



**GH33**

**镍基高温合金**

**大冶钢厂**

**钢研所**

**1981年**

# 前 言

GH33合金是以Ni、Cr为基，添加Al、Ti进行时效强化的Ni基合金。

GH33合金是五十年代按照苏联Эu4376合金仿制的，所有化学成份，机械性能及组织等技术要求均按苏联ЧМТУ5211—55的要求。二十年来的生产实践证明：其中有些要求已经不尽合理。苏联在这期间，在生产和试验的基础上对合金的化学成份及其它技术要求都作了一些改进。有鉴于此冶金部于1973年以研究课题下达我厂，要求对GH33合金进行研究，为修订技术条件作好准备工作。据此，我们对合金的化学成份（主要是C、Al、Ti），热处理工艺及晶粒度等进行了研究，并于1974年11月及1975年6月曾经两次召开有关生产GH33合金的冶金厂参加的专门会议进行讨论，并对技术条件的修改提出了具体意见。

苏联开始采用电炉单炼生产Эu4376合金，以后又发展了其它工艺。我国在仿制初期也是采用电炉单炼工艺，以后各厂在试验的基础上又发展了电炉加电渣、电炉加自耗以及非真空感应炉加电渣等双联工艺。由于冶炼工艺的改进，相应的对热加工工艺、热处理工艺及模锻工艺也要进行改进，为此在这些方面进行了一些工作。

另外在生产过程中也遇到一些质量问题，对于这些质量问题也进行了一些试验研究工作。

本专集就是将上述几方面的工作总结进行整理归纳刊印成册，便于大家在今后的工作中参考。

由于我们水平有限，工作也做得不够深透，错误在所难免，望大家阅后及时批评指出。

编 者 1981年7月

# 目 录

- 1.成份对GH33合金组织与性能的影响..... ( 1 )
- 2.GH33合金中的相及其溶解析出规律..... ( 15 )
- 3.热处理制度对GH33合金棒材组织与性能的影响..... ( 34 )
- 4.不同冶炼工艺的GH33合金棒材组织与性能..... ( 52 )
- 5.GH33合金晶粒度的影响..... ( 71 )
- 6.GH33合金裂纹的研究..... ( 79 )
- 7.氢、镁对GH33合金700°C拉伸塑性的影响..... ( 91 )
- 8.对GH33合金棒材现行技术条件的修改意见及  
试车料全面性能.....(100)
- 9.GH33合金相分析.....(105)



# 成份对GH33合金棒材组织与性能的影响

## 摘 要

本文研究了C、Al、Ti、Ce对GH33合金棒材组织与性能的影响。认为对于电弧炉加电渣工艺生产的棒材合金中C的上限提高到0.08~0.10%，Al为0.60~1.2%，Ti为2.3~2.9%比较合适。微量Ce对持久性能影响较大，而对700℃拉伸性能影响不大。

GH33是以金属间化合物 $\gamma'$ 相强化的镍基合金。其合金化程度低，但使用比较广泛。在航空发动机中主要作为700℃以下工作的涡轮转子叶片和涡轮盘材料。

该合金为77Ni—20Cr—2.5Ti—0.8Al—B，77%Ni与20%Cr形成单一奥氏体的基体，同时Cr也可提高固溶体的原子间结合力，降低原子的扩散速度。特别是Ni、Cr与氧结合成致密的所谓尖晶石结构的 $\text{NiO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ 氧化膜。这种结构的氧化膜，点阵常数小，原子排列紧密，与基体有良好的结合，不易破裂，使基体不易再受氧化，从而保证了GH33合金有极良好的抗氧化性能；加入Al、Ti与Ni形成 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ，是合金的主要强化相；加入少量C形成 $\text{Cr}_2_3\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 碳化物，用以控制晶粒尺寸，并对晶界有一定的强化作用；加入0.01%B，固溶偏聚于晶界并形成 $\text{Cr}_5\text{B}_3$ 对强化晶界都有良好的效果<sup>[1]</sup>。

对于GH33及其同类合金的成份研究，国内外都做过一些工作。但随着生产的发展，特别是采用双联工艺后，合金技术条件所规定的成份范围就显得不够合理了，这就需要对双联工艺下合金的主要成份C、Al、Ti对其组织与性能的影响重新认识，作进一步的研究。

为了进一步试验C、Al、Ti对GH33合金组织与性能的影响，非真空感应炉冶炼四炉GH33，经电渣重熔后锻轧成材，作组织与性能。同时还对电炉加电渣双联工艺大生产中C、Al、Ti对常规性能的影响做了统计分析。

另外，电炉加电渣双联工艺生产的GH33合金棒材，700℃拉伸塑性比电炉单炼或电炉加自耗工艺的低3~6个单位。这三种工艺在做全面性能对比时发现，电炉加电渣工艺棒材的残余Ce含量只有另外二种工艺的1/2~1/3。但由于变化因素较多，对大生产的炉号进行数理统计一来数值范围太窄，二则其它影响因素无法固定，不能对Ce含量的影响做肯定的结论，也就无法在生产中采取措施。为此我们也在小炉子上作了二批不同Ce含量的试验以确定Ce对GH33合金主要性能的影响。

## 一、试验方法

C、Al、Ti影响试验是用430公斤非真空感应炉装料550公斤，冶炼四炉。每炉变动一

个成份，分别浇 $\phi 50\text{mm}$ 电极棒六支。电渣重熔成 $\phi 100\text{mm}$ ，20公斤小锭。锻成40方，轧成 $\phi 22\text{mm}$ 棒材作性能。其中：

C的梯度为0.02、0.04、0.06、0.08、0.12、0.16%（Al、Ti固定）。

Al的梯度为0.5、0.7、0.9、1.1、1.3、1.5、1.7%（C、Ti固定）。

Ti的梯度为1.5、2.0、2.3、2.5、2.7、2.9、3.1%（C、Al固定）。

Ce影响试验在50公斤真空感应炉冶炼，浇25公斤小锭锻成40方，轧制成 $\phi 26\text{mm}$ ，Ce的加入量为0、0.005、0.010、0.030、0.050、0.100%。

在430公斤非真空感应炉装500公斤全返回料，调整成份后，分五次插Ce，分别浇成65公斤小锭6支，锻成60方，取样分析成份、气体及700℃拉伸。轧成 $\phi 26\text{mm}$ 后作主要性能。Ce加入量为0、0.010、0.025、0.050、0.075、0.100%。

