

冷作硬化对ЭИ437 A 合金的 机械性能和显微組織 影响的研究

[苏联] O. T. 基什金、A. M. 苏利馬、
B. П. 斯特罗加諾夫 合著



國防工業出版社

內 容 簡 介

本书介绍了由各种不同的机械加工方法所造成的表面冷作硬化的实验研究结果以及冷作硬化对ЭИ437A耐热合金的强度性能（持久强度和疲劳强度）的影响。提供了从保证零件最大度性能出发选择由耐热材料制造的零件的合理工艺方法。

本书可供从事耐热钢零件设计、制造的设计师和工艺师参考，也可作为航空和动力高等院校师生的教学参考书。

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАКЛЕПА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВА ЭИ437А

【苏联】С. Т. Кишкин, А. М. Сулима,

В. П. Строганов

ОБОРОНГИЗ 1956

冷作硬化对 ЭИ437A-合金的机械

性能和显微组织影响的研究

范茂祥译

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张 2 $3/8$ 59 千字

1965 年 9 月第一版 1965 年 9 月第一次印刷 印数：0,001—2,600 册

统一书号：15034·907 定价：（科七）0.42 元



冷作硬化对ЭИ 437A 合金的机械 性能和显微組織影响的研究

〔苏联〕С.Т.基什金，А.М.苏利馬，

В.П.斯特罗加諾夫 合著

范 茂 祥 譯



國防工業出版社

1965

目 录

序 言	3
第一章 ЭИ437A 合金机械加工时产生的表面 层冷作硬化的研究	7
1. 試件的材料、形状、尺寸和加工条件	7
2. 表面层冷作硬化的研究方法	17
3. 各种机械加工方法造成的表面层冷作硬化的研究結果	22
第二章 冷作硬化对 ЭИ437A 合金机械性能和显微組織 影响的研究	51
1. 瞬时試驗时冷作硬化对机械性能影响的研究	51
2. 持久試驗时冷作硬化对机械性能影响的研究	54
3. 冷作硬化对疲劳强度影响的研究	65
4. 经过疲劳强度和持久强度試驗的試件的显微組織	69
結 論	71
結束語 和 建議	74
参考文献	75

序 言

燃气涡轮叶片是现代喷气式发动机中最重要和数量最多的零件之一，它决定了发动机的寿命。

要順利解决有关叶片大量生产的組織問題，就必须掌握和制訂能保証所必須的生产率和經濟性的新的工艺規程。其中包括：余量最小的渦輪叶片毛坯的制取；采用鑄造叶片；用寬型面砂輪磨削叶身；纵树形叶片榫头的拉削，叶身拋光的机械化过程等。

但是，在目前条件下，工艺規程不仅要能保証叶片得到規定的几何形状及其尺寸精度，而且要保証叶片具有最大的使用性能（耐热性、热稳定性、疲劳强度等），即是保証叶片在发动机上工作的可靠性与寿命。

零件的使用性能在很大程度上与表面层质量有关，而表面层质量則决定于該零件制造工艺过程的各种条件。

表面层质量是指表面微观不平度和通过显微組織，应力及其物理-机械性能表征的表面层的物理机械状态，也就是下述所称的冷作硬化。

近年来，对表面层质量的研究主要着重于表面微观几何形状（光洁度）的研究。

但是，以表面光洁度作为鉴定表面使用性能的标准往往是不够的。通常这种使用性能在頗大程度上取决于表面层的显微組織、残余应力和物理-机械性能，也就是切削时在表面层中造成的冷作硬化。

至于闡述冷作硬化与造成硬化的各种工艺因素（机械加工方法与切削用量、刀具几何参数、潤滑冷却液等）之間的关系，以及冷作硬化对耐热鋼强度性能的影响等方面的著作还非常少，而

关于在近代噴气发动机上所应用的耐热材料方面的著作則根本沒有。

在改进現有的叶片制造工艺过程和制訂与掌握新的工艺規程方面尚未考虑由于所采用的叶片加工方法和切削用量所造成的冷作硬化对叶片强度性能及其工作寿命的影响。而零件的工作寿命乃是决定工艺过程完善程度的主要特性之一。

