

燃气涡轮发动机 叶片的机械加工

[苏联] M. Ф. 伊宗著

国防工业出版社

燃气渦輪发动机 叶片的机械加工

[苏联] M. Ф. 伊宗 著

張云祥、彭炎午 等譯

彭炎午 校



國防工業出版社

1965

出版者的話

本書介紹了蘇聯近年來在葉片機械加工方面所取得的一些成果。

書中對燃氣渦輪發動機的渦輪葉片、導向器葉片、壓氣機工作葉片和整流葉片的機械加工均作了比較全面的論述，介紹了葉片結構的工藝性、主要技術要求、材料的切削加工性、葉片製造工藝過程及設備等。對葉片精加工的機械化和自動化問題也給予了注意。此外，葉片檢驗、電加工、表面質量、毛坯等方面的問題也都有所闡述。

本書可供有關工廠和科研單位的技术人員及高等院校動力機械專業師生閱讀。

參加本書翻譯工作的除張雲祥、彭炎午外，還有吳靖榮、王建業、李書良、沈肖鏞、牛照均、劉寅官等同志。

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

〔蘇聯〕М. Ф. Идзон

ОБОРОНГИЗ 1963

燃氣渦輪發動機葉片的機械加工

張雲祥、彭炎午等 譯

彭炎午 校

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第074號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

850×1168¹/₃₂ 印張9¹³/₁₆ 252千字

1965年3月第一版 1965年3月第一次印刷 印數：0,001—2,700冊

統一書號：15034·843 定價：（科七）1.60元

目 录

序言	5
第一章 叶片的结构工艺性	7
§1 叶片的叶身表面的工艺性	7
§2 叶片榫头的工艺性	14
第二章 涡轮工作叶片的加工	17
§1 叶片的结构和制造技术条件	17
§2 工作叶片材料	19
§3 工作叶片的毛坯	20
§4 工作叶片材料的加工性	23
§5 叶片在机械加工中的定位	48
§6 加工涡轮工作叶片的工艺方案	51
§7 涡轮工作叶片加工主要工序的实现	59
§8 铸造涡轮工作叶片的加工	86
§9 提高涡轮工作叶片可靠性的工艺方法	88
第三章 压气机叶片的加工	98
§1 压气机叶片的结构特点和制造技术条件	98
§2 压气机叶片材料	100
§3 压气机叶片的毛坯	101
§4 压气机叶片材料的加工性, 钛合金的加工特点	102
§5 叶片加工工艺过程的特点和主要工序的实现	116
§6 叶片加工中主要工序的实现	118
§7 钛合金叶片的加工	153
第四章 涡轮导向器叶片的加工	158
§1 叶片结构和制造技术条件	158
§2 涡轮导向器叶片的毛坯	159
§3 叶片加工的工艺方案	159
§4 涡轮导向器叶片加工中主要工序的实现	159

第五章 叶片叶身的磨削	165
§1 叶身最后加工机械化的方法	165
§2 砂輪磨削	165
§3 砂帶磨削	173
第六章 叶片叶身的拋光	219
§1 机械拋光	219
§2 液体磨料拋光	237
第七章 叶片生产的自动化	242
§1 压气机工作叶片榫头加工自动綫	242
§2 压气机整流叶片榫头加工自动綫	251
§3 加工叶片的程序控制机床	262
§4 叶片的靠模制造的自动化	266
第八章 叶片的电加工	270
§1 叶片叶身的电脉冲加工	270
§2 叶片的电化学加工	276
§3 叶片的电解拋光	278
第九章 叶片的檢驗	280
§1 叶片几何参数的檢驗	280
§2 固有振动频率的檢驗	298
§3 荧光檢驗	301
§4 用着色探伤法檢驗	302
§5 用渦流法檢驗	302
附录 按渦輪叶片强度条件进行的叶身加工方法和 加工用量	304
参考文献	314

序 言

燃气渦輪发动机叶片的生产在现代机器制造业中占有特殊地位。这是因为叶片制造有如下几个特点：

1) 叶片在发动机上的重要作用。

叶片对燃气渦輪发动机工作的可靠和不出故障都有决定性的意义。通常，发动机的工作寿命即取决于叶片的工作性能。因此叶片的制造工艺和檢驗技术应当保証制造质量的稳定，并避免在发动机上安装几何尺寸和表面质量有偏差、有冶金方面和其他缺陷的叶片。