拉伸、持久、冲击均为标准试样，按标准试验方法进行。

金相、电镜试片的腐蚀、相分析试剂等见“GH33合金中的相及其溶解析出规律”一文。

性能试样均经1080℃8小时空冷+700℃16小时空冷处理。

试验炉号测定的性能数据皆为2~4个试样的平均值。

## 二、试验结果

### 1. 炭含量对组织与性能的影响

①试验炉号测定的炭含量对700℃拉伸、700℃44kg/mm<sup>2</sup>持久、室温硬度、晶粒平均直径的影响示于图1。对 $\gamma'$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6 + \text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{TiC} + \text{Ti}(\text{CN})$ 含量的影响示于图2。它们的具体数值列于表1。

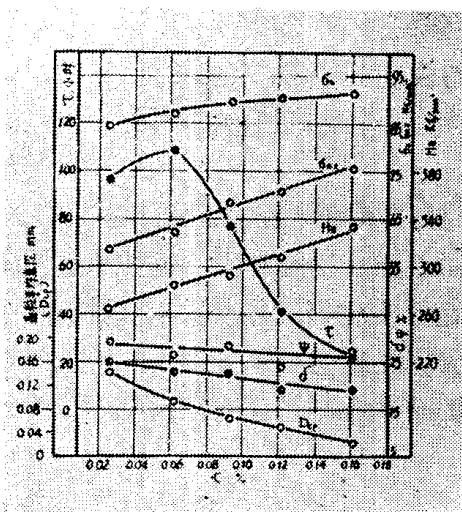


图1 炭含量对常规性能及晶粒平均尺寸的影响

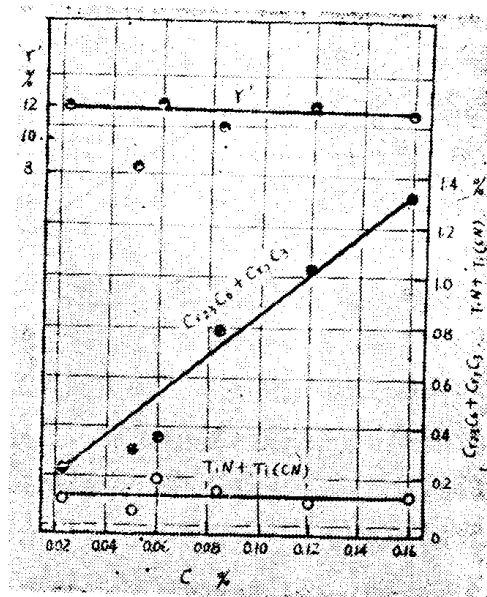


图2 炭含量对第二相含量的影响

表 1 炭含量对常规性能、晶粒尺寸及相成份的影响 (Al: 1.05%, Ti: 2.4%左右)

| 炉号    | C<br>% | 700°C 拉伸                 |                            |        |        | 700°C<br>44kg/mm <sup>2</sup><br>光滑持久<br>(τ小时) | 压痕<br>直径<br>DHB<br>mm | 平均晶<br>粒直径<br>mm | 碳化物量 %   |                    | r'相 % |      |      |      |       |       |
|-------|--------|--------------------------|----------------------------|--------|--------|--|-----------------------|------------------|--|--------------------|-------|------|------|------|-------|-------|
|       |        | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | B0.2<br>kg/mm <sup>2</sup> | δ<br>% | ψ<br>% |  |                       |                  | M <sub>23</sub> C <sub>6</sub><br>+<br>M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> | TiC<br>+<br>Ti(NC) | Ni    | Ti   | Al   | Cr   | Fe    | 总量    |
| 32—75 | 0.022  | 84.9                     | 58.7                       | 25.0   | 29.2   | 96: 25   | 3.72                  | 0.143            | 0.24   | 0.11               | 9.5   | 1.42 | 0.62 | 0.58 | 0.052 | 12.17 |
| 42—61 | 0.049  | 89.0                     | —                          | 24.7   | 24.5   | 97: 23   | —                     | —                | 0.31   | 0.07               | 6.7   | 1.11 | 0.46 | 0.53 | 0.030 | 8.83  |
| 32—76 | 0.060  | 87.2                     | 62.4                       | 23.0   | 26.6   | 109: 57  | 3.60                  | 0.094            | 0.36   | 0.20               | 9.41  | 1.41 | 0.63 | 0.68 | 0.055 | 12.19 |
| 32—77 | 0.086  | 89.7                     | 68.5                       | 22.8   | 28.6   | 77: 27   | 3.56                  | 0.068            | 0.79   | 0.15               | 8.38  | 1.35 | 0.53 | 0.69 | 0.052 | 11.00 |
| 32—78 | 0.120  | 90.1                     | 71.0                       | 19.4   | 24.2   | 40: 47   | 3.46                  | 0.053            | 1.04   | 0.11               | 9.14  | 1.46 | 0.59 | 0.99 | 0.058 | 12.24 |
| 32—79 | 0.160  | 91.4                     | 75.7                       | 19.8   | 27.2   | 23: 25   | 3.34                  | 0.027            | 1.33   | 0.13               | 8.95  | 1.21 | 0.62 | 0.95 | 0.064 | 11.79 |

②大生产中炭含量对700℃拉伸及室温硬度影响的统计结果列于表2

表 2

| C 含量 %      | 统计试样数 | 压痕直径<br>DHB<br>mm | 700℃ 拉 伸              |       |        |
|-------------|-------|-------------------|-----------------------|-------|--------|
|             |       |                   | Бb kg/mm <sup>2</sup> | ε %   | ψ %    |
| ≤0.035      | 81    | 3.67              | 80.64                 | 21.37 | 22.795 |
| 0.036~0.040 | 241   | 3.65              | 81.02                 | 21.10 | 22.21  |
| 0.041~0.045 | 360   | 3.633             | 82.23                 | 21.54 | 22.74  |
| 0.046~0.050 | 276   | 3.629             | 82.79                 | 21.35 | 22.88  |
| 0.051~0.055 | 125   | 3.614             | 83.54                 | 21.70 | 23.35  |
| 0.056~0.060 | 32    | 3.59              | 84.58                 | 20.50 | 22.815 |
| >0.060      | 3     | 3.51              | 87.40                 | 20.60 | 20.17  |