目前还缺少这类著作，但实际上，又存在着叶片、叶輪、輪盘和其它零件由于表面层冷作硬化而造成损坏的現象，由此說明編写这一著作的必要性。

本书闡述了下列各方面的研究內容：

1) 用各种不同的方法和切削用量加工之后，表面层中所产生的冷作硬化（显微組織、殘余应力、硬度和塑性变形的扩展深度）；

2) 在短期与长期試驗时，以及在冷态和热态疲劳試驗时，冷作硬化对机械性能的影响。

研究用的試件主要是在工厂工艺試驗室进行机械加工的。在工厂中央試驗室对試件进行了短期和长期的恒溫加热試驗，以及金相組織研究。

符 号 說 明

- v ——車削时的切削速度 (米/分)。
- v_{π} ——零件的圓周速度 (米/分)。
- v_k ——砂輪的圓周速度 (米/分)。
- t ——切削深度 (毫米)。
- Δ ——每边加工余量 (毫米)。
- S ——送进量 (毫米/轉)。
- S_{π} ——横向送进量 (毫米/工件每轉)。
- S_{np} ——工件每轉的纵向送进量 (以砂輪寬度或毫米計)。
- B ——砂輪寬度 (毫米)。
- γ ——前角。
- α ——主后角。
- λ ——車刀主刀刃斜角。
- φ ——主偏角。
- φ_1 ——副偏角。
- R ——刀尖圓弧半徑 (毫米)。
- b ——車刀后面的磨損量 (毫米)。
- I ——車刀切削刃与被切削层接触长度上的电流强度 (安培/毫米)。
- P ——滾压时作用在滾輪上的压力 (公斤)。
- v_{np} ——噴粒速度 (米/秒)。
- h ——冷作硬化深度 (微米)。
- N ——冷作硬化程度 (%)。
- ε ——試件斜角。
- σ_r ——切向殘余应力 (公斤/毫米²)。
- σ_0 ——軸向殘余应力 (公斤/毫米²)。
- k ——殘余应力滲透深度 (微米)。
- H_m ——用金剛石角錐打壓痕时显微硬度 (公斤/毫米²)。
- R_C ——洛氏硬度。
- σ_b ——抗拉强度极限 (公斤/毫米²)。

- σ_D ——恒溫条件下在 D 小时規定時間內的持久强度极限 (公斤/毫米²)。
- σ_{100} ——恒溫条件下在 100 小时之內的持久强度极限 (公斤/毫米²)。
- σ_{-1} ——对称循环交变载荷的持久强度极限 (公斤/毫米²)。
- N_0 ——試件达到疲劳破坏时的循环次数。
- T ——試件由加载到破坏的試驗持續時間 (小时)。
- τ ——在一定範圍內試件整个加热溫度变化循环的时间 (小时)。
- δ ——相对延伸率 (%)。
- ψ ——相对收縮率 (%)。
- u ——电压 (伏特)。

第一章

ЭИ437A 合金机械加工时产生的表面层冷作硬化的研究

1 試件的材料、形状、尺寸和加工条件

被研究材料

被研究材料采用的是用来制造燃气涡轮叶片的 ЭИ437A 镍铬钛耐热合金。这种合金在温度达 1000°C 的氧化介质中具有很高的抗腐蚀性（耐热性），抗蠕变性与抗疲劳性。

研究冷作硬化时采用了直径为 55 毫米的 ЭИ437A 合金棒材，研究机械性能时则采用了直径为 32 毫米的合金棒材。

根据技术合格证的数据以及工厂中央试验室进行的分析，被研究合金的化学成分均符合技术条件的要求（表 1）。

表 1

化学分析	化 学 成 分 %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
工厂中央试验室	0.06	0.30	0.41	20.15	其余	0.55
“电炉钢”承制工厂	0.05	0.22	0.31	20.35	其余	0.40
按技术条件	≤0.06	≤0.35	≤0.65	19.0~22.0	其余	≤1.0

化学分析	化 学 成 分 %					
	Ti	Al	Cu	S	P	Ce
工厂中央试验室	2.54	0.75	0.016	0.004	0.0035	—
“电炉钢”承制工厂	2.54	0.84	0.03	0.006	0.005	0.01
按技术条件	2.2~2.7	0.5~0.95	≤0.07	≤0.007	≤0.015	≤0.01

注：Pb<0.0005%，Bi、Sn、Sb、As——无。

工厂中央試驗室在布氏硬度机上沿毛坯表面层与其截面上測出 ЭИ437A 合金檢驗試件的硬度范围如下:

a) 供应状态 $d_{\text{орт}} = 3.5 \sim 3.7$ 毫米;

