

成都工学院图书馆

基本馆藏

380298

大型鍛件中的氫和白点

〔苏〕П. В. 斯克柳耶夫 著



74
244

机械工业出版社

大型鍛件中的氫和白點

〔苏〕П. Б. 斯克柳耶夫 著

陈 洵 曾祖良 張同和 合譯



机械工业出版社

005105

本书详细地研究了钢中氢的扩散、氢的渗透能力及各种熔炼和浇铸方法对钢中氢含量影响的问题。详细分析了锻件中的白点形成的主要因素。在大量生产经验和文献资料的基础上详细地阐述和分析了苏联等国家工厂中生产大型锻件的冷却规范。介绍了防止生成白点的热处理规范的计算方法。

本书可供工程技术人员使用。

曾祖良译本书第一篇第一~六章，张同和译第二篇第七~八章，陈洵译第二篇。

П. В. Скляев

ВОДОРОД И ФЛОКЕНЫ В КРУПНЫХ ПОКОВКАХ

МАШГИЗ 1963

(根据苏联国立机器制造科技书籍出版社一九六三年版译)

* * *

大型锻件中的氢和白点

[苏] П. В. 斯克柳耶夫 著

陈 洵 曾祖良 张同和 合译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外南礼士路北口)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{10}{16}$ · 字数 141 千字

1966年6月北京第一版 · 1966年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,800 · 定价(科六) 0.85 元

*

统一书号: 15033 · 3961

本书使用的符号和单位

σ_b ——抗拉强度，公斤/毫米²

σ_m ——屈服强度，公斤/毫米²

δ ——断裂时延伸率，%

ψ ——断裂时断面收缩率，%

a_H ——冲击韧性，公斤·米/厘米²

HB——布氏硬度，公斤/毫米²

HRC——洛氏硬度

H——氢含量，厘米³/100克

T——摄氏温度

P——氢的渗透能力，厘米³/厘米²·秒

D——扩散系数，厘米²/秒，厘米²/小时

t——时间，小时

p_{H_2O} ——水蒸汽分压力

$\frac{CaO}{SiO_2}$ ——炉渣的碱度——在炉渣中 CaO 与 SiO₂ 的比值——无因次值

R——锻件半径，毫米

K——各向同性系数

$$\delta = \frac{\delta_{non}}{\delta_{prod}} \cdot 100; \quad \psi = \frac{\psi_{non}}{\psi_{prod}} \cdot 100;$$

$$a_H = \frac{a_{H, non}}{a_{H, prod}} \cdot 100\%$$

U——浓度准数(无因次值) 等于 $\frac{H_k}{H_u}$

式中 H——氢含量，厘米³/100克

τ ——时间准数(无因次值) 等于 Dt/R^2

式中 D——氢的扩散系数，厘米²/小时

t——时间，小时

r——锻件半径，厘米

前 言

在液态和固态钢中含氢的问题，直到目前为止仍然是近代冶金学中的一个主要问题。在现有的生产方法下氢已成为不可避免的一种杂质，它使钢的质量变坏，使热变形的锻件生成分布极广泛的缺陷——白点。

关于氢对钢性能的影响，在熔炼、热变形和热处理过程中钢中氢含量的变化问题，关于白点形成，真空处理对钢性能的影响问题，近来进行了大量的非常有价值的研究工作。本书的任务之一是把这些研究成果加以综合分析。

近年在苏联重型机器制造工厂中广泛地应用了降低钢中氢含量非常有效的方法——真空铸锭法。但是这种方法只有在制造大型的、特别是重要的锻件，首先是透平发电机和蒸汽透平转子锻件时才应用。大部分锻件，其中包括高合金钢大型锻件都是用氢含量较高的一般方法浇铸的钢锭制成的。因此现在与一般浇铸法钢锭制锻件中对白点作斗争的主要方法，仍然是防止生成白点的热处理方法，即是最后的锻件按照制定的规范冷却。在各重型机器制造厂中所采用的冷却规范，按照制定原则，彼此之间存在着很大的差别，虽然它们的问世时期已经很长，但往往不能保证重要锻件中不发生白点。本书在分析了各重型机器制造厂，首先是乌拉尔机器制造厂的研究成果和生产经验以及大量的文献资料的基础上，根据锻件的不同尺寸和钢的合金度介绍了各种合理的冷却规范。本书充分地利用了工厂的试验室所取得的科学研究成果，以及工厂各车间关于大型锻件防止白点形成热处理方法的多年生产经验。在苏联最早负责编制高合金钢大型锻件等温保温冷却规范并应用到生产中去的是 1940~1941 年在 Б. Г. 穆兹鲁科夫、К. К. 维诺格腊多夫和 К. С. 克瓦帖尔的积极帮助下，由 Б. А. 莫