试验结果表明,随着炭含量的增加,铬的碳化物总量不断增加,晶粒不断细化,而r'相与TiC、Ti(CN)无明显变化。700℃拉伸强度,特别是屈服强度、室温硬度不断提高,塑性略有下降,持久性能在含炭0.06%时出现峰值。

低倍组织观察表明,电渣重熔大大改善了合金的低倍组织。炭含量直到0.12%以上,才出现碳化物带状。

从统计结果看出,在标准范围之内(≤0.06%)随着炭含量的增加,室温硬度及700℃拉伸强度增加,而δ与ψ无明显变化。

## 2. Al、Ti含量对组织与性能的影响

①试验炉号Al对GH33合金常规性能及r'相含量的影响见图3及表3。对组织的影响见图4。

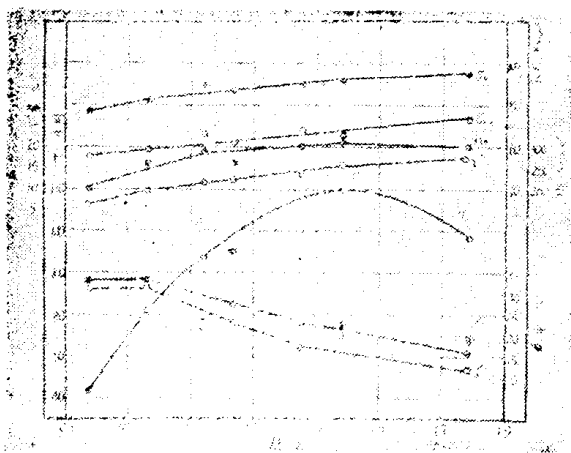


图3 Al含量对常规性能及r'相含量的影响

表 3 Al含量对常规性能及 $\gamma'$ 相含量的影响 (C : 0.065%, Ti2.4%)

| 炉号    | Al<br>% | 压痕直径<br>DHB<br>mm | 700 °C 拉 伸               |                            |            |          | *700°C<br>44kg/mm <sup>2</sup><br>光滑持久<br>$\tau$ (小时) | r' 相 % |      |      |      |       |
|-------|---------|-------------------|--------------------------|----------------------------|------------|----------|---|--------|------|------|------|-------|
|       |         |                   | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | B0.2<br>kg/mm <sup>2</sup> | $\delta$ % | $\psi$ % |   | Ni     | Cr   | Ti   | Al   | 总量    |
| 32—84 | 0.57    | 3.76              | 76.7                     | 55.6                       | 31.2       | 32.5     | 41; 35  | 4.20   | 0.66 | 0.81 | 0.26 | 5.97  |
| 32—82 | 0.76    | 3.60              | 82.3                     | 58.8                       | 31.8       | 33.0     | 76; 30  | 6.75   | 0.68 | 1.19 | 0.62 | 9.28  |
| 32—83 | 0.94    | 3.54              | 89.3                     | 66.4                       | 22.2       | 24.3     | 107; 13   | 8.71   | 0.71 | 1.39 | 0.62 | 11.47 |
| 32—76 | 1.03    | 3.60              | 87.2                     | 62.4                       | 23.0       | 26.6     | 109; 55   | 9.41   | 0.68 | 1.41 | 0.63 | 12.19 |
| 32—81 | 1.25    | 3.50              | 89.7                     | 68.2                       | 17.4       | 22.9     | 106; 25   | 10.75  | 0.71 | 1.55 | 0.70 | 13.76 |
| 32—85 | 1.38    | 3.46              | 92.0                     | 66.6                       | 20.4       | 22.5     | 139; 48   | 12.17  | 0.85 | 1.64 | 0.86 | 15.58 |
| 32—86 | 1.78    | 3.51              | 94.8                     | 73.2                       | 12.0       | 16.1     | 117; 38   | 13.56  | 0.92 | 1.75 | 0.83 | 17.11 |