б) 热处理后 $d_{\text{орт}} = 3.6 \sim 3.65$ 毫米。

在 700°C 溫度条件下瞬时試驗和持久試驗的結果列于表 2。

表 2

材料状态	瞬 时 試 驗					耐热性持久試驗				备 注
	棒材号碼 No	試驗溫度 °C	σ_b 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %	棒材号碼 No	試驗溫度 °C	負荷 公斤/毫米 ²	試驗時間	
淬 火 1080°C 8 小时在空 气中冷却	1	700	76.5	15.2	15.4	1	700	36	100	取下試件
	2	700	81.2	11.0	17.7	2	700	36	204	試件已破坏
时效 700°C 16 小时在空 气中冷却	按技术条件	700	≥ 62	≥ 5.0	≥ 12.0	按技术条件	700	36	≥ 100	—

熔炼檢驗时曾确定, 被研究合金的宏观組織均匀, 具有中等粒度, 相当于技术条件中 1 級标准粒度。

該次熔炼中微观組織粒度值相当于 3~4 級标准粒度。

因此, 所选的 ЭИ437A 合金研究用熔炼材料的质量符合于技术条件 3099-52 的要求。

所研究的机械加工方法和加工用量

按表 3 所列各种加工方法与切削用量进行机械加工之后, 对試件表面层的冷作硬化: 硬化深度和硬化程度, 显微組織与残余应力进行了測定。

試件是利用具有 22 千瓦直流电动机和无級变速的 <<Monarch>> 型車床以規定的用量車削的。

表 3

切削 用量 代号	加工方法	切 削 用 量					余量 毫米	刀 具	备 注
		v 米/分	s 毫米/轉	f 毫米	s_{np} 毫米/轉	$v_{доп}$ 米/分			
I-1	用鋒利車刀車削 ($b=0$)	2	0.25	0.5	—	—	0.5	P18高速鋼端面車刀, $\gamma=\alpha=10^\circ$, $R=2$ 毫 米, $\varphi=90^\circ$, $\varphi_1=0$, λ $=0$, 車刀前面是平面型	b —后面磨 損(毫米)
I-2	同 上	6	0.25	0.5	—	—	0.5		
I-3	同 上	25	0.25	0.5	—	—	0.5	BK8 硬質合金 端面車 刀, $\gamma=\alpha=10^\circ$, $R=2$ 毫 米, $\varphi=90^\circ$, $\varphi_1=0$, λ $=0$, 車刀前面是平面型	
I-4	同 上	75	0.25	0.5	—	—	0.5		
I-5	同 上	6	0.05	0.5	—	—	0.5	見用量 I-2	
I-6	同 上	6	0.12	0.5	—	—	0.5	同 上	
I-7	同 上	6	0.5	0.5	—	—	0.5	同 上	
I-8	同 上	6	1.0	0.5	—	—	0.5	同 上	亦稱強力切削
I-9	同 上	6	2.0	0.5	—	—	0.5	同 上	
I-10	同 上	6	0.25	0.25	—	—	0.25	同 上	

(續)

切削 用量 代号	加工方法	切 削 用 量						余量 毫米	刀 具	备 注
		v 米/分	s 毫米/轉	t 毫米	s_{up} 毫米/轉	v_{ker} 米/分	潤滑 冷却液			
I-11	同 上	6	0.25	1.0	—	—	同上	1.0	同 上	
I-12	同 上	6	0.25	2.0	—	—	同上	2.0	同 上	
I-13	同 上	6	0.5	1.0	—	—	同上	1.0	同 上	粗加工
I-14	用磨鈍車刀車削 ($b=0.1$ 毫米)	6	0.25	0.5	—	—	同上	0.5	同 上	
I-15	同 上 $b=0.2$ 毫米	6	0.25	0.5	—	—	同上	0.5	同 上	
I-16	同 上 $b=0.3$ 毫米	6	0.25	0.5	—	—	同上	0.5	同 上	
I-1	导电車削 $b=0$	6	0.25	0.5	—	—	同上	0.5	見用量 I-3	$I=133$ 安培/毫米 " $u=0.6$ 伏特
I-2	同 上	6	0.25	0.5	—	—	同上	0.5	同 上	$I=250$ 安培/毫米 " $u=0.6$ 伏特

