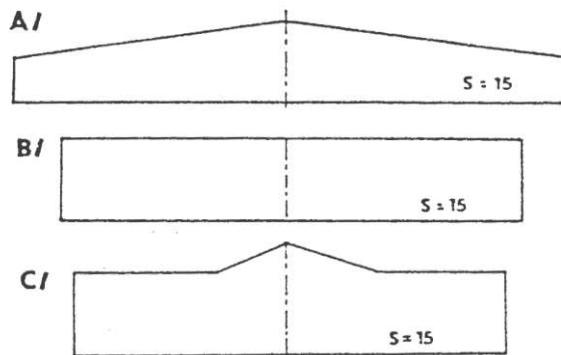


4. Nestlačiteľné prúdenie okolo krídla konečného rozpätia (3D)

4.1. Geometrické charakteristiky krídla konečného rozpätia

Pre ďalšie úvahy je nutné definovať geometrické charakteristiky krídla konečného rozpätia.

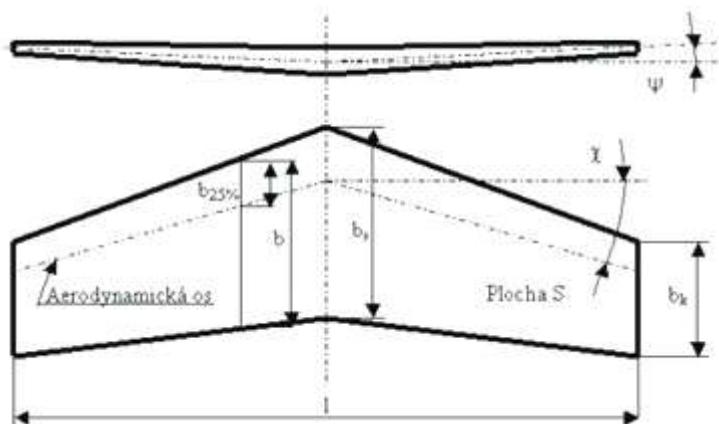
- A) pôdorysný tvar krídla a plocha: často sú používané krídla obdĺžnikové alebo lichobežníkového tvaru (Obr. 71), alebo tvaru vzniknutého ich zložením - v koreňovej časti obdĺžnikové, na konci lichobežníkové apod [28].



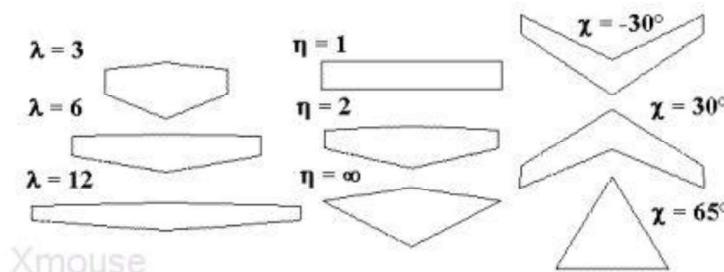
Obr. 71 Tvary krídel

Obvyklé sú krídla trojuholníkového tvaru tzv. „delta“ krídla. Krídla s najlepšími aerodynamickými vlastnosťami sú tzv. „eliptické“, ale kvôli obtiažnej technológií nie sú často využívané.

- B) Plocha krídla S je určená jeho tvarom a príslušnými rozmermi (Obr. 72), ako je rozpätie l , koreňová hĺbka b_0 , koncová hĺbka b_k
- C) Zúženie je pomer koncovej a koreňovej hĺbky $\eta = \frac{b_0}{b_k}$
- D) Štíhlosť krídla λ udáva pomer medzi rozpätím a strednou geometrickou tetivou
- $$\lambda = \frac{l_{obdl}}{b_{obdl}} = \frac{l^2}{S}$$
- E) Uhol šípu χ , sa udáva ako uhol nábežnej, resp. odtokovej hrany, alebo ako uhol spojnic aerodynamických stredov profilov, tj. bodov ležiacich vo vzdialosti 25 % od nábežnej hrany (Obr. 73).
- F) Uhol vzopäcia ψ je uhol medzi krídlom a horizontálou resp. vertikálou



Obr. 72 Geometrické charakteristiky krídla



Obr. 73 Tvary krídel pri rôznych geometrických charakteristikách

4.2. Vírová teória krídla

Prúdenie okolo profilu bolo dvojrozmerné a teda prúdnice sa ohýbali len nahor a nadol. Profil krídla bol chápáný ako krídlo nekonečného rozpätia. Okolo prúdníc reálneho krídla sa prúdnice odchýľujú aj v smere rozpätia a vytvoria tak trojrozmerné obtekanie.