\*持久拉到100小时后，加5Kg/mm<sup>2</sup>应力至断。

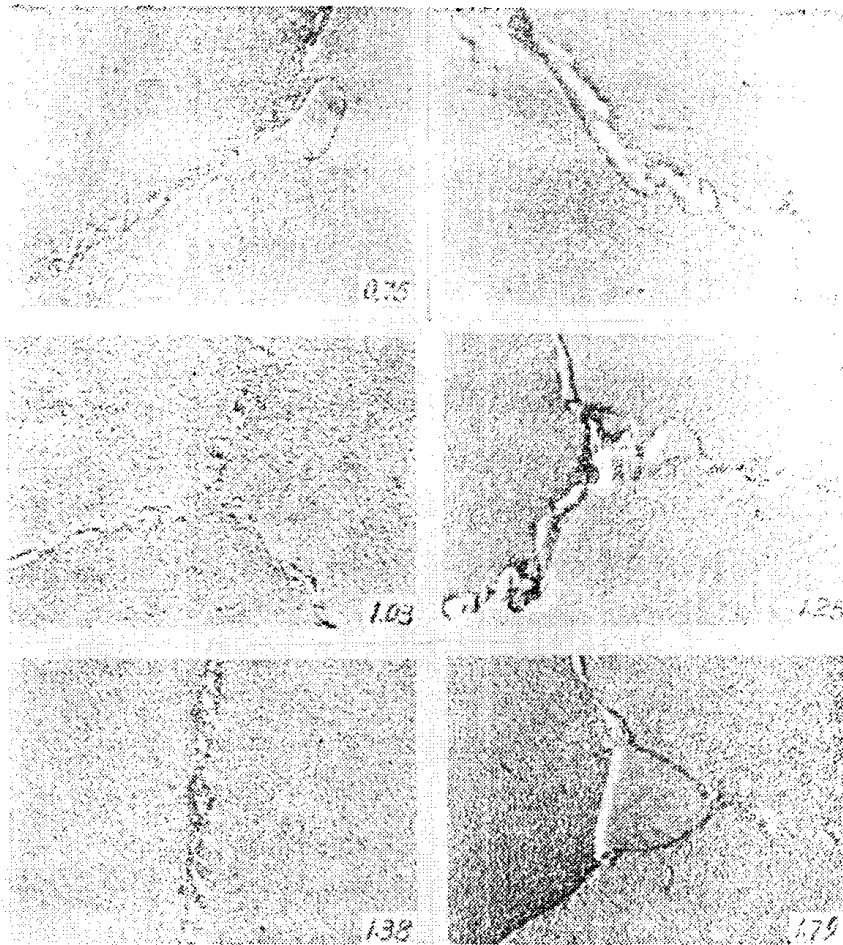


图 4 不同Al含量的显微组织 ×8000



②大生产中Al含量对常规性能影响的统计结果列于表4。

表4

| 统计炉数 | Al % | C %   | Ti % | 700°C 拉伸                 |      |      | 持久合格率<br>(按YB510-65)<br>% | δ、ψ合格率<br>(按YB510-65)<br>% |
|------|------|-------|------|--------------------------|------|------|---------------------------|----------------------------|
|      |      |       |      | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | δ %  | ψ %  |                           |                            |
| 1    | 0.52 | 0.034 | 2.55 | 81.0                     | 24.5 | 22.0 | 0                         | 100                        |
| 1    | 0.62 | 0.047 | 2.60 | 79.0                     | 25.6 | 26.0 | 0                         | 100                        |
| 2    | 0.65 | 0.044 | 2.56 | 79.5                     | 20.3 | 24.0 | 50                        | 100                        |
| 7    | 0.70 | 0.045 | 2.56 | 82.6                     | 22.0 | 23.7 | 85.7                      | 100                        |
| 14   | 0.75 | 0.045 | 2.54 | 81.3                     | 22.9 | 24.2 | 92.9                      | 92.9                       |
| 14   | 0.81 | 0.046 | 2.56 | 82.8                     | 20.6 | 22.6 | 100                       | 92.9                       |
| 39   | 0.85 | 0.046 | 2.56 | 82.0                     | 21.6 | 23.1 | 100                       | 92.3                       |
| 21   | 0.90 | 0.047 | 2.56 | 83.3                     | 20.9 | 21.3 | 100                       | 85.7                       |
| 15   | 0.94 | 0.047 | 2.57 | 81.8                     | 20.6 | 22.0 | 100                       | 66.7                       |
| 7    | 1.00 | 0.046 | 2.54 | 84.4                     | 23.2 | 24.0 | 100                       | 100                        |
| 5    | 1.05 | 0.045 | 2.54 | 85.6                     | 22.5 | 23.1 | 100                       | 80                         |
| 1    | 1.27 | 0.042 | 2.59 | 76.6                     | 20.0 | 22.6 | 100                       | 100                        |
| 2    | 1.31 | 0.044 | 2.53 | 91.7                     | 19.7 | 22.2 | 100                       | 100                        |

③试验炉号Ti对GH33合金常规性能及r'相含量的影响见图5及表5。

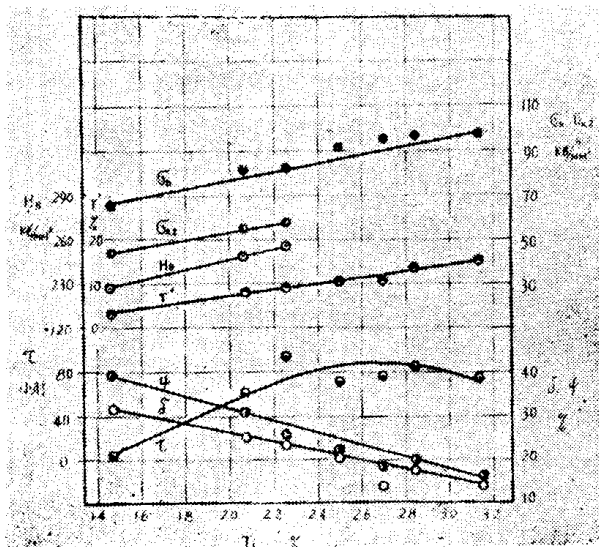


图5 Ti含量对常规性能及r'含量的影响

表 5 Ti含量对常规性能及 $\gamma'$ 相含量的影响 (C:0.065%、Al:1.05%)

| 炉号    | Ti<br>% | 压痕直径<br>DHB<br>mm | 700℃ 拉 伸                 |                            |            |          | 700℃<br>44kg/mm <sup>2</sup><br>光滑持久<br>$\tau$ (小时) | r' 相  |      |      |      |       |
|-------|---------|-------------------|--------------------------|----------------------------|------------|----------|---|-------|------|------|------|-------|
|       |         |                   | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | B0.2<br>kg/mm <sup>2</sup> | $\delta$ % | $\psi$ % |   | Ni    | Cr   | Ti   | Al   | 总量    |
| 32—87 | 1.48    | 4.00              | 67.0                     | 44.3                       | 32.40      | 39.20    | 7: 35   | 2.39  | 0.57 | 0.32 | 0.23 | 3.54  |
| 32—90 | 2.08    | 3.70              | 82.1                     | 56.3                       | 24.80      | 31.60    | 62: 50  | 6.58  | 0.64 | 0.97 | 0.54 | 8.78  |
| 32—91 | 2.27    | 3.62              | 82.5                     | 58.7                       | 23.80      | 25.70    | 94: 18  | 6.92  | 0.70 | 1.06 | 0.51 | 9.22  |
| 42—65 | 2.51    | —                 | 90.2                     | —                          | 21.00      | 21.50    | 69: 02  | 8.21  | 0.63 | 1.20 | 0.62 | 10.70 |
| 42—63 | 2.71    | —                 | 95.0                     | —                          | 14.20      | 17.50    | 77: 07  | 8.19  | 0.66 | 1.33 | 0.62 | 10.85 |
| 42—64 | 2.85    | —                 | 96.0                     | —                          | 18.00      | 20.00    | 87: 05  | 10.07 | 0.84 | 1.59 | 0.67 | 13.23 |
| 42—62 | 3.15    | —                 | 97.7                     | —                          | 14.50      | 15.50    | 73: 22  | 12.09 | 1.08 | 1.78 | 0.66 | 15.67 |