罗泽维奇、И. Д. 皮查赫契和本书作者进行的。在热处理试验室和工厂各车间中负责试验研究工作的是下列工程师：И. П. 阿列克散德罗娃，И. И. 克瓦帖尔，В. Н. 卡缅斯基赫，Б. Д. 彼得罗夫，К. А. 哥卢别娃，М. С. 沃耳科娃；并取得下列工程师的帮助：И. С. 克瓦帖尔，С. М. 菲里波夫，И. И. 格里哥尔耶夫，Б. Д. 提多罗夫，В. А. 米尔美立丝金，В. А. 阿佛宁，И. Ф. 卡缅斯基赫，С. К. 茹科夫和Е. А. 斯库拉托夫。

目 次

前言

本书使用的符号和单位

第一篇 鋼中的氫和白點

第一章 氫在金屬中的狀態·····	1
第二章 氫在金屬中的溶解度·····	2
第三章 鋼中氫的擴散和滲透能力·····	6
1 鋼中氫的滲透能力·····	6
2 氫的擴散·····	10
3 在室溫下鋼的脫氫·····	15
4 連續冷卻時鋼的脫氫·····	16
第四章 氫對鋼的機械性能的影響·····	17
1 鋼的氫脆性·····	17
2 氫脆性的理論·····	21
第五章 液態鋼、鋼錠和熱變形鋼坯中的氫·····	22
1 鹼性鋼熔煉過程中氫的狀態·····	22
2 酸性平爐鋼熔煉過程中氫的狀態·····	28
3 鋼錠在結晶和冷卻時氫含量的變化·····	30
4 熱變形過程中鋼中氫含量的變化·····	33
5 氫對鋼的質量和工藝性能的影響·····	36
第六章 液態鋼的除氣·····	38
1 鋼的除氣方法·····	38
2 除氣對鋼的質量及工藝性能的作用·····	41
第七章 大型鍛件中的氫·····	44
1 大型鍛件中的氫含量及其對鋼的機械性能的影響·····	44
2 氫對大型鍛件性能的影響·····	45

3 鋼的真空处理对大型鍛件质量的影响	49
4 真空熔鑄对 34XMA 鋼整鍛汽輪机轉子的质量 和机械性能的影响	53

第八章 白点、白点的产生及其防止

1 鍛件中的白点	57
2 鋼中氢含量对白点形成的影响	59
3 組織和热处理对白点形成的影响	61
4 应力对白点形成的影响	66
5 偏析对白点形成的影响	67
6 化学成分对白点形成的影响	69
7 出現白点的温度及白点形成的潜伏期	72
8 关于鋼对白点形成的免疫性	76

第二篇 热变形鋼坯的冷却规范

第一章 小截面鋼坯的冷却

1 軋材冷却规范	78
2 小型錘鍛件的冷却	80

第二章 大型鍛件的冷却规范

1 烏拉尔机器制造厂大型鍛件冷却规范的制定	82
2 34XH3M 鋼大型叶輪鍛件冷却规范的运用	83
3 烏拉尔机器制造厂鍛件冷却规范	87
4 冷却规范图解	93
5 中間冷却与中間退火	96
6 鋼錠与鍛件的均匀化	97
7 热变形中白点的焊合	98
8 苏联各工厂大型鍛件的冷却规范	100
9 国外应用的大型鍛件的冷却规范	104

第三章 动力机器制造鍛件冷却规范

1 透平发电机轉子鍛件冷却规范	108
2 蒸汽透平整鍛轉子鍛件的鍛后冷却	117
3 轉子冷却的国外試驗	118

4 叶輪鍛件的冷却规范	121
第四章 冷热轧辊鍛件鍛后的冷却规范	126
1 碳鋼制热轧辊	126
2 合金鋼制热轧辊	126
3 薄板轧机冷轧工作辊和支承辊	129
第五章 大型鍛件冷却规范合理化的研究工作和生产试验 ...	132
1 研究的目的和方法	132
2 等温保温时间对白点形成的影响	132
3 正火和等温保温对白点形成的影响	135
4 鍛件在炉中由等温保温温度冷却时終冷温度的提高	138
5 鍛件在低温下的炉中待料	140
6 生产研究工作結果的分析	140
第六章 鍛件预防白点冷却规范的计算	142
計算与实际資料的比較	150
第七章 制定大型鍛件冷却规范的主要原则	159
参考文献	161