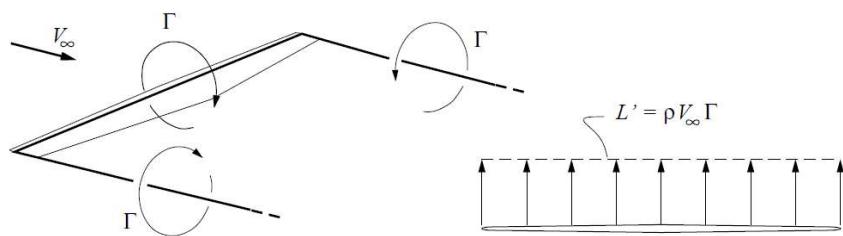
Zmena v obraze prúdníc sa prejavuje najmä na koncoch krídla, kde v dôsledku vyrovnanácia tlakov na spodnej a vrchnej strane krídla dochádza k vytváraniu tzv. okrajových vírov. Vznik okrajových vírov je možné podrobnejšie vysvetliť tzv. vírovou teóriou krídla. Tá sa opiera o teoretickú úvahu, že na otáčajúcom sa valci vloženom do prúdu vznikne vztlak.

Otáčajúci sa valec pôsobí ako jadro tzv. potenciálneho víru. Ak ho umiestnime do prúdu kolmo k rýchlosťi prúdu, dáva vztlak smerujúci na tú stranu, kde sa rýchlosť otáčania sčítá s rýchlosťou prúdu. Intenzita víru, nazývaná cirkulácia je priamo úmerná veľkosti vztlaku. Veľkosť cirkulácie je daná vztahom

$$\Gamma = \frac{1}{2} \cdot v_\infty \cdot c_L \cdot c \quad \text{pre profil} \quad (4.1)$$

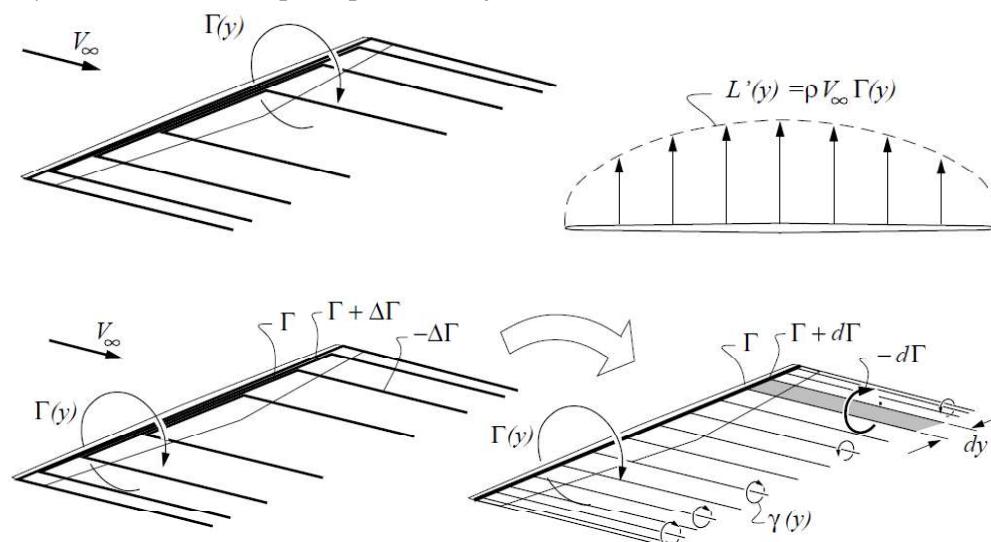
$$\Gamma = \frac{1}{2} \cdot v_\infty \cdot c_L \cdot S \quad \text{pre krídlo} \quad (4.2)$$

Potenciálny vír na krídle sa nazýva nosný (viazaný) vír. Keďže nie je teoreticky možné aby vír končil na konci krídla, tak zbieha dozadu za krídlo vo forme okrajových (voľných) vírov. Toto je najjednoduchší model kedy je krídlo nahradené jedným podkovitým vírom.



Obr. 74 Nosný vír

Získaný popis účinkov podkovitového víru dáva len približné výsledky v porovnaní s reálnym obrazom prúdenia okolo krídla. Presnejšie je nahradenie jedného víru sústavou malých podkovitových vírov, ktoré sa postupne zbiehajú z krídla 28.