④大生产中Ti含量对常规性能影响的统计结果列于表6。

表 6

| 统计<br>炉数 | Ti<br>% | C<br>% | Al<br>% | 700℃ 拉 伸                 |            |          | 持久合格率<br>(按YB510—65)<br>% | $\delta$ 、 $\psi$ 合格率<br>(按YB510—65)<br>% |
|----------|---------|--------|---------|--------------------------|------------|----------|---------------------------|---|
|          |         |        |         | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | $\delta$ % | $\psi$ % |                           |   |
| 1        | 2.28    | 0.029  | 0.87    | 76.5                     | 27.0       | 26.0     | 0                         | 100                                       |
| 7        | 2.36    | 0.044  | 0.82    | 80.9                     | 23.6       | 23.9     | 42.9                      | 100                                       |
| 12       | 2.41    | 0.044  | 0.84    | 78.5                     | 23.1       | 23.7     | 75.0                      | 100                                       |
| 24       | 2.45    | 0.043  | 0.84    | 78.2                     | 21.9       | 23.0     | 87.5                      | 95.8                                      |
| 20       | 2.50    | 0.045  | 0.86    | 80.9                     | 23.5       | 23.5     | 95.0                      | 90.9                                      |
| 18       | 2.56    | 0.045  | 0.84    | 84.6                     | 24.5       | 23.9     | 100                       | 100                                       |
| 56       | 2.61    | 0.046  | 0.84    | 83.2                     | 23.3       | 24.4     | 100                       | 96.4                                      |
| 52       | 2.65    | 0.045  | 0.85    | 84.2                     | 22.6       | 24.1     | 100                       | 96.2                                      |
| 32       | 2.70    | 0.047  | 0.83    | 83.1                     | 22.1       | 23.4     | 96.9                      | 96.9                                      |
| 7        | 2.74    | 0.048  | 0.83    | 85.4                     | 22.5       | 25.4     | 100                       | 100                                       |
| 4        | 2.80    | 0.045  | 0.84    | 82.5                     | 20.1       | 21.5     | 100                       | 75.0                                      |

⑤大生产中Al+Ti含量对常规性能影响的统计结果见表7及图6。

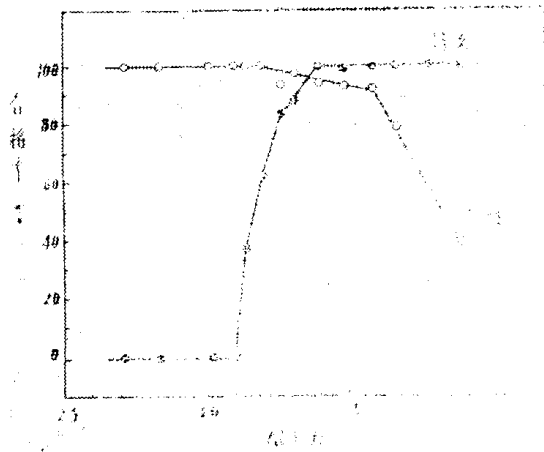


图 6 Al+Ti对持久及拉伸塑性合格率的影晌

表 7

| 统计炉数 | Al+Ti<br>% | C<br>% | Al<br>% | Ti<br>% | 700°C 拉 伸                |      |      | 持久合格率<br>(按YB510—65)<br>% | δ、ψ合格率<br>(按YB510—65)<br>% |
|------|------------|--------|---------|---------|--------------------------|------|------|---------------------------|----------------------------|
|      |            |        |         |         | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | δ %  | ψ %  |                           |                            |
| 1    | 2.71       | 0.050  | 0.58    | 2.13    | 74.0                     | 31.2 | 33.5 | 0                         | 100                        |
| 1    | 2.83       | 0.044  | 0.76    | 2.07    | 74.3                     | 32.8 | 32.0 | 0                         | 100                        |
| 5    | 3.01       | 0.041  | 0.61    | 2.40    | 75.2                     | 28.4 | 28.0 | 0                         | 100                        |
| 5    | 3.10       | 0.035  | 0.60    | 2.50    | 78.8                     | 25.2 | 23.3 | 0                         | 100                        |
| 8    | 3.14       | 0.040  | 0.72    | 2.42    | 78.7                     | 22.3 | 22.7 | 37.5                      | 100                        |
| 8    | 3.20       | 0.044  | 0.74    | 2.46    | 79.9                     | 23.0 | 22.6 | 62.5                      | 100                        |
| 30   | 3.26       | 0.042  | 0.79    | 2.47    | 81.2                     | 23.9 | 24.2 | 83.3                      | 93.0                       |
| 52   | 3.31       | 0.044  | 0.82    | 2.49    | 79.5                     | 22.4 | 23.3 | 88.5                      | 98.1                       |
| 129  | 3.40       | 0.045  | 0.84    | 2.56    | 82.6                     | 22.7 | 23.6 | 100                       | 94.6                       |
| 142  | 3.49       | 0.046  | 0.87    | 2.62    | 83.5                     | 22.3 | 23.7 | 99.3                      | 93.7                       |
| 58   | 3.58       | 0.047  | 0.92    | 2.66    | 84.6                     | 21.7 | 23.4 | 100                       | 93.1                       |
| 14   | 3.67       | 0.047  | 0.96    | 2.71    | 85.6                     | 22.0 | 24.2 | 100                       | 78.6                       |
| 4    | 3.79       | 0.047  | 1.12    | 2.67    | 89.5                     | 17.7 | 18.1 | 100                       | 25.0                       |
| 5    | 3.89       | 0.046  | 1.19    | 2.70    | 83.2                     | 17.0 | 19.9 | 100                       | 40.0                       |
| 5    | 4.00       | 0.046  | 1.26    | 2.74    | 92.0                     | 18.8 | 21.4 | 100                       | 80.0                       |

从表 3—7、图 3—6 的结果看出，随着Al或Ti含量的增加，合金中的r'含量逐渐增

多, 700℃拉伸强度及室温硬度逐渐提高而700℃拉伸塑性逐渐下降。700℃持久性能在 Al 与Ti的试验范围内都有一个峰值, 当含Ti 2.4%时, Al 1.4%出现峰值。当含Al 1.05%时, 含Ti>2.9%时持久性能开始下降。

统计结果表现出了与上述相同的规律, 仅具体数值有些差异。当Al+Ti≤3.1%时持久性能全部不合格。而Al+Ti≥3.4%, 持久性能基本上全部合格。但Al+Ti>3.2%之后, 拉伸塑性出现不合格现象。