2) 叶片几何形状的复杂性，及加工精度的高要求。

叶片的叶身是一种变截面的桨叶，它由复杂的型面組成，对榫头空間相对位置的要求很精确。叶身的制造精度在 $0.05 \sim 0.15$ 毫米范围内。使叶片固定于輪盘的榫头部分的加工精度为 $0.01 \sim 0.02$ 毫米。

3) 叶片生产的批量大。

现代軸流式发动机上的叶片总数約为 2000 片。因此甚至在样机試制时，叶片制造仍然具有成批生产的性质。

4) 在叶片制造中采用昂貴而又稀少的材料。故叶片生产的工艺过程应当保証廢品率最小。

5) 叶片材料的加工性差。

渦輪叶片是用鎳基合金制造的。这种合金韌性既高，硬度又比較大。壓縮机叶片是由高合金鋼和鈦合金制造的，它們的特点也是加工性差。

綜合上述各因素即知叶片生产的特点。

目前叶片生产主要是向机械化和自动化的方向前进。消除手

工劳动不仅可以减少叶片制造的劳动量,而且还能提高它的质量。使用叶片加工自动线的初步经验是值得注意的。看来,今后它还将得到进一步推广。

近来,在采用大用量加工耐热钢、耐热合金和钛合金方面也取得了很大的成就。但是必须指出,到目前为止,切削用量和切削工具的寿命都还不能适应叶片大量生产的要求。

因此,用电加工方法来去除叶身主要金属余量的试验,意义很大。可以预料的是,在不久的将来,电加工和机械加工相结合的方法将在叶片生产中被广泛地应用。

同样可以预料,叶片生产的进一步改进,机械化与自动化的实现,将在科学技术的最新成就(程序控制,新材料和新型刀具等的应用)的基础上进行。

本书综合了工厂和科研机构在生产燃气涡轮发动机叶片方面的工作经验。内容的安排是依据叶片主要结构类型的原则,划分为:涡轮叶片、压气机叶片和涡轮导向器叶片。考虑到这三种叶片叶身的磨削及抛光工艺过程、设备在很大程度上都是近似的,所以作者认为把这些工艺过程列为一章是比较恰当的。

本书对使用特种和专用设备后的加工精度,设备改装的成功经验以及保证叶片工作可靠的工艺措施等问题,都特别给以注意。

在准备手稿时,А. А. 庫英日 (Куинджи) 教授、技术科学副博士 Н. А. 鮑格丹諾夫 (Богданов) 和审阅人 А. Ф. 莫热依柯 (Можейко) 工程师提出了许多宝贵的意见。Н. М. 奥斯特洛夫 (Остров) 工程师在本书的技术校订方面也给作者以很大的帮助。

作者对他们表示感谢!

这种叶片生产经验总结是初次尝试,看来会有很多缺点。因此衷心地希望读者提出意见。

第一章 叶片的結構工艺性

設計燃气渦輪发动机叶片时，除了气体动力学和强度上的要求之外，还应当考虑到工艺性的要求。結構工艺性好的叶片将更快地在成批生产中被熟练掌握。因此时叶片毛坯的制造和机械加工有可能采用高生产率的方法和装备，从而使燃气渦輪发动机上这些数量最大的零件的成本相对地降低，而且，还有可能很快地从一个机种轉換到另外一个机种的生产。

工艺性不好的叶身形状势必要用手工修磨，从而使叶片质量不稳定。叶身形状的工艺性改善后，就可以实现加工的机械化，提高叶片质量稳定程度和使用的可靠程度。

因此叶片結構工艺性是确定这种或那种新型燃气渦輪发动机結構能否存在的因素之一。

§1 叶片的叶身表面的工艺性

加工叶身的劳动量占燃气渦輪发动机叶片制造总劳动量的60~85%。因此应特別注意使叶身表面有良好的工艺性。也就是說，叶身計算截面的設計应符合于使叶身表面可用預定的高生产率方法加工，及能滿足所要求的精度的規律。