第一篇 鋼中的氢和白点

第一章 氢在金属中的状态

研究表明,氢在金属中可能以各种状态存在。氢溶解在某些金属(铁、镍、钼、铬等)的晶格中,处于质子[14, 76, 117]或原子状态。在直流电[80]的影响下质子向阴极移动表示在液态金属中存在质子状态的氢。特别是X-光研究结果表明,氢在金属中呈原子状态[40]。根据斯米亚洛夫斯基的资料[230],氢在金属中同时既呈质子状态又呈原子状态。例如,在钼中氢的电离程度等于90%。关于氢在铁中的电离程度现在还没有确实的数据。

在金属的疏松体、砂眼处,氢可能呈分子状态,特别是金属的吸氢量增加和金属的冷变形程度提高说明了这一点,因为在这些过程中,金属中开始形成疏松体[17, 163]。晶格的畸变和破裂部分、晶块、晶粒、夹渣、气孔等的交界都是呈分子状态的氢积聚部位。这可由这样事实来解释,即在真空下,于600~700°C加热不能分离出全部氢气。在钢中呈分子状态的剩余氢,只有当金属在真空中熔炼时才能全部分离出来[163]。

在钢的生产中作为合金或精炼加入料的某些金属如钛、锆、钒、铌、钽、锶等与氢结合成氢化物,或成固溶体化合物[14, 24, 129, 38]。上述金属具有吸收大量氢的特性。例如,在1大气压下并在温度600°时钛能溶解氢32000;锆——18400厘米³/100克等[14]。

有资料说明氢可能在碳化物相中溶解,即呈碳氢化物状态[114, 115]。

第二章 氢在金属中的溶解度

钢中氢的含量愈高它的有害影响就愈大。在液态钢中氢的含量高就促使钢锭产生和增多缺陷（气泡，偏析等），并且在锻件中增加氢含量，也就降低钢的可塑性并使锻件生成白点和其它缺陷。因此关于在固态和液态钢中氢的溶解度资料具有很大的现实意义。

在钢和铁合金的生产中作为合金元素和加入料的金属可以分成二组。属于第一组的有铁、锰、镍、铬、钼、钴。在这一组金属中的氢溶解呈原子或离子状态（质子状态）。属于第二组的有钛、钒、锆、铌、铈及其它，它们与氢化合形成化合物-氢化物。

在第一组金属的溶解过程中，开始时氢分子吸附在表面上，而后分解成原子（或离子）状态并扩散到金属中间。在某些工序下，如电离时氢离子直接扩散到金属中去。在这组金属中氢的溶解度直接与氢的分压力平方根成正比。在这组金属中氢的溶解是吸热反应，它吸收热量，因此温度提高，氢的溶解度就随着提高。

图1是在760毫米水银柱压力下，根据不同的温度，在铁、镍、钴、钼和铬中氢的溶解度的变化曲线。从所列的数据中看出，在这组金属中，其中铁和镍从液态转变到固态时，氢的溶解度降低1/2以上。当从一种晶格转变至另一种晶格时，固态钢中氢的溶解度发生急剧的变化。例如：当从 δ -铁转变至 γ -铁时，氢的溶解度急剧地增加，而当 γ -铁转变至 α -铁时就减少。当锰的多相转变时，氢的溶解度有着类似的变化[14]。

在过冷奥氏体转变为铁素体-碳化物的混合物的过程中，氢的溶解度与形成的铁素体-碳化物相的数量成比例地下降，这种情况在图2中可以看出。在奥氏体钢中氢的溶解度比珠光体钢中的要高得多，这种情况在图3中可以看出。铬降低固态钢中氢的溶解

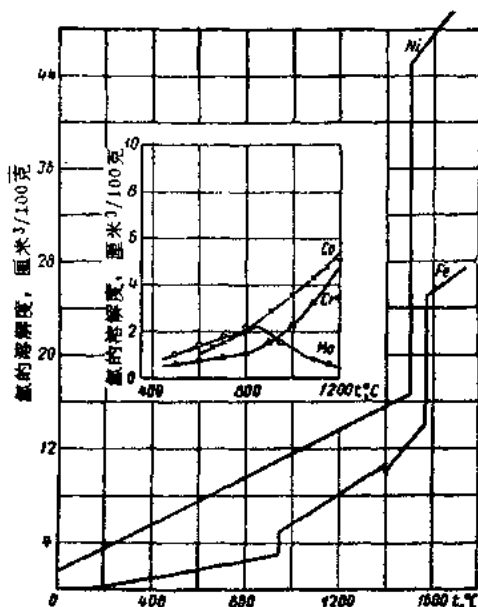


图1 在铁、镍、钼、钨和铬中氢的溶解度[14]。

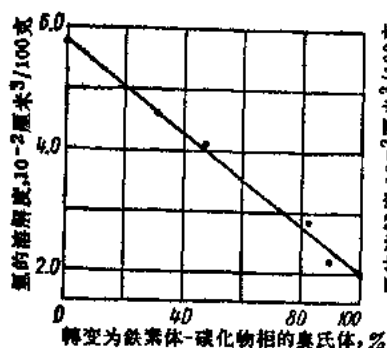


图2 当氢的压力为1毫米汞柱时,含0.30%C和13.6%Cr钢的过冷奥氏体转变对氢的溶解度的影响[175]。

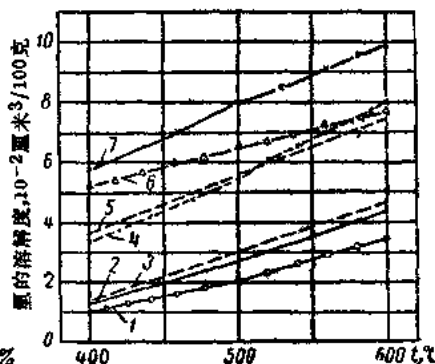


图3 当氢的压力为1毫米汞柱时,在镍、铁、不锈钢中和含铬、镍、锰的铁合金中氢的溶解度[175]。

1—含0.09%C和15.6%Cr钢; 2—含0.011%C铁; 3—含0.32%C和3.6%Ni钢; 4—含0.025%C和28%Ni钢; 5—镍特菲尔特钢, 含1.4%C和12.9%Mn; 6—含0.07%C, 18.3%Ni和9.98%Cr不锈钢; 7—镍。

度不显著，而镍——显著地使它增加[173, 175, 185]。锰使固态钢中氢的溶解度提高，但比镍要差一些[173]。

在含碳 0.4~0.5 以下，锰 1.5 以下，镍 3.5 以下，铬 2% 以下的普通结构钢中氢的溶解度与在铁中的一样[175]。在奥氏体钢中氢的溶解度比铁中的高得多。

根据最近研究的结果[237]，当温度低于 300°C 时，固态铁中氢的实际含量比按照铁中氢溶解度与温度的关系式算出的高得多。作者是这样解释这种现象的：即在金属中具有显微的和超显微的疏松体（气孔），在低温下氢在里面呈不善于扩散的分子状态。研究结果表明，在低温下氢的实际含量相当于溶解的氢原子含量和占试样体积约 0.1% 的气孔中氢分子的含量。

在图 1 和图 3 中列出的固态金属中氢的溶解度值系与该温度下氢和金属之间的平衡条件有关。在非平衡的条件下，则部分氢呈分子状态，处于金属的疏松中，例如，在浇铸的或冷变形的金属中氢的含量可能显著地高于图 1 和图 3 中所列的数值。在这种情况下更正确地不称为氢的溶解度，而称之为氢的吸留，即吸收。