不同Al、Ti含量的组织观察看出, 随着Al或Ti含量的提高, 合金中的r'颗粒逐渐增大(图4)。

### 3. Ce含量对GH33合金组织与性能的影响

#### ①真空感应炉冶炼:

#### (1)化学成份(重量%, 分析结果)

表 8

| 炉 号 | Ce    |        | C     | Al   | Ti   | Cr    | B      | S     |
|-----|-------|--------|-------|------|------|-------|--------|-------|
|     | 加入量   | 分 析    |       |      |      |       |        |       |
| 157 | 0     | <0.001 | 0.053 | 0.90 | 2.72 | 20.01 | 0.0094 | 0.002 |
| 158 | 0.005 | <0.001 | 0.050 | 0.91 | 2.79 | 20.42 | 0.0061 | 0.002 |
| 159 | 0.010 | 0.0015 | 0.047 | 0.86 | 2.73 | 20.42 | 0.0067 | 0.002 |
| 160 | 0.030 | 0.015  | 0.052 | 0.88 | 2.75 | 20.18 | 0.0063 | 0.002 |
| 161 | 0.050 | 0.018  | 0.053 | 0.80 | 2.70 | 20.10 | 0.0058 | 0.002 |
| 162 | 0.100 | 0.066  | 0.053 | 0.82 | 2.66 | 20.06 | 0.0064 | 0.002 |

#### (2)气体含量

表 9

| 炉 号 | N <sub>2</sub> % | H <sub>2</sub> CC/100g |
|-----|------------------|------------------------|
| 157 | 0.0066           | 0.606                  |
| 158 | 0.0080           | 0.683                  |
| 159 | 0.0082           | 0.903                  |
| 160 | 0.0093           | 0.845                  |
| 161 | 0.0053           | 0.520                  |
| 162 | 0.0090           | 0.580                  |

#### (3)主要性能

表10

| 炉号  | 700 °C 拉 伸               |                            |      |      | 700 °C 44kg/mm <sup>2</sup> 持久 |     | 冲击kg—m/cm <sup>2</sup> |        |
|-----|--------------------------|----------------------------|------|------|--------------------------------|-----|------------------------|--------|
|     | Bb<br>kg/mm <sup>2</sup> | B0.2<br>kg/mm <sup>2</sup> | δ %  | ψ %  | τ<br>时:分                       | δ % | 20 °C                  | 700 °C |
| 157 | 85.1                     | 63.8                       | 17.1 | 18.8 | 84: 22                         | 6.2 | 6.15                   | 6.48   |
| 158 | 87.1                     | 63.5                       | 17.9 | 18.6 | 117: 28                        | 9.0 | 6.40                   | 8.05   |
| 159 | 86.0                     | 63.1                       | 19.0 | 21.1 | 119: 45                        | 6.6 | 7.00                   | 8.10   |
| 160 | 86.4                     | 61.5                       | 20.3 | 23.1 | 125: 30                        | 9.2 | 6.75                   | 8.40   |
| 161 | 83.6                     | 60.3                       | 16.4 | 24.1 | 45: 18                         | 3.8 | 6.55                   | 7.90   |
| 162 | 86.0                     | 61.1                       | 17.9 | 20.5 | 63: 53                         | 6.5 | 6.55                   | 8.30   |

②非真空感应炉冶炼:

(1)化学成份(重量%, 分析结果)

表11

| 锭号 | Cc %  |       | C %   | Al % | Ti % | Cr %  | B %    | S %   |
|----|-------|-------|-------|------|------|-------|--------|-------|
|    | 加入量   | 分析量   |       |      |      |       |        |       |
| 1  | 0     | —     | 0.034 | 0.61 | 2.29 | 20.82 | 0.0064 | 0.002 |
| 2  | 0.010 | 0.013 | 0.030 | 0.61 | 2.29 | —     | —      | —     |
| 3  | 0.025 | 0.025 | 0.033 | 0.64 | 2.29 | —     | —      | —     |
| 4  | 0.050 | 0.080 | 0.032 | 0.65 | 2.29 | —     | —      | —     |
| 5  | 0.075 | 0.089 | 0.028 | 0.67 | 2.33 | —     | —      | —     |
| 6  | 0.100 | 0.114 | 0.040 | 0.68 | 2.35 | 20.78 | 0.0058 | 0.002 |

(2)气体含量

表12

| 锭号 | 60方坯上                  | φ26 材 上          |                        |                  |
|----|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
|    | H <sub>2</sub> cc/100g | N <sub>2</sub> % | H <sub>2</sub> cc/100g | O <sub>2</sub> % |
| 1  | 2.45                   | 0.0107           | 1.51                   | 0.0013           |
| 2  | 2.50                   | 0.0145           | 1.55                   | 0.0005           |
| 3  | 2.80                   | 0.0132           | 1.76                   | 0.0004           |
| 4  | 2.90                   | 0.0148           | 2.07                   | —                |
| 5  | 2.95                   | 0.0142           | 2.07                   | —                |
| 6  | 3.10                   | 0.0148           | 1.88                   | —                |



(3) 主要性能

表 13

| 锭号 | 700 °C 拉 伸               |            |          | 700 °C 44kg/mm <sup>2</sup><br>持久 $\tau$<br>时: 分 |
|----|--------------------------|------------|----------|--|
|    | Eb<br>kg/mm <sup>2</sup> | $\delta$ % | $\psi$ % |  |
| 1  | 86.0                     | 25.8       | 25.8     | 34: 28   |
| 2  | 85.0                     | 28.0       | 25.5     | 84: 57   |
| 3  | 87.8                     | 27.8       | 30.5     | 62: 37   |
| 4  | 85.3                     | 20.8       | 25.5     | 48: 37   |
| 5  | 87.8                     | 23.8       | 23.5     | 48: 53   |
| 6  | 84.5                     | 22.8       | 21.5     | 48: 25   |

注: 拉伸在60方上作, 持久在 $\phi 26$ 上作。

(4) 组织变化

1、2号锭与正常的GH33合金组织没有看出差异。3—6号锭发现一种在正常GH33合金组织中未见到的新相。这种新相在未经腐蚀的试样上隐约可见, 经4gCuSO<sub>4</sub> + 20mlH<sub>2</sub>O + 20mlC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH溶液轻微侵蚀后便腐蚀掉。采用2%HNO<sub>3</sub> + 98%C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH腐蚀后能清晰显示(见图7)。这种新相沿轧制方向有一定的变形量。并随3—6号试样的Ce含量增加而逐渐增加。经X光鉴定为CeNi<sub>5</sub>。