叶片叶身表面的分类

所有叶片的叶身表面，按其形成的方法可以分为三种基本类型〔根据 Н. А. 鮑格丹諾夫和 Г. В. 庫德林 (Кудрин) 的分类法〕：

1. 直綫面——直母綫按一定的規律在空間移动时所形成的表面。

2. 衍生面——当某一旋轉表面（展成面）的軸綫沿一原始直綫面运动时，該旋轉面所形成的包絡曲面（图 1-1）。

3. 复杂型面
——所有其他种类的表面。

任意的直綫面
均可用母綫运动的方程式表示。在形成这种或那种直綫面的全部过程中，按照直母綫的直綫运动和旋轉运动的数目，直綫面还可划分为四級。

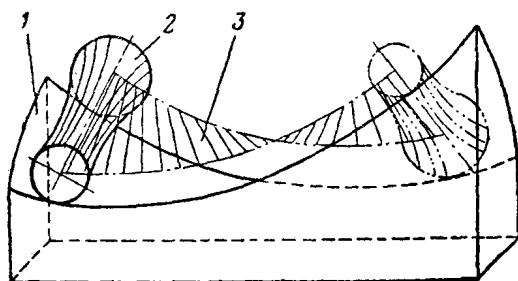


图1-1 衍生面形成簡图：

1—衍生面；2—展成面；3—原始綫性表面。

根据母綫运动时自由度的各种配合，以及存在旋轉运动时根据母綫与旋轉軸綫不同的相对位置，各級直綫面又可分为若干种。

一級直綫面共有四种：母綫作直綫运动所形成的平面；直母綫分別圍繞与其相平行、相交和交叉（但不相交）的軸綫旋轉而成的圓柱面，圓錐面和旋轉双曲面。

第二級直綫面有柱形（图 1-2 a）、錐形（图 1-2 b）、螺旋形（图 1-2 c）以及另外一些沒有固定名称的表面。

第三級第四級的直綫面种类还更多，但它們都像大多数第二級直綫面一样，还没有固定的名称。

每种直綫面（平面除外）的形状还可以千变万化。例如圓柱形表面的形状随着直径变化而变化。当圓錐頂角变化时同样引起圓錐形表面外形的变化。至于旋轉双曲面的变化則受两个参数（母綫与旋轉軸綫的交叉角及它們之間的距离）的影响。至于二級三級和四級直綫面，影响它們形状的参数就更多了。因此，直綫面的特性是具有多种多样的形状。

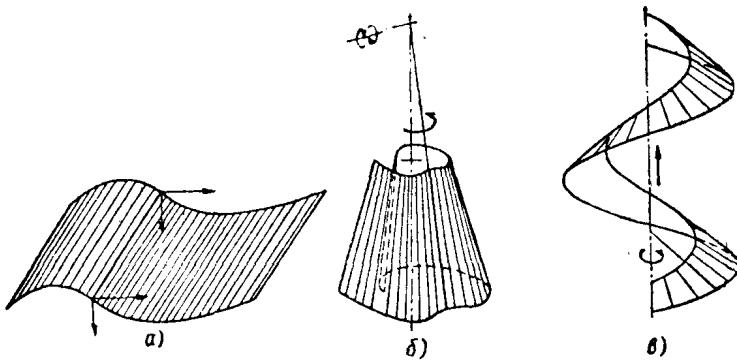


图1-2 第二級直綫面的种类:

a —柱形的; b —錐形的; c —螺旋形的。

衍生表面可以分为兩組, 1) 由圓柱面所展成的表面; 2) 由除圓柱面以外的任意旋轉面所展成的表面。

圓柱面沿其本身軸綫移动和繞它轉动不会影响其衍生面的形状。因此, 当展成圓柱体的直徑給定后, 第一組衍生面即完全取决于原始綫性表面的形状。

由于直綫面和衍生面形状的多样性, 因而当用这些表面对叶身造型时, 可以使如下要求被滿足: 即叶身所要求的几何形状在生产条件下采用高生产率方法加工, 并保持在所要求的精度範圍內。

根据表面形成时的运动特性, 叶身可以用寬刃工具(銑刀、砂輪、砂带、包絡綫滾子等)沿叶身全长或全寬同时加工。

这时, 叶身即可用机械化的方法加工, 从而能够根据成批生产的要求来提高生产率。

必須指出, 还没有一种既考虑到結構又考虑到工艺要求的有根据的叶片叶身外形計算方法, 因此在許多情况下, 毫无根据的使叶身外形复杂化了, 并且过份地提高了对它制造精度的要求。