I-3	同上	6	0.25	0.5	—	—	同上	0.5	同上	$I=400$ 安培/毫米 $u=0.6$ 伏特
II-1	用鋒利車刀車削	見用量 I-2		—	—	—	同上	0.5	見用量 I-2	錄利砂輪
	磨削(橫磨法)	30 米/秒	0.002	—	—	10	乳化液	0.3	電銅示, 硬度CI, 粘土結合劑	
II-2	用鋒利車刀車削	見用量 I-2		—	—	—	不加冷却液	—	見用量 I-2	錄利砂輪
	磨削(橫磨法)	30 米/秒	0.006	—	—	10	乳化液	0.3	見用量 II-1	
II-3	用鋒利車刀車削	見用量 I-2		—	—	—	不加冷却液	—	見用量 I-2	錄利砂輪
	橫磨法磨削(錄利砂輪)	30	0.002	0.002	—	30	乳化液	0.3	見用量 II-1	
II-4	用鋒利車刀車削	見用量 I-2		—	—	—	不加冷却液	—	見用量 I-2	錄利砂輪
	橫磨法磨削(錄利砂輪)	30	0.006	0.006	—	30	乳化液	0.3	見用量 II-1	
II-5	用鋒利車刀車削	見用量 I-2		—	—	—	不加冷却液	—	見用量 I-2	錄利砂輪
	橫磨法磨削(純砂輪)	30	0.002	0.002	—	10	乳化液	0.3	見用量 II-1	
IV-1	用鋒利車刀車削	見用量 I-2		—	—	—	不加冷却液	—	見用量 I-2	砂輪寬度 $B=40$ 毫米
	縱向走刀磨削(錄利砂輪)	30	0.01	0.01	12	10	乳化液	0.3	見用量 II-1	

(續)

切削 用量 代号	加工方法	切 削 用 量					余量 毫米	刀 具	备 注
		v 米/分	s 毫米/轉	t 毫米	s_{np} 毫米/轉	$v_{\text{дв}}$ 米/分	潤滑 冷却液		
IV-2	用鋒利車刀車削			見用量 I-2			不加 冷却液	見用量 I-2	
	纵向磨法磨削 (鋒利砂輪)	30	0.03	0.03	12	10	乳化液	見用量 II-1	
IV-3	用鋒利車刀車削			見用量 I-2			不加 冷却液	見用量 I-2	
	纵向磨法磨削 (鋒利砂輪)	30	0.06	0.06	12	10	乳化液	見用量 II-1	
V-1	用鋒利車刀車削			見用量 I-2			不加 冷却液	見用量 I-2	
	拋光	20	手动			10	同上	毡輪 $\phi 200$ 粒度 60	
V-2	用磨鈍車刀車削 ($b = 0.3$ 毫米)			見用量 I-2			同上	見用量 I-2	
	拋光	20	手动			10	同上	見用量 V-1	
VI-1	用鋒利車刀車削			見用量 I-2			同上	見用量 I-2	
	橫磨法磨削 (鋒利砂輪)	30	0.002	0.002		10	乳化液	見用量 II-1	
	拋光	20	手动			10	不加 冷却液	見用量 V-1	

用磨鈍車刀車削 ($b=0.3$ 毫米)	見用量 I-2	同上	見用量 I-2	見用量 I-2
V-2 橫磨法磨削 (銼砂輪)	30	0.002	10	見用量 I-1
拋光	20	手動	10	見用量 V-1
V-1 用鋒利車刀車削	6米/分	0.25		見用量 I-1
	滾壓 $P=100$ 公斤			9XBI 鋼滾輪 $R_c=60\sim 62$, $\phi 50$ 毫米, $R=5$ 毫米
VI-2 用鋒利車刀車削	6	0.25		見用量 I-2
	滾壓 $P=150$ 公斤			見用量 VI-1
VI-3 用鋒利車刀車削	6	0.25		見用量 I-2
	滾壓 $P=250$ 公斤			見用量 VI-1
VI-1 用鋒利車刀車削	43.5 米/秒		7.5	見用量 I-2
	噴粒加工			生銹粒 $\phi=0.7$ 毫米
VI-2 用鋒利車刀車削	50.0		7.5	見用量 I-2
	噴粒加工			見用量 VI-1

注: 1. 切創用量代號; 第一項是表示加工方法, 第二項是表示切創用量 (如表中所示), 加工方法採用的代號為: I—車削; I—導電車削; II—橫磨法磨削; IV—縱磨法磨削; V、VI—拋光; VII—滾壓; VIII—噴粒加工。