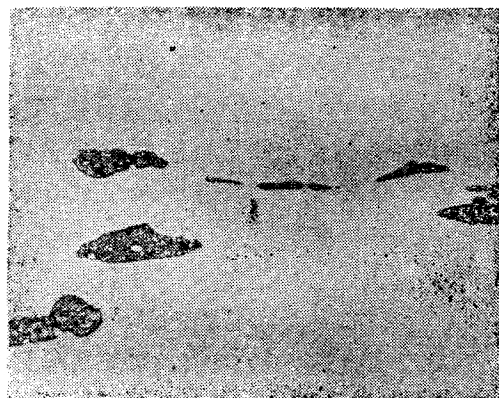


图 7 CeNi<sub>5</sub> × 1000

(6号锭试样经2%硝酸酒精腐蚀)

两种工艺的试验结果都表明, 在试验含量范围内Ce的加入量对持久性能影响较大, 而对高温拉伸强度影响不大。真空工艺做的冲击性能表明, Ce的加入量对室温及高温冲击韧性都没有明显的影响。

两种工艺持久寿命的最大值对应的Ce的加入量虽然不同, 但分析量却是相近的, 都在0.015%左右(0.013与0.015%)。700°C拉伸塑性在加入0.025~0.050%Ce时略有提高。

Ce的分析量 $\geq 0.025\%$ 合金中出现了CeNi<sub>5</sub>相。随着Ce含量的增加, CeNi<sub>5</sub>相的量增

多。此相含量较少时,对700℃拉伸塑性影响不大;含量较高时,拉伸塑性下降较多,CeNi<sub>6</sub>相开始出现后,持久性能便明显变坏。

### 三、结果分析与讨论

1. GH33合金中, C在高温下与Cr形成Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>; 在较低温度下与Cr形成Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>。它们在合金的晶界与晶内都有存在。晶界上铬的碳化物一方面起到了阻碍晶粒长大的作用, 另一方面, 使晶界附近基体Cr的浓度降低, 增加了Al、Ti的溶解度。因而使晶界产生了贫r'区, 降低了蠕变抗力, 对形变产生的晶界附近的集中应力有松弛作用。同时碳化物颗粒本身起到强化相质点的作用, 使裂纹限制在其两者之间, 从而延迟了裂纹的产生和晶界的断裂过程, 提高了合金的持久寿命。

过高的炭含量, 使晶界贫r'区过宽, 晶粒过于细化, 这也会使持久性能降低。另外, 随着炭含量的增加 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>的量相应增多。如果采用电炉单炼或电炉加自耗工艺, 碳化物偏析较严重, 在低倍组织上易出现碳化物带状。而 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>在1080℃并不溶解。经标准热处理时, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>的带状分布会阻碍这一区域的晶粒长大, 在高倍上就会出现细晶粒带状。

过低的炭含量, 晶界碳化物量太少, 不但会降低持久性能, 而且晶粒粗大并难于控制, 使疲劳性能变坏, 给合金带来一系列问题。

因而控制合适的炭含量是十分重要的。对于电弧炉单炼, 有的厂从生产统计中得出C在0.040~0.045%最佳<sup>[2]</sup>、电炉加自耗认为按0.04~0.05%控制最好<sup>[3]</sup>。

从本试验的电炉加电渣与非真空感应炉加电渣得出的结果看出, C在0.06%左右性能最好。由于电渣重熔是一边熔炼, 一边结晶, 大大改善了结晶状态, 使碳化物偏析减少。所以含C量要到0.12%以上棒材低倍组织才出现碳化物带状。同时, 由于重熔过程中, 合金熔滴通过渣层的清洗, 提高了合金的纯洁度, 而使电渣工艺的棒材晶粒长大的倾向比电炉单炼严重<sup>[4]</sup>, 这就需要更多的碳化物来阻止晶粒长大。所以对于电渣工艺生产的GH33合金棒材炭含量的上限由0.06%提高到0.08~0.10是比较合适的。这样既保证性能合格、晶粒细化又便于生产控制, 而不至出现低倍缺陷。至于采用电炉单炼或电炉加自耗工艺, 提高炭的上限, 并不妨碍各自按最佳范围控制炭含量。目前, 英美类似的牌号Nimonic80A与Udimet80A合金的含炭量也都是≤0.10%<sup>[5]</sup>。苏联的ЭИ4376合金含炭量也提高到≤0.07%<sup>[6]</sup>。

2. GH33合金中加入Al、Ti主要是形成r'相。Al、Ti含量对r'相量的影响绘于图8。在图上我们比较一下增加Al和增加Ti引起r'相含量增加的斜率可以看出, 在含Ti2.4%的情况下, 变动Al的含量, 当Al<1.2%时, 其斜率较大; 在含Al>1.2%时其斜率变小。当含Al量固定为1.0%时变化Ti, 其斜率较小。也就是说, 当含Al量<1.2%时, 要增加r'相的含量提高Al比提高Ti更有效。为了说明这一问题, 我们不妨设想成理想状态来看一下, 即增加Al时r'相增量为Ni<sub>3</sub>Al, 增加Ti时r'相增量为Ni<sub>3</sub>Ti。由r'相的成份, 便不难算出, 每增加1%Al, r'相增量为7.5%。而每增加1%Ti时, r'相仅增加4.68%。由表3与表4的试验结果算出, 1%Al的r'相实际平均增量为10.45%; 而1%Ti的平均r'相增量为7.18%。理论值与试验值之间其所以有此差别, 主要是因为时效后的合金基体中仍固溶一定量的Al和Ti, 当增加Al含量时, 基体中的Ti会有一部分参与形成r'相的反应; 而增加

Ti含量时，基体中的Al同样也会有一部分参与形成r'相的反应。

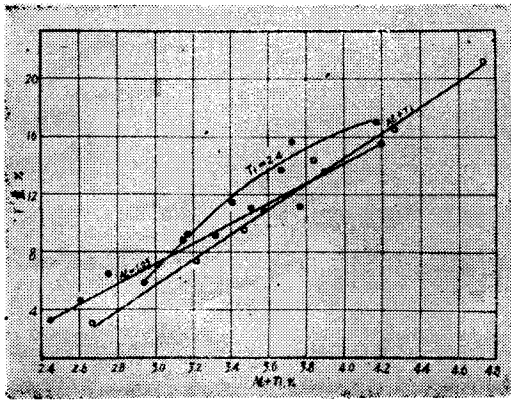


图8 r'含量与Al、Ti的关系

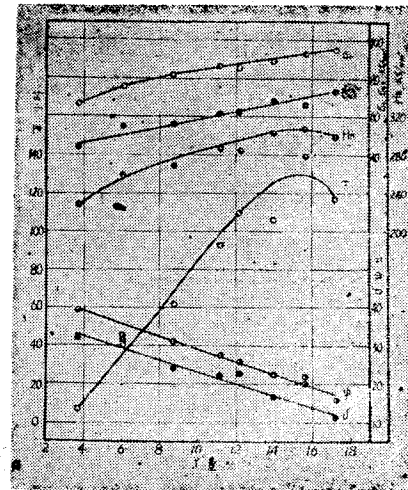


图9 r'含量对主要性能的影响

r'相是GH33合金的主要强化相，因而它的含量对性能影响就起着主导作用。图9示出的是r'含量对主要性能的影响。由图9看出，随r'相含量增加，700°C拉伸强度、室温硬度不断提高，塑性逐渐下降，这与一般合金的规律一致。但700°C 44kg/mm<sup>2</sup>光滑持久寿命在r'相含量为15%左右达到最大值，这个含量对应的Al约1.4%和Ti约2.4% (Al+Ti=3.8%)。或者Al约1%和Ti约3% (Al+Ti=4%)。至于为什么Al+Ti超过一定含量后会引起持久性能下降，分析可能有两方面的原因：一是由于随着Al、Ti含量的增加，合金的抗蠕变强度提高，但高温塑性下降。而持久强度取决于合金的抗蠕变强度和塑性潜力。当Al、Ti超过一定量后，塑性下降的作用超过了抗蠕变强度提高的作用，合金变脆，在高温长时间应力作用下，过早断裂，引起持久性能降低。另一原因是因为采用同样的热处理制度，随着Al、Ti的增加，r'相总量增多，但它的颗粒尺寸也相应增大。单位面积的颗粒数减少（见图4），削弱了r'相的强化效果。有的研究工作也证明了这一看法<sup>[7]</sup>。

生产统计表明Al+Ti由3.1%增加到3.4%，持久合格率由0增加到100%。对于现行技术条件规定的Al：0.55-0.95%；Ti：2.3-2.7%；若按中限控制则Al+Ti=0.75%+2.5%=3.25%。介于3.1%与3.4%之间，表明持久性能有相当一部分不会合格。按中限成份控制却不能保证性能合格。显然，这样的标准是不合适的。

对于电渣重熔材，由试验与统计结果可以得出Al：0.6-1.2%；Ti：2.3-2.9%比较恰当。据悉，苏联近年对ЭИ4376（即GH33）合金的成份也作过调整，提高了Al、Ti的上限<sup>[6]</sup>。看来，原来标准中Al、Ti成份订得较低是因采用电炉单炼工艺决定的。随着冶炼工艺的发展，采用双联工艺后，大大改善了合金的热加工塑性。将Al、Ti的上限适当提高，只要生产厂热加工没有困难，无疑会提高合金性能，对使用是有利的。至于提高Al、Ti后合金的拉伸塑性会降低，可以通过调整热处理工艺得到解决<sup>[4]</sup>。

3. Ce属活性元素，在Ni基合金中分布于晶界及枝晶间隙区域<sup>[8]</sup>，在含S量较高的合金中形成Ce<sub>2</sub>S<sub>3</sub>，改变原硫化物的形态，改善合金的拉伸及冲击性能，特别是横向性能。

在含硫量较低的合金中，主要对气体产生内吸附，起到净化合金晶界，提高合金等强温度，从而起到提高合金的持久性能的作用。GH33合金含硫量极低，因而加入Ce后对拉伸及冲击性能改善不明显。主要起到了净化晶界，提高合金持久性能的作用。

试验表明，Ce的加入量在0.025—0.050%拉伸塑性略有提高。但在GH33合金标准规定的Ce≤0.01%的计算加入量范围之内变动，对700℃拉伸塑性没有明显影响。

#### 四、初步结论

1. 电渣重熔工艺生产的GH33合金棒材中，C在0.02—0.16%范围内，随着C含量的增加，铬的碳化物总量不断增加，晶粒不断细化，r'相与TiC、Ti(CN)无明显变化，700℃拉伸强度、屈服强度、室温硬度逐渐提高，塑性略有下降，持久性能在0.06%时出现峰值。将现行技术条件中C的上限由0.06%提高到0.08—0.10%，既可保证性能合格、晶粒细化，又便于生产控制而不出现低倍碳化物带状。

2. 随着Al或Ti含量的增加，GH33合金中r'相含量逐渐增多，增加Al比增加Ti的效果显著，700℃拉伸强度、室温硬度逐渐提高，700℃塑性逐渐下降，700℃持久性能在所试验的Al、Ti范围内都有一峰值。对于电渣棒材，现有标准规定的Al、Ti范围不能保证持久性能合格。Al确定为0.6~1.2%、Ti：2.3—2.9%比较恰当。

3. GH33合金中加入Ce对持久性能影响较大。残余量在0.015%左右持久性能最好，而对700℃拉伸及室温、700℃冲击性能影响不大，但加入量为0.025—0.050%时，700℃塑性略有提高。Ce的含量≥0.025%出现CeNi<sub>5</sub>相，使持久性能明显下降。

#### 参 考 文 献

- [1] Жаропрочные стали и сплавы ф. ф. Химушин
- [2] H33合金生产技术总结 抚顺钢厂 1965年10月
- [3] 电弧炉加真空自耗工艺因素对GH33合金质量的影响  
上钢五厂第二中心试验室 1977年
- [4] 热处理制度对GH33合金棒材组织与性能的影响 大冶钢厂
- [5] Alloy Digest 1972年8月
- [6] Сплавы Цветных Металлов А. А. Бочвар 1972年
- [7] Влияние Количества и размеров гасиц r'—фазы На длительную прочность сплавов Ni—Cr—Al—Ti Ю. Г. Сорокина等《Металлургия» 1968 № 6
- [8] 微量稀土元素和碱土元素以及锆和硼对镍基耐热合金性能的影响  
М. П. Приданцев等 《航空技术参考资料》1960. № 1