下面举例說明用直綫面和衍生面进行叶片叶身的造型, 以便

于用高生产率的方法来制造它們。

当叶片的叶身具有恒定的截面而且沒有扭曲时，其表面为非圆形的直柱面，这种叶片（图1-3）能够用寬刃工具加工。

这种结构在导向器叶片和整流叶片中最常遇到。可是根据气动力学和强度方面

的要求，叶片的截面通常都是变化的，或者叶片截面沿高度虽然不变，但具有不同的安装角。这两种结构的叶片統称为叶身扭曲的叶片。

經驗表明，在这种情况下，設計出的叶片仍可以保持定截面无扭曲叶身的叶片所具有的将近全部的工艺优点。

例如，渦輪导向器叶片的叶身計算截面就是按垂直于排气边缘給出的。

在叶片叶身造型时，通常采用的两个

图1-4 未考虑用高生产率方法加工而設計的叶身扭曲的渦輪导向器叶片。

原始截面是在导向器內环和外环附近。它們在造型时互不相依，此时只需保持排气边缘的半径一致（图1-4 I-I 和 II-II 截面）。

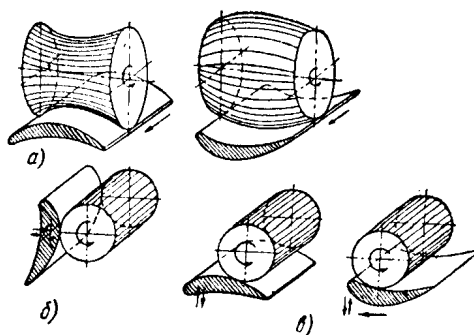
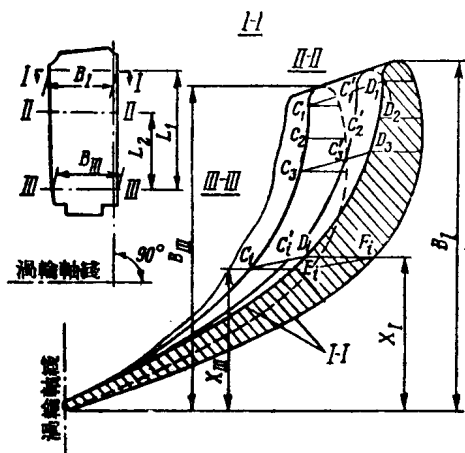


图1-3 定截面无扭曲叶身的加工简图：

a) 不用靠模机床，叶片的边缘单独加工；
b) 一次走刀加工叶身的所有部分；B—叶身

的两面按平面靠模加工，边缘单独加工。



叶片的叶盆和叶背是使直线沿原始型面外形移动而形成的。任意中间截面，例如Ⅰ-Ⅰ截面，都是上述直线面被垂直于排气边缘的平面切开所得到的截面。但由于Ⅰ-Ⅰ和Ⅲ-Ⅲ截面的外形不同，以及原始叶栅的宽度不同 ($B_1 \neq B_2$) 因而直线面的所有母线都不平行。而在两截面之间的线段 (C_1D_1 、 C_2D_2 等等) 相互之间既不相等，又不平行。因此为了用宽刃工具加工由上述方法构成的直线面，必须用带有复杂运动的特种机床。

如果叶背和叶盆的型面是由第二级圆柱形表面构成，那么导向器叶片叶身的工艺性就可以提高。这些表面的安排特点是它们的母线必须不平行于排气边缘 (图 1-5)。

在Ⅰ-Ⅰ和Ⅲ-Ⅲ截面之间的叶盆表面母线，以及它们在垂直于排气边缘的平面

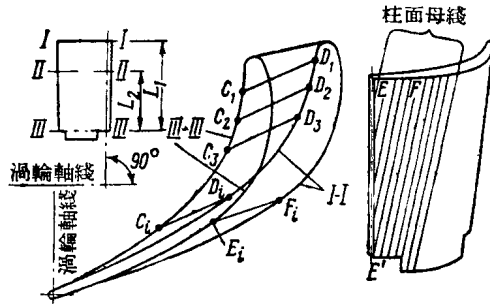


图1-5 叶身扭曲，而叶背和叶盆均为柱形表面的涡轮导向器叶片。

上的投影 (C_iD_i) 彼此相等而且相互平行。可以认为叶背表面母线 (E_iF_i) 相应的投影也是如此。由于叶背柱形表面 (参看图 1-5 右图) 和排气边缘沿直线 EE' 相连接，而 EE' 和表面母线并不吻合，因此，叶背 $EE'F$ 区域是一个平面。除了最下面的截面之外，所有截面的叶背外形在排气边缘处均为直线。叶盆的柱形表面也符合于上述情况。

按上述方法设计的导向器叶片可以用下列方式加工 (图 1-6)。叶片固定在夹具内，夹具装于平面磨床的工作台面上，使柱形表面的母线平行于台面的行程方向。用宽成型砂轮按叶身全宽顺序磨削叶盆和叶背表面。当叶片根部有凸起的安装板或榫头时，它们可以用宽的圆柱形工具 (铣刀、砂轮或砂带) 按平面靠模沿叶

身全长同时加工。

在某些情况下，上述原理也可用于设计涡轮和压缩机的叶片。但是对大多数燃气涡轮发动机而言，不可能设计成带有圆柱面的叶盆和叶背的工作叶片。这时，为了提高叶盆的工艺性，必须使它由锥形表面构成或由成形旋转体沿某一型面的外形滚动所得的表面构成。在大多数情况下，特别

是轴流压缩机叶片，其叶身的设计是按各个截面分别进行的。这时对于在检验截面之间的叶身部分，图纸上一般注有从一个截面到另一截面应保持光滑转接的要求。这个要求的工艺保证以及其正确性的检验在技术上困难很大。

因此，使圆柱体沿两个在设计上互不相关的截面外形滚动为基础的 design 方法是值得注意的。这时，叶身型面的设计就是以这种用滚展运动形成表面的加工方法作为基础的。这种加工方法的实质如下：圆柱形铣刀顺着叶身纵向安装，且从进气边缘向排气边缘沿叶身全长同时加工（图 1-7）。

铣刀轴线的运动决定于 I-I 和 V-V 两个端截面的外形。铣刀圆柱形表面与 I-I 和 V-V 截面所在平面的相交线为椭圆曲线，这椭圆曲线可以用 K_I 、 K_V 两个圆来代替，误差仍在实际允许的范围內。

在加工过程中，铣刀的移动应当使得两个圆弧（ K_I 和 K_V ）连续地沿着相应的原始型面滚动。这两圆弧的中心画出轨迹 M_I 和 M_V ，这两条轨迹是叶盆的 I-I 和 V-V 截面的原始型面等距线，其距离等于铣刀的半径。在这两个截面之间的型面是加工中自动

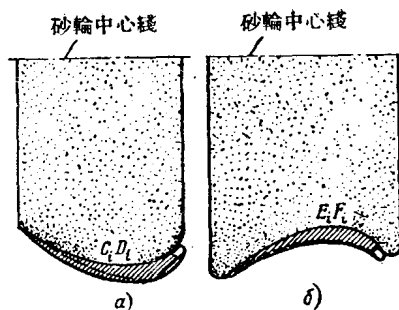


图1-6 导向器叶片叶身加工简图。叶片相对于砂轮的安装应使直线的母线(叶盆的 $C_i D_i$ ，叶背的 $E_i F_i$) 和进给方向重合：
a) 叶盆； b) 叶背。

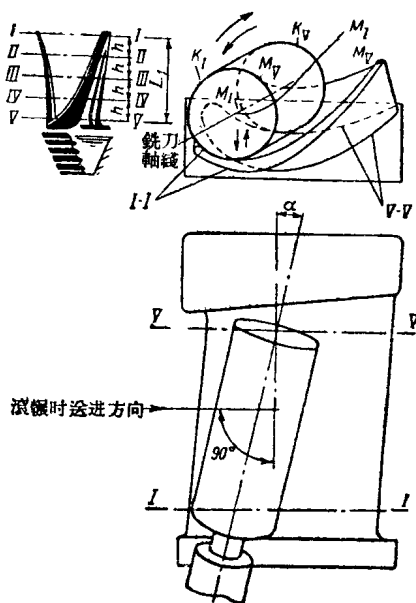


图1-7 圆柱体（柱形铣刀）沿两个型面
外形滚动简图。

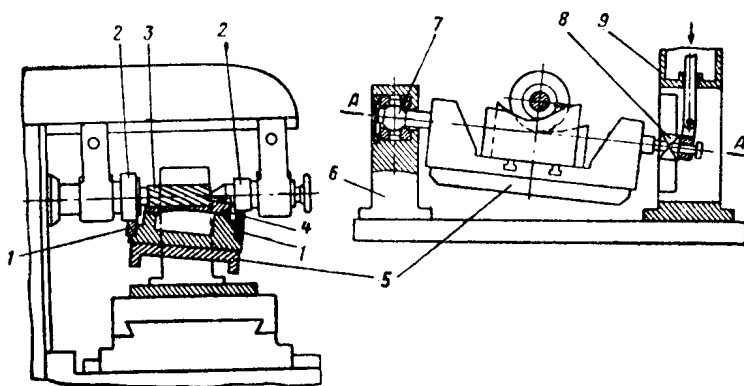


图1-8 叶片叶身加工用的夹具：

1—靠山；2—滚轮；3—铣刀；4—叶片；5—摇架；6—支柱；7—球形轴头；8—滑块；9—液压系统的油缸。

形成的。

当叶片装于图 1-8 所示的夹具中进行叶身加工时，所有的工件运动不是由铣刀完成，而是由被加工的叶片完成的。

利用上述夹具可在普通的卧式铣床上铣削叶身。这时可保证叶身加工的稳定性，偏差约为 0.10~0.15 毫米，表面光洁度相当于 5~6 级。

作为设计这种夹具基础的叶片叶身加工原理已用于许多特种机床中。

§2 叶片榫头的工艺性

在现代燃气涡轮发动机的结构中，涡轮叶片和轮盘的榫树形榫头联结用得最广泛。

不论目前制造榫树形榫头的方法是铣削、拉削还是磨削，加工这些榫头的切削工具的制造都像滚刀的制造一样要经过磨削。

因此榫树形联结的结构应满足合理的磨削方法的要求。

榫树形型面的磨削有两种方法：用相当于一个齿槽形状的多线成型砂轮进行磨削，或用相当于榫头全部齿槽形状的多线成型砂轮进行磨削。

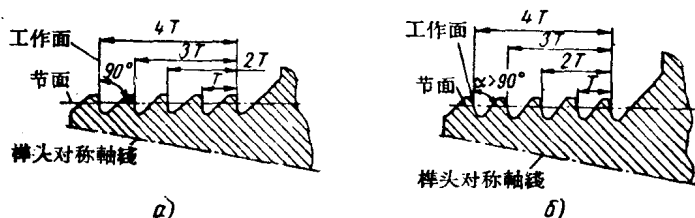


图1-9 榫树形榫头齿形：

a—工作面的倾斜角等于 90° ；b—工作面的倾斜角大于 90° 。

第一种方法对于工作面垂直于节面的齿或工作面对节面的倾斜角大于 90° 的齿的磨削同样适合（图 1-9）。

但由于它的生产率低及难于保证所必要的齿距精度，这种方法不仅不适于磨削叶片榫头，而且也不适于磨削带槲树形齿型的切削工具。

用多线砂轮磨削槲树形齿型可以保证高精度和高生产率。能否采用这种方法加工叶片榫头，完全取决于能否用具有整个榫头型面的打光刀来修整砂轮。但是，还应考虑到，只有当槲树形打光刀在滚压过程中沿整个圆周的磨损很均匀时，则用它修整多线砂轮才是合理的。

图 1-10 上表示出打光刀型面上个别部分的磨损情况。当槲树形截面的工作面对节面的倾斜角大于 90° 时，对这种型面的滚压

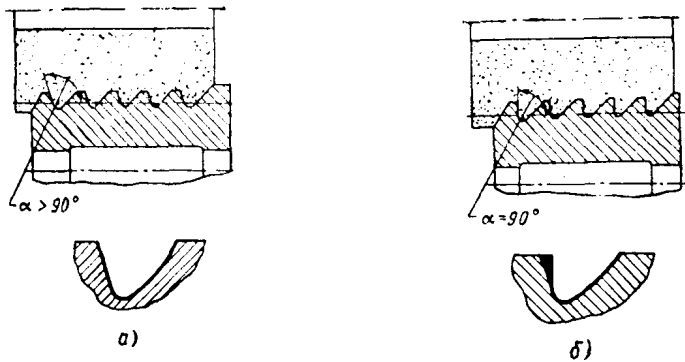


图1-10 在齿形工作面倾斜角不同的情况下滚压齿形时，
圆柱形打光刀的磨损图。

将使齿形两面的磨损几乎一样（图 1-10 a）。在滚压过程中，随着离型面的节面较远的部分滑动速度的逐渐增加，就会引起齿形的畸变。

对于目前采用的槲树形齿高（1.5~2.5 毫米）来说，这种现象的影响不大，所以不妨碍对砂轮型面的滚压。

当槲树形型面的工作面对节面垂直时，如果滚压这种型面，由于打光刀的齿形和被滚压砂轮的接触条件不同，在这些地方的工