合金元素和碳对液态钢中氢的溶解度是有影响的。根据文献

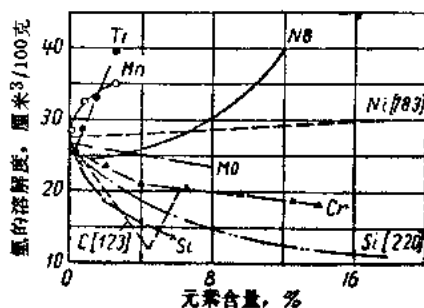


图 4 在 1600°C 和 760 毫米汞柱下，元素的含量对溶态铁中氢的溶解度的影响[40]。

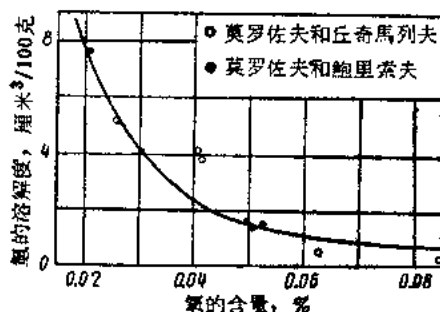


图 5 液态铁中氢的溶解度与氢的含量的关系[40]。

资料[33, 40, 123, 220], 当铬、硅、铝、钨、钼和碳的含量增加到4.2%时, 液态铁中氢的溶解度就开始降低。当铌、钛和碳的含量增加到4.2%以上时, 溶解度就随着增加(图4)。根据最近的资料[36], 当锰含量增加到1%时, 液态钢中的氢含量从24增加到33厘米³/100克。而当镍含量增加到100%时, 达42.5厘米³/100克[183]。当氧含量增加时, 液态钢中氢的溶解度显著地下降(图5)。随着液态钢中的温度提高氢的溶解度也提高。例如: 液态钢的温度从1548提高到1700°C时, 氢的溶解度从28增加到34厘米³/100克[199]。

在一般含量合金元素的珠光体级结构钢中, 液态钢中的氢含量主要决定于温度、碳和氧的含量。

第二组金属——钛、钒、铌、锆以及稀土金属——铈、镧、钍等具有吸收大量氢的性能(表1)。如前所指出的, 本组金属与氢化合成氢化物。当温度提高时氢化物开始分解, 这是由于当温度提高时, 氢的吸收作用降低之故。

表1 第二组金属中氢的溶解度(厘米³/100克)[14]

温度(°C)	金 属					
	Ti	Zr	La	Ce	Nb	Y
20	—	—	—	—	10400	15000
400	38400	24000	—	—	7680	3800
600	32000	18400	16300	16000	1850	1000
800	14000	16500	—	—	610	450
1000	6500	7800	—	—	—	240

表2 钢中不同单位氢含量的对比值

毫升/100克	厘米 ³ /100克	R_v	%
0.5	0.5	0.04	0.00005
1.0	1.0	0.08	0.00009
2.0	2.0	0.16	0.00018
3.0	3.0	0.23	0.00027
5.0	5.0	0.39	0.00045
7.0	7.0	0.55	0.00063
9.0	9.0	0.70	0.00081
10.0	10.0	0.78	0.00090

R_v —相对体积, 即是溶化在1.0厘米³金属中氢的数量(厘米³)。

在文献资料中指出, 氢的溶解度表示法是多种多样的。表 2 是用不同单位表示的溶解度对比值。

第三章 鋼中氢的扩散和渗透能力

1 鋼中氢的渗透能力

鋼中氢的扩散和渗透能力对鍛造时、鍛后冷却和热处理时鋼坯中氢含量的变化过程, 对在截面上氢的分布和白点的生成具有很大的影响。鋼中氢的渗透能力的定义是当气体的压力在出口方向等于 1 大气压时, 在单位时间内通过单位面积和单位厚度的氢的数量。在鋼表面上的反应对鋼中氢的渗透能力具有一定的影响。在鋼吸收氢的过程中, 起先氢呈分子状态吸附在表面上, 而后分解呈原子状态扩散到鋼的内部。当从鋼中排出氢时, 以相反过程进行。因而, 氢的渗透过程包括氢的吸附、氢在金属中的扩散和分解的过程。当表面反应(吸附和分解)比扩散的速度更大时, 氢的渗透值可以作为扩散速度的指数。当氢从气相中扩散时, 在相当高的温度下(400°C以上)就发生这些现象。当温度低于 400°C 时鋼中氢的渗透能力实际上等于零, 因为在 400°C 以下氢分子的分解反应已经停止了。当温度低于 400°C 时氢从鋼中排出。假如由于化学或电化学反应氢被电离时, 则在这种情况下鋼吸收氢的作用在更低的温度下就开始了。影响氢的渗透能力的主要因素是温度、组织和化学成分。当加热的温度提高时, 氢的渗透能力急剧地提高。例如: 根据 П. Б. 格立德和 P. A. 里亚博夫的资料, 当 40 号鋼从 500°C 提高到 700°C 时, 氢的渗透能力从 10×10^{-5} 增加到 35×10^{-5} 厘米³/厘米²秒[15, 149]。

关于碳和合金元素对氢的渗透能力影响的问题进行了大量的工作, 必须指出的是 П. Б. 格立德和 P. A. 里亚博夫从事的研究

工作[15, 149], 以及 A. A. 谢尔巴科娃[167], 格列尔和塔克霍苏恩[199]的研究。根据 И. Б. 格立德和 P. A. 里亚博夫的研究结果, 碳、硅、铬(图 6, 7, 8)能降低钢中氢的渗透能力, 镍和钼则对它的影响不大。在坦格和拜涅尔的研究工作中也得到类似的资料