Obr. 75 Sústava vírov

Konečné rozpätie krídla sa prejavuje prítomnosťou okrajových vírov za krídlom. Vírové vlákno na ktoré sú viazané stredu vírov sa pri stacionárnom prúdení uzatvára teoreticky v nekonečne. V skutočnosti dochádza k zbaľovaniu vírov, pričom táto vzdialenosť je zložito určená geometriou krídla a súčiniteľom vztlaku. Cirkulácia rýchlosť a teda aj vztlak sa zmenšuje smerom od stredu ku koncom krídla a každý úbytok cirkulácie nosného víru znamená objavenie sa odpovedajúceho víru za krídlom. Za krídlom s nekonečným rozpätiom, kde je cirkulácia stála, voľné víry nevzniknú. Voľné víry indukujú vo svojom okolí rýchlosť, ktoré sú veľké v ich tesnej blízkosti a zmenšujú sa s rastúcou vzdialenosťou od vírového vlákna.

V mieste kde voľné víry prechádzajú donosného víru, sú indukované rýchlosť nekonečne veľké a to vysvetľuje prečo nie je možné obtekanie krídla presne nahradíť obtekaním jediného podkovovitého víru konečnej intenzity. Len druhý (zložitejší) systém, zložený s nekonečného počtu malých vírov dá v mieste nosného víru také rozloženie, aké sa na skutočných krídlach vyskytuje.

4.3. Indukovaný uhol nábehu a indukovaný odpor

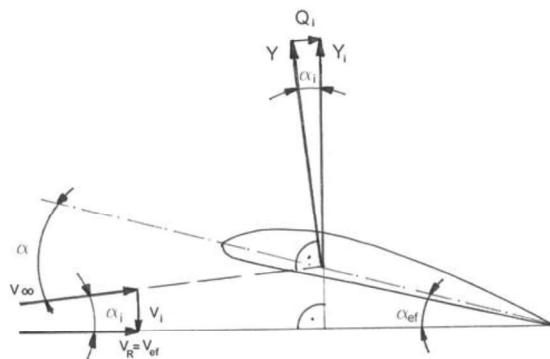
Indukovanú rýchlosť je možné vysvetliť aj jednoduchším spôsobom a to, že tlakový rozdiel na koncoch krídel vyvoláva prídavné prúdenie zo spodnej strany krísla na hornú. Indukovaná rýchlosť je potom rýchlosťou tohto prúdenia na krídle. Je treba zdôrazniť, že rýchlosťi indukované vírovými systémami sú rýchlosťi prídavné, ktoré sa geometricky sčítajú

(superponujú) s rýchlosťami nenarušeného prúdu. Indukované rýchlosťi nevzniknú ak krídlo nie je v prúde tekutiny.

Výsledné prúdenie okolo krídla konečného rozpätia vznikne zložením prúdenia nenarušeného prúdu a nosného víru s prúdením voľných vírov, vyjadreným na krídle indukovanými rýchlosťami.

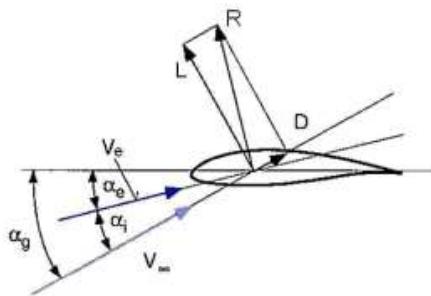
Indukované rýchlosťi bezprostredne ovplyvňujú obtekanie jednotlivých profilov krídel. Profily nie sú obtekané pod uhlom nábehu α daným smerom tetivy profilu a rýchlosťou prúdu, ale pod určitým menším uhlom nábehu tzv. efektívnym α_e . Zmenšenie je dôsledkom indukovaného uhlá nábehu α_i .

$$\alpha_e = \alpha - \alpha_i$$



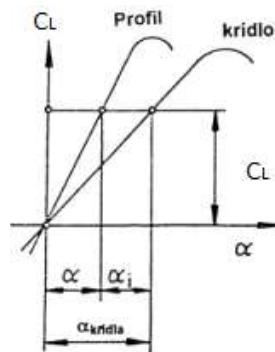
Obr. 76 Indukovaný uhol nábehu

Platí, že čím je indukovaný uhol nábehu menší, tým je krídlo aerodynamicky účinnejšie. Veľkosť indukovaného uhlá nábehu je priamo úmerná veľkosti koeficientu vztlaku, pretože väčší podtlak a pretlak na krídle t.j. väčšia cirkulácia, má za následok zväčšenie indukovej rýchlosťi.



Obr. 77 Geometrický uhol nábehu [16]

Ak má krídlo vytvoriť určitý vztlak, musí byť obtekane pod väčším uhlom nábehu, ako jeho profil pri dvojrozmernom obtekani. Znamená to že stúpanie vztlakovnej krivky, je vždy menšie ako stúpania vztlakovnej krivky profilu. Pri zvyšovaní uhlá nábehu krídla prechádza postupne každý profil krídla na vyššie miestne uhly nábehu. Vzhľadom k tomu že nie sú rovnaