

金属压力加工的 物理化学理論基础

〔苏联〕 Н. И. 科尔涅耶夫 著
И. Г. 斯庫加列夫



国防工业出版社



TG301/5-2
12754

金属压力加工的 物理化学理论基础

金属和合金压力加工的热力因素

[苏联] Н. И. 科尔涅耶夫 著
И. Г. 斯库加列夫

钱友荣、张炳乐、刘耀祖 译

刘晓民 校



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书叙述了工业中采用的金屬和合金的压力加工热力因素、組織和机械性能之間的基本規律，这些規律是在科学地制訂金屬和合金的压力加工工艺时所必不可少，它包括塑性图、真实应力图、变形抗力图、再结晶图及机械性能的各向异性，也包括状态图、变形鋼和合金的典型組織及宏观組織和显微組織的标准图等。

对于碳鋼、合金鋼和高合金鋼，对于鋁、鎂、銅、鈦及其合金，对于稀有金屬（鉬和鉻等）及其合金，都列出了上述各种图和組織。

本书可供在机械制造和金屬压力加工部門工作的科学工作者、工艺人員和設計人員参考，也可供大学生参考。

ОСНОВЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

【苏联】Н. И. Корнеев, И. Г. Скугарев

МАШГИЗ 1960

金屬压力加工的物理化学理論基础

錢友榮、張炳乐、刘耀祖 譯

刘曉民 校

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印張 9 1/2 242 千字

1965 年 10 月第一版 1965 年 10 月第一次印刷 印数：0,001—2,840 册

統一书号：15034·983 定价：（科七）1.60 元

序 言

現代机器制造业的发展，給科学技术工作者提出了进一步发展金屬和合金压力加工理論和工艺的任务。这项任务之所以必要，是由于机器制造业中广泛采用了各种新型鋼和合金；高强度結構鋼和高合金不銹鋼；鋁合金和鎂合金；各种低塑性金屬材料，例如鎳鉻耐热合金；含鋅的輕合金；高合金化的鈦合金及难熔合金（鉬合金和鉨合金等）。

当掌握及开始采用这些新型鋼和合金的时候，几乎还没有关于压力加工的各种热力因素（变形溫度和变形速度，允許变形量，应力状态，加热速度及冷却速度）的精确資料。

对上述参数进行广泛的研究是必須的，但是也必须考虑到：在提出拟訂新型鋼和合金压力加工規範的方法及其在机器制造业中实际采用之前所进行的工作。

所以，無論在苏联或在其他国家，尤其是近十年来，都在金屬压力加工理論和工艺方面，大力进行了試驗研究和理論探討。

这些工作，曾經是既在力学-数学塑性变形理論方面进行，又在物理-化学塑性变形理論方面进行。

但是在現有的文献中，对塑性变形的物理-化学理論基础阐述得还不够完整。在已发表的有关这方面的著作中，主要是涉及到了变形机理的物理本质、伴随塑性变形而产生的軟化过程的物理本质，以及下列物理-化学过程：結晶、相变（相的析出和溶解）、金屬的化学均匀性及气体饱和度等。

变形因素、組織和性能之間的变化規律，是确定金屬和合金的冷、热压力加工热力規範时所必須的，在文献中，仅仅記載了有限的几种金屬材料的有关这方面的資料。例如对于大多数材料

(某些高合金鋼、輕合金、鈦合金及难熔合金)，在科技文献中还没有发表过完整的塑性图，以及塑性随相成分而变化的規律等。由于对压力加工的这一分支研究得不够，所以在工厂实践中难于采用物理-化学方法来科学地制訂工艺。

为了弥补科学文献中的这个空白点，作者們也曾进行了如本书中所記述的一些研究工作。

作者們长期以来对鋼和合金的塑性和变形性进行了研究。这些研究成果曾可用来作为制訂挤压、自由鍛、模鍛和軋制等工艺的基础。

根据研究所获得的規律，制訂了碳鋼、新型結構鋼、耐热合金、鋁合金及鎂合金等压力加工的热力规范。同时，在各种情况下，把从研究工作中得出的資料用于工业中，都收到了良好的效果。

由于有了已进行过的研究工作的总结，并且新型鋼和合金的压力加工工艺过程又得到推行，这就使得作者們有可能发展压力加工的物理-化学理論这一分支，即闡述各种金属材料压力加工的热力因素学說的理論，这也就是本书的基本內容。

书中所引述的主要資料都是独創的，并且也是第一次发表的。

因为要建立关于全部金属材料的压力加工热力因素的学說是困难的，所以，对某些金属和合金的塑性及变形性研究得不够充分。例如，在关于銅合金和稀有金属的两章中，叙述得不如其他各章那样詳尽，当然，也不能說本书对其他合金就已經叙述得尽善尽美了。工厂實驗室及研究部門应当在最近的将来进行补充性的研究，这是一項重要而有前途的工作，因为它决定着金属压力加工物理-化学理論中的一个最重要分支的进一步发展。

目 录

序言	3
第一章 碳鋼及合金鋼	9
1. 鋼的塑性与金属冶金质量之間的关系	11
2. 塑性图	12
3. 鋼的变形抗力	14
4. 鋼的塑性与被变形的金属应力状态之間的关系	17
5. 鋼的組織及机械性能与鋼錠的总变形之間的关系	18
6. 加工再结晶图	53
7. 碳鋼和合金鋼的状态图及在压力加工溫度下的組織	69
8. 鋼压力加工时的加热速度、冷却速度和溫度	72
9. 鋼压力加工的热力规范	74
第二章 高合金鋼和耐热合金	82
1. 高合金化合金的塑性图	84
2. 塑性及变形抗力与应力状态之間的关系	89
3. 高合金化合金的变形抗力	94
4. 宏观組織及机械性能与总变形之間的关系	98
5. 加工再结晶图以及加工溫度和临界变形的确定	107
6. 高合金化合金的組織及其对塑性的影响	139
7. 高合金化合金压力加工的热力条件	146
第三章 鋁合金	150

1. 变形铝合金的塑性与金属的冶金质量之间的关系	155
2. 塑性图及合金的变形温度和允许变形程度的确定	158
3. 合金的变形抗力	165
4. 铝合金及镁合金的塑性与应力状态之间的关系	167
5. 合金的宏观组织及机械性能与总变形之间的关系	179
6. 加工再结晶图及机器每次行程允许变形的确定	180
7. 状态图及在热压力加工温度下的合金组织	182
8. 合金的加热速度和冷却速度	185
9. 铝合金压力加工的热力规范	186

第四章 镁合金.....189

1. 塑性与金属冶金质量之间的关系	192
2. 塑性图及合金允许变形温度的确定	196
3. 合金的变形抗力	199
4. 塑性与应力状态之间的关系	203
5. 宏观组织及机械性能与总变形之间的关系	205
6. 加工再结晶图	208
7. 状态图和组织特性	212
8. 合金的加热速度和冷却速度	213
9. 镁合金压力加工的热力规范	216

第五章 铜合金.....220

1. 塑性图及合金变形温度和允许变形程度的确定	221
2. 塑性与金属的冶金质量之间的关系	224
3. 塑性与应力状态之间的关系	225
4. 加工再结晶图和临界变形的确定	226

5. 状态图及在压力加工溫度下合金的組織	228
6. 銅及銅合金压力加工的热力規範	230
第六章 鈦合金	232
1. 塑性变形前鈦合金的加热	235
2. 塑性图	242
3. 合金的塑性与金屬的冶金质量之間的关系	245
4. 塑性与变形程度及变形速度之間的关系	249
5. 单位压力与变形溫度、变形速度及变形程度之間的关系	251
6. 宏觀組織、显微組織及机械性能与变形条件之間的关系	255
7. 加工再結晶图	264
8. 状态图及在压力加工溫度下的組織特性	272
9. 鈦合金变形的热力規範	274
第七章 稀有金屬及其合金	282
1. 鋇及鋇合金	282
2. 鉻及鉻合金	290
3. 鎢、鉭、鉍及其合金	298
参考文献	300

采 用 的 符 号

σ_b ——强度极限;

σ_s ——屈服极限;

$\sigma_{0.2}$ ——当塑性变形为 0.2% 时的假想屈服极限;

σ_p ——比例极限;

σ_{-1} ——弯曲疲劳极限;

σ ——锻造时的变形抗力;

$\tau_{\max}$ ——最大切应力;

δ ——试样拉断时的相对延伸率;

ψ ——破坏时的断面收缩率;

a_k ——带缺口试样的冲击韧性;

HB ——布氏硬度;

$\frac{\sigma_{bn}}{\sigma_{bB\partial}}; \frac{\sigma_{sn}}{\sigma_{sB\partial}}; \frac{\delta_n}{\delta_{B\partial}}; \frac{\psi_n}{\psi_{B\partial}}; \frac{a_{kn}}{a_{kB\partial}}$ ——机械性能的相对指标;

注脚 n ——横向纤维试样;

注脚 $B\partial$ ——纵向纤维试样;

T_{nA} ——熔点;

ε ——变形程度;

脚注 κ ——冲击变形;

脚注 n_p ——静变形;

n ——破坏前的扭转数;

n/n_0 ——被研究试样半环上的斑点数与标准样品半环上的斑点数间的比例。

第一章 碳鋼及合金鋼

在机器制造业中所采用的鋼，分为碳素优质結構鋼、合金結構鋼、高合金不銹鋼、耐热鋼和具有高电阻的合金鋼。这些鋼及合金的化学成分和机械性能的资料，列入有关的国家标准中。

本章内容是闡述制訂碳鋼和合金鋼压力加工热力规范的科学根据。

这些鋼的变形抗力主要决定于碳（C）的含量。碳鋼中碳的含量愈多，則鋼的塑性愈低、变形抗力愈大。这些鋼中含有錳（Mn）、硅（Si）、硫（S）、磷（P）等杂质，及影响鋼的塑性的其他元素。

硫在鉄中最多溶解 0.025%，剩余的硫与錳化合，形成化合物 MnS 。所以，硫的含量在优质合金鋼中不超过 0.035%；在特优质合金鋼中，不超过 0.025%；在优质碳素鋼中，不超过 0.03~0.04%。

磷能提高鋼的硬度并降低其塑性，尤其是在低温下，这种现象更为明显，同时，当鋼中含碳量大于 0.2% 时，它还会引起冷脆性。

合金元素所以能影响到鋼的塑性和机械性能，是由于在晶格中鉄的原子被合金元素的原子所代替（图 1 和 2）之故。因为鉄的原子与合金元素的原子大小不同（表 1），所以，由于这些元素的溶解，就引起了晶格常数、塑性和机械性能的变化。

表 1 各种元素的原子半径（埃）

Si	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V	Mo	W	Ti
1.17	1.25	1.25	1.26	1.27	1.30	1.36	1.39	1.41	1.47

凡是原子半径比铁大的合金元素，都使晶格常数增大；反之，则使晶格常数减小。晶格常数的这种变化，导致了铁素体与钢的性能变化。

锰的含量为 0.25~0.8% 及硅的含量小于 0.35% 时，对钢的工艺塑性没有影响（如果这些元素的含量超过上述限度时，则将成为钢的合金元素）。

硫能降低塑性，尤其在较高温度下就更明显，同时，它还会由于易熔共晶体 $\text{FeS} + \text{Fe}$ ($T_{\text{熔}} = 985^{\circ}\text{C}$) 的形成，而引起热脆性。锰能减小硫的不良影响，因为当锰与硫化合时，阻碍了易熔共晶体的形成。此外，硫能降低钢的疲劳强度和耐磨性。

当合金钢中的含碳量大于 0.2% 时，硬度比图 2 所示的数据要高，而工艺塑性则降低。

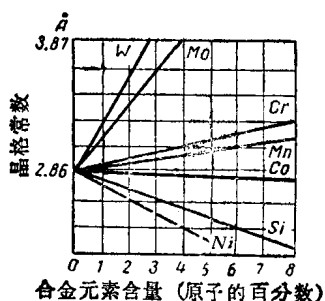


图 1 晶格常数与固溶体中合金元素含量的关系

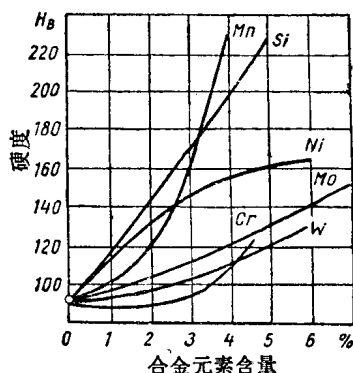


图 2 钢的含碳量为 0.2% 时，钢的硬度与合金元素含量的关系

碳钢及合金钢的机械性能、组织及工艺塑性除决定于化学成分外，还决定于金属冶金质量（非金属夹杂物的数量、炉料纯度、熔化及浇铸方法）及压力加工的热力因素（变形温度、变形程度和变形速度、加热和冷却速度以及应力状态）。

只有当获得了压力加工的热力因素之间关系，以及钢的性能、组织和塑性之间关系的必要资料以后，才能科学地确定钢的压力

加工热力条件。

1 鋼的塑性与金属冶金质量之間的关系

当在鋼錠中完全消除了縮孔和疏松且无裂紋以及粗大的碳化物偏析时，碳鋼及合金鋼在压力加工时的塑性，决定于金属的冶金质量：a) 枝状組織的形式；б) 化学成分不均匀（偏析）的程度；в) 非金属夹杂物和氧化膜的数量及分布形状；г) 鑄造金属的吸气量。

鋼錠結晶組織具有三个区域的特点：1) 細晶粒区；2) 晶軸垂直于錠模壁的枝状或柱状晶区；3) 晶軸分布不規則的枝状晶区。

鑄造金属的塑性既决定于枝状晶体的大小，又决定于第二区和第三区的宽度，特别是第二区的宽度。这两个因素，也决定了在碳鋼及合金鋼的自由鍛件、軋制件或模鍛件中是获得細纖維的，还是粗纖維的宏观組織。鋼錠的第二区和第三区的宽度及其中的枝状晶体愈大，則鑄造金属的塑性愈低，并且在变形的金属中更易于形成粗纖維的組織。金属的組織及冶金质量，可用以下方法求得改善：即，提高液态金属的冷却速度或結晶速度；降低鋼的澆鑄溫度和澆鑄速度；采用超声振蕩錠模及其他工艺措施。

化学成分不均匀性或偏析的表现形式，就是鋼中的杂质和合金元素分布不均匀。这种现象取决于熔融金属的选择結晶規律和冷却条件，并不同程度地出現在所有鋼錠中。

按照选择結晶規律，首先是基体溶液最純的部分先結晶，随后是富含杂质的部分結晶，原因是前者熔点較高。無論是个別枝状晶体及晶体中微观化学成分不均匀性，或是鋼錠大体积及区域的宏观化学成分不均匀性，都对鑄造金属的塑性和变形鋼的組織有决定性的影响。这种影响的机理在于：晶体本身和晶界的塑性降低，由于鋼中的碳和其他元素的含量局部提高，而导致晶間結合力減弱，以及易熔共晶体的形成。

鋼的化学成分不均匀性, 决定于原料純度、鋼液的冷却速度、以及鋼的熔化和澆鑄的其他条件。鋼錠愈重, 則其化学成分不均匀性愈大 (表 2)。

表 2 鋼錠重量对碳鋼化学成分不均匀性的影响〔2〕

鋼錠重量 (吨)	含C量(%)				含Mn量(%)				含Si量(%)	
	平均	最大	最小	偏差	平均	最大	最小	偏差	平均	最大
1	0.52	0.54	0.48	12	0.84	0.84	0.71	6	0.21	0.22
2	0.41	0.46	0.40	15	1.06	1.04	0.98	6	0.52	0.52
3	0.4	0.45	0.35	25	0.84	0.85	0.78	8	—	—
8	0.39	0.45	0.31	35	0.96	1.04	0.95	9	—	—
172	0.33	0.55	0.19	109	0.79	0.92	0.73	11	0.13	0.14

鋼錠重量 (吨)	含Si量(%)		含S量(%)				含P量(%)			
	最小	偏差	平均	最大	最小	偏差	平均	最大	最小	偏差
1	0.20	10	0.03	0.04	0.032	22	0.036	0.038	0.032	17
2	0.5	4	0.056	0.057	0.044	23	0.052	0.062	0.047	29
3	—	—	0.034	0.05	0.027	68	0.042	0.048	0.032	38
8	—	—	0.024	0.029	0.016	54	0.025	0.031	0.029	32
172	0.11	23	0.03	0.08	0.018	206	0.033	0.09	0.023	203

为了减少鑄造金屬的化学成分不均匀性和提高其塑性以及改善压力加工后鋼的組織和机械性能, 必須采用較純的原炉料和小重量的鋼錠, 如有可能, 还要对鋼錠进行均匀化处理。

鑄造金屬中的非金属夹杂物的数量和分布形状以及吸气量, 都能在热压力加工过程中引起鋼的脆性, 这种情况出现在这些夹杂物和气孔較大并沿晶界呈鏈状分布时。

2 塑性图

完整的塑性图給出了压缩时的变形程度、拉伸时的强度极限、相对延伸率和断面收縮率、扭轉时的扭轉角或轉数、冲击韌性以及其它工艺性能和机械性能的变化規律与試驗溫度的关系。这些塑性图的主要特点, 是具有表明塑性和脆性状态区域的最大和最

小值，而这些塑性和脆性区，就是确定钢的压力加工热力规范的依据。

例如，当阿姆克铁（图3）、碳钢（图4和图5）及合金钢（图6）加热到300~500°C时，塑性急剧下降。这个温度范围相当于蓝脆区。温度为800~1100°C时，阿姆克铁的塑性也还是下降的，所以，阿姆克铁不在这个温度下进行热轧。

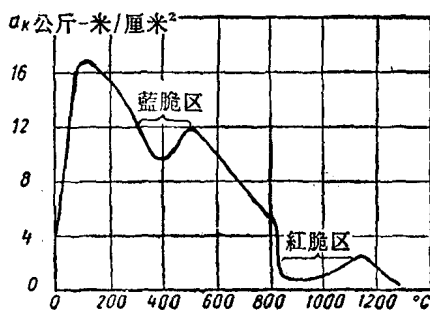


图3 阿姆克铁的冲击韧性的变化与加热温度间的关系

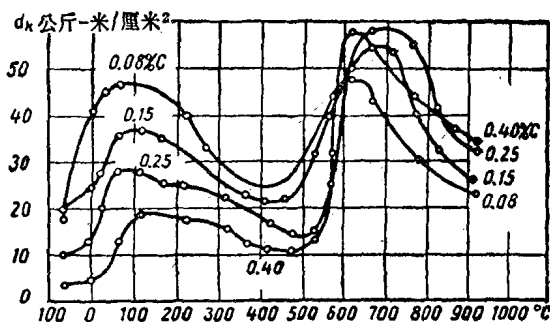


图4 含碳量不同的钢的冲击韧性的变化与加热温度的关系

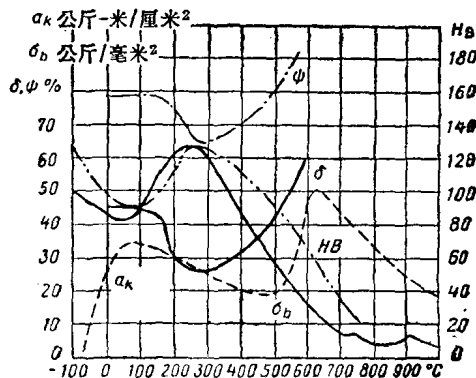


图5 碳钢的塑性图

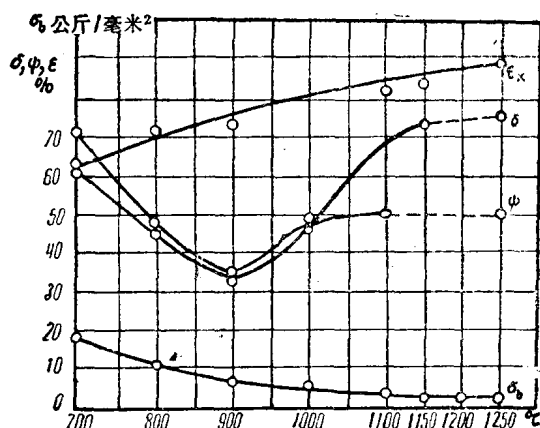


图6 合金鋼的塑性图

对于碳鋼和合金鋼，当溫度高于700°C时，塑性变化不大。

将碳鋼和合金鋼加热到高温进行鍛粗（60~80%）并进行冲击試驗时，表現不出有脆性存在。

鍛粗时，試样上甚至沒有小裂紋，当进行冲击試驗时，在大多数情况下，試样不破坏，而仅仅产生弯曲。

所以，碳鋼和合金鋼無論在鑄造状态或是在預变形状态下，都属于高塑性和中等塑性的材料。

为了論証和确定碳鋼及合金鋼压力加工的开始和終結溫度，除了利用塑性图外，还需要相成分、变形抗力和再結晶等与冷变形和热变形时的热力因素間的关系的其它資料。

3 鋼的变形抗力

当压力加工溫度升高时，鋼的塑性增加，而变形抗力减小。

在1150°C的溫度下靜拉伸时，碳鋼的强度极限約为室溫下变形抗力的 $\frac{1}{20}$ ，而合金鋼則为 $\frac{1}{30}$ 。但是在此溫度下，碳鋼和合金鋼的强度极限的变动范围都比较小（1.6~3.0公斤/毫米²）（表3）。

由于变形抗力决定着鋼在压力加工时所消耗的功，所以，当科学地确定热压力加工的溫度时，必須确切地知道变形抗力随溫度变化的規律。

表 3 靜拉伸时鋼的強度极限 (公斤/毫米²) 与溫度
的关系 (叶德涅拉尔)

鋼 牌 号	溫 度(°C)		
	20	700	1150
10号鋼	35~48	6~14	1.6
35号鋼	52~65	14~16	2.5
50号鋼	60	16	2~3
鉻鋼40X(0.4% C, 1.0% Cr)	50~60	8~6	2.6
鉻鎳鋼12XH3A(0.15% C, 0.6~ 0.9% Cr, 2.8~3.2% Ni)	95	7.56	1.59
鉻鎳鎢鋼 (0.15~0.20% C, 1.35~ 1.65% Cr, 4.0~4.5% Ni, 0.8 ~1.2% W)	110	16	3.2

由于变形抗力与溫度之間的关系，从定量方面來說，可以足够准确地判定在某些加工条件下的变形机理（冷变形机理，不完全热变形机理或热变形机理），因而在科学地确定碳鋼及合金鋼的压力加工工艺时，必須注意到这个規律。

在图 7 中表明，合金鋼的强化开始于 900~850°C，所以，这种鋼的热压力加工的平均終結溫度一般采用約为 850°C。将鉻 鎳鋼的強度极限的变化（表 3）与用測压計和示波器測量得到的变

形抗力的变化（图 7）加以比較后，就能看到，在 1100°C 的溫度下，鉻鎳鋼的变形抗力几乎为其強度极限的五倍。所以，当計

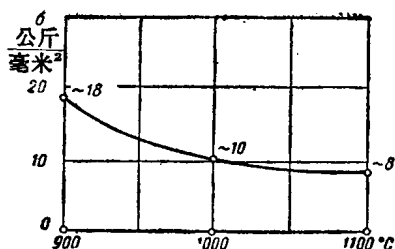


图 7 鉻鎳鋼在压缩时变形抗力的变化与加热溫度的关系

算鋼热压力加工的设备功率时，应该考虑的不是拉伸时的强度极限的大小，而是压缩变形抗力的大小。

研究了铬镍钢的变形抗力随温度而变化的流动曲线后，可得出以下结论：a) 在1100~1000°C的温度范围内，由于变形抗力是在8~10公斤/毫米²范围内变化，而机械强化实际上不存在，因而发生的是热变形机理；б) 在1000~900°C温度范围内，变形抗力从10增加到18公斤/毫米²，这就表明，在900°C温度下对钢进行加工时，存在着机械强化，并且属于不完全热变形机理或者混合变形机理；в) 由于在900°C时，钢的机械强化已很显著，所以，铬镍钢的加工终结温度应在850~900°C范围内。图8中的曲线表明：当塑性变形温度低于800°C时，这种钢具有高的机械强化。所以，合金钢的热压力加工终结温度不应低于800~850°C。

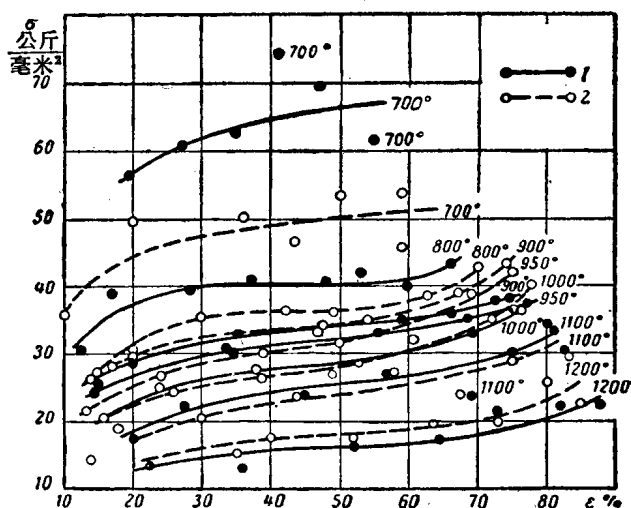


图8 合金钢在冲击锻造时变形抗力的变化 (Ф. И. 费拉托夫)

1—铬镍钛钢；2—铬镍铜钢。

变形速度对变形抗力有很大影响。在高速变形时，再结晶速度往往低于变形速度。在这种情况下，即使在高温范围内进行加