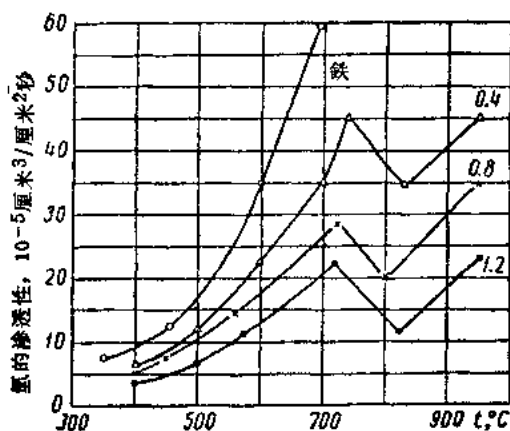


图6 碳含量对碳素钢氢渗透能力的影响(根据 И. Б. 格立德和 P. A. 里亚博夫的资料)。曲线上的数字表示钢中碳的含量, %。

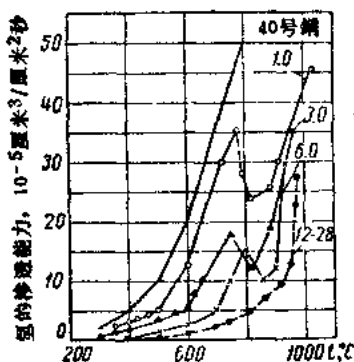


图7 铬含量对钢中氢的渗透能力的影响[15]。曲线上的数字表示铬的含量, %。

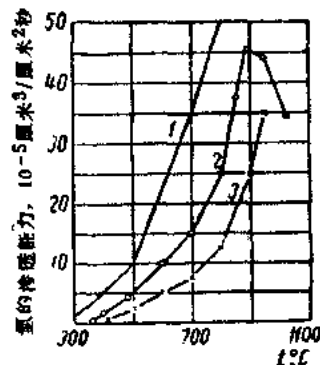


图8 硅含量对钢中氢的渗透能力的影响[15];

1—40号钢; 2—电机钢; 3—变压器钢。

[185]。根据 A. A. 谢尔巴科娃的资料[167]，当氢的压力为 100 大气压，温度为 600°C 时，铬含量增加至 19%，氢的渗透能力从 38.0 减少到 3.0×10^{-5} 厘米³/厘米² 秒。

镍含量增加至 10%，氢的渗透能力从 32.0 增加至 39×10^{-5} 厘米³/厘米² 秒，而镍含量继续增加至 74%，氢的渗透能力约降低 1/3。

图 9 是不同合金化钢中氢的渗透能力的曲线，从这个曲线图看出，4% 的镍降低氢的渗透能力比 27% 的铬更为强烈。

П. Б. 格立德是这样说明碳对氢的渗透能力影响的，即当碳含量增加时，渗碳体的数量就随着增加，其氢的渗透能力等于零，也即碳部分地充满着晶格的晶间并使邻接的基本晶格发生畸变。铬加强了质点之间的结合，而硅能使晶格畸变，因此提高这些元素的含量就能使氢的渗透能力降低。

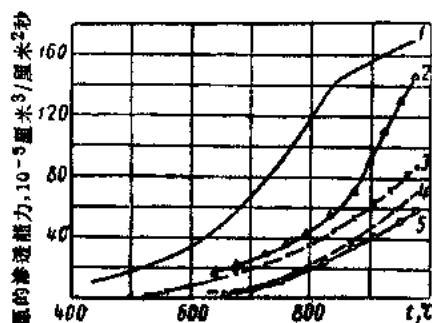


图 9 合金硅、铬、镍和镍对铁的氢渗透能力的影响：

1— α -铁；2—27% 铬铁；3— γ -铁（非合金奥氏体）；4—18% 铬、8% 镍不锈钢（合金奥氏体）；5—4.3% 硅铁。

根据阿伊连迭尔等的资料[82]，镍能使钢中氢的渗透能力显著地提高。П. Б. 格立德指出，少量的镍、钛和其它形成碳化物元素能使氢的渗透能力有微量的上升，这是因为它们与碳结合成坚固的碳化物，好像钢中没有碳存在一样。在形成碳化物元素的含量增加时，并当它们结成固溶体时，钢中氢的渗透能力就急剧地降低。

П. Б. 格立德和 P. A. 里亚博夫的研究证明，加热时，在铁素体-碳素混合物转变为奥氏体的过程中，氢的渗透能力急剧地降低，而活化能量急剧地上升。例如，当珠光体转变为奥氏体