我們所研究出用來製造大功率迴轉葉片水輪機葉片的18ДГC-Л鋼，在工作葉輪使用中已經講清，這種鋼僅能滿足**氣蝕**規範較小的水電站（伊爾庫茨克水電站，卡馬河水電站，安茨克水電站等）的耐**氣蝕**性的要求。象考荷夫斯克水電站工作條件非常壞的情況下，18ДГC-Л鋼會受到很大的**氣蝕**破壞。不過即使是高穩定的材料，象1X18H9T鋼在考荷夫斯克水電站的水輪機組中已受到破壞，可是在其他水電站這樣的情況就沒有產生。

最好能使18ДГC-Л鋼的耐**氣蝕**性有某些提高，因為這種鋼流動性很大，這對於成形鑄件非常重要。另外這種鋼不含稀有元素，但是它能滿足強度要求。

* №20—109課題總結報告“銅，**鎳**，磷對製造葉片用的低合金鋼性質的影響研究”1954年9月。

對在試驗室里做的含鉻的錳硅銅鋼鑄件的性能與 金相組織的研究

最好能對如此複雜加合金元素的必要性進行檢驗，可能的話，最好放棄某些元素（Si及Mn），而僅加入銅和鉻。

應該同時校核鋼在複雜的合金化時鋼的性能，以便降低所有合金元素以及碳的含量範圍。

根據這樣的要求提出試驗室里感應熔鍊時各元素含量範圍如下：

編 號	元 素 含 量 %						
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu
1	0.14—0.20	0.6—0.8	1.0—1.3	最大 0.03	最大 0.03	1.0—1.5	1.2—1.5
2	0.13—0.19	0.2—0.4	0.2—0.4	最大 0.03	最大 0.03	1.0—1.5	1.2—1.5
3	0.14—0.20	0.3—0.5	0.3—0.5	最大 0.03	最大 0.03	1.0—1.5	1.2—1.5
4	0.13—0.19	0.6—0.8	0.9—1.2	最大 0.03	最大 0.03	0.9—1.2	0.9—1.2

金屬澆注用的鑄型為梅花砂型。

表3的數據為梅花形金屬經過退火，正火與回火後的機械試驗結果。

研究一下試驗室鑄件機械性能的試驗結果，就會很清楚看出同時加入少量的硅，錳，銅，鉻含金元素的鋼具有很多優點。這種鋼的強度性能的水平很高。由於它具有良好而且穩定的塑性，有必要對它作進一步的深入研究。圖17為這種鋼經過表3規定的熱處理後的顯微組織。

圖中的顯微組織為均勻的細晶組織。這種鋼的珠光體為索氏體型的組織結構。

表 3

爐号	化 学 成 份 %						热处理	机 械 性 質			
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	σ_s 公斤/平方毫米	σ_B 公斤/平方毫米	$\delta\%$	α_k 公 斤 / 平 方 公 尺 / 厘 米
2611	0.20	0.75	1.02	0.019	0.025	1.40	1.17	69.5	88.1	14.4	6.3-2.6-
								68.5	85.3	15.2	-3.0-9.4-
								71.6	88.4	15.4	-4.2-3.6-
								72.9	85.2	14.2	-3.7-4.2
								70.7	86.75	14.8	4.6
2626	0.18	0.25	0.36	0.026	0.025	1.23	1.32	47.1	64.8	20.2	8.4-5.2-
								49.0	65.0	16.2	-7.0-7.9-
								48.8	62.9	21.4	-6.4-6.3-
								49.0	64.9	12.8	-5.8-7.1
								48.5	64.4	17.6	6.8
2627	0.20	0.40	0.44	0.024	0.018	1.22	1.56	48.6	65.1	21.4	6.1-6.6-
								49.2	65.8	22.0	-6.3-7.2-
								49.6	65.6	22.4	-4.5-6.7-
								48.9	65.1	22.0	-6.1-6.1
								49.1	65.4	21.95	6.2
275	0.16	0.70	1.19	0.024	0.015	1.05	1.20	43.6	61.1	25.8	10.8-9.1-
								42.7	60.9	22.0	12.5-10.7
								44.0	60.6	28.0	11.3-10.8
								43.3	60.6	24.2	12.8-12.2
								43.5	60.6	26.2	
								43.3	60.8	25.8	
								43.4	60.8	25.3	11.3
								43.4	60.8	25.3	46.5

半工業鑄件里16ДХГС-Л錳硅銅鉻鋼的性能研究

下述成份的鋼是在半吨电弧爐內煉成，用砂型注成截面為200毫米的鋼板。
煉出來的鋼成份：

爐 号	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cr %	Cu %
Д6—161	0.17	0.80	1.08	0.0130	0.017	1.20	0.86

鋼板經過900°退火和900°正火后，再經600°的回火。在正火前，先把鋼板縱切成兩塊。兩塊正火前加熱和加熱后冷卻都在同樣條件下進行。回火時裝料情況相同，但是在600°保溫（6小時）結束後，一塊鋼板拿出放在水里冷卻，而另外一塊隨爐冷。