2. 車削採用一次行程。

噴粒時間 4
分鐘, 噴射高
度 300 毫米

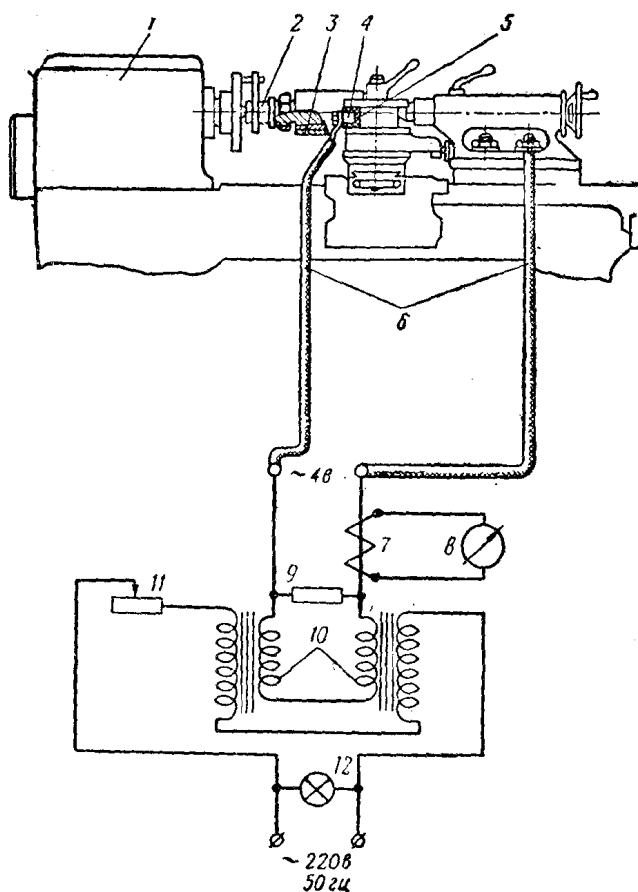


图1 导电車削設備示意图：

1—1A62 型車床；2—錐形心軸；3—試件(套筒)；4—車刀；5—絕緣墊；6—導線；7—電流變壓器；8—安培表；9—負載電阻；10—變壓器；11—變阻器；12—信號燈。

图1所示为在切削区域通以电流的导电車削●示意图。

变压器低压綫圈一端通过導綫接在机床床身上，另一端接在車刀刀杆上，刀杆用夹布胶木垫与机床刀架加以絕緣。

● 詳見苏联机械工业出版社1951年第二版，机械制造先进工艺，第一部分，M. H. 拉林著“利用切削区域导电法加工淬火鋼的研究”。

以 $I = 133$ 安培/毫米[●] (見用量Ⅱ-1), $I = 250$ 安培/毫米 (見用量Ⅱ-2) 和 $I = 400$ 安培/毫米 (見用量Ⅱ-3) 的电流車削后, 对冷作硬化进行了研究。

根据以前进行的試驗, 我們取电流强度 $I = 133$ 安培/毫米的車削用量最为合适。

机械試驗試件仅按最合适的切削用量进行了加工。

試件的滾压是在1A62型車床上进行的, 其专用夹具(图2)系由苏联中央机器制造工艺和科学研究所設計的。

滾压是应用三个相互成 120° 角的滾輪进行的。滾輪用9XBT鋼制成, 硬度为 $R_c = 60$ 。滾輪軸固定于活动支架上。滾輪对試件的壓力由已調好的彈簧来控制。滾輪支架与車床刀架一同沿試件軸綫移动。滾輪的尺寸和試件滾压用量列于表3中。

机械試驗用的試件以 $P = 250$ 公斤的壓力 (見用量Ⅱ-3) 进行了滾压加工。

試件噴粒加工是在离心式噴粒設備上进行的, 噴粒直徑为0.7毫米, 噴粒速度 $v_{ap} = 43.5$ 米/秒 (最佳用量) 和 $v_{ap} = 50$ 米/秒, 噴粒时间为4分钟。

試件的形状与尺寸

利用圓环(图3a)測定切向残余应力, 利用从套筒(图3b)上切下的薄片(图3c, d)測定軸向法向应力, 硬化深度和硬化程度。

从套筒上切下的薄片和圓环的制造过程如下:

1. 車削棒材試件毛坯;
2. 磨削試件毛坯內孔, 外圓与端面;
3. 热处理: 淬火、时效;
4. 按表3所列的用量进行机械加工 (造成变形表面层);
5. 从套筒上切下薄片試件。

● 安培/毫米—車刀切削刃与被切削层接触长度上的电流强度。