表4為用鋼板金屬做的試棒所作的機械試驗結果。

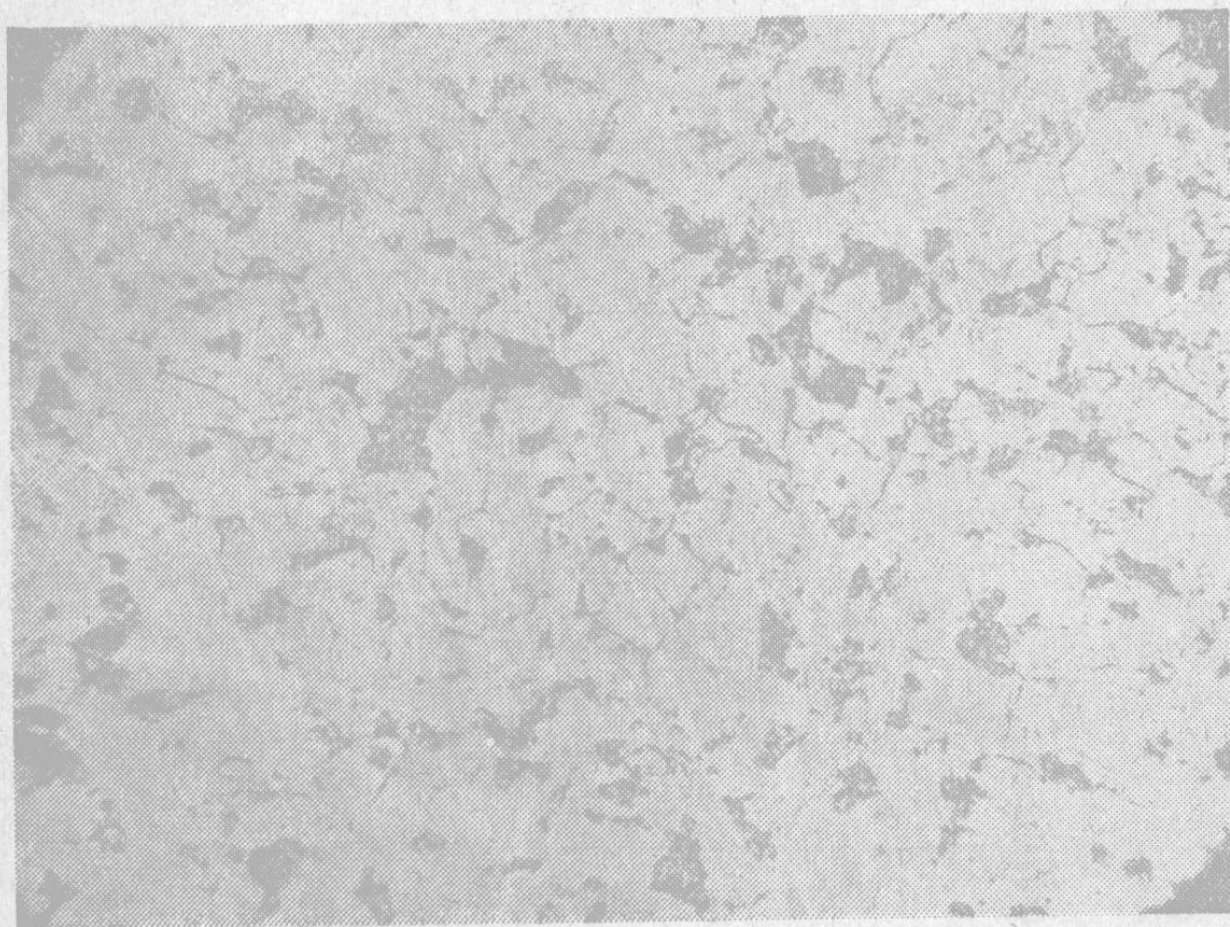


图 17

由于試驗所用的試棒數量很大，從而這種鋼的機械性能的穩定性評定是有力的。
鋼的給定化學成份能可靠地保證屈服極限不低于36公斤/平方毫米和強度極限不低于61公斤/平方毫米。

如果塑性性能很好，顯見這種鋼對回火脆性有些敏感。由回火時炸冷的鋼板做的試棒的沖擊韌性比第二塊水冷鋼板的金屬大約要低10%。可是這種鋼的韌性儲備相當大，降低了10%仍然能保持在高于9公斤·公尺/平方厘米的水平。

經過研究過的鋼板的金屬用磁致變形振盪器作過耐氣蝕性能的試驗。

試驗的結果都列在表4內。

在半吨的电爐里煉第二爐鋼的目的是為了研究16ДХГС-Л鋼對正火與淬火時冷卻速度的敏感性和回火在形成鋼的組織與調整機械性能中的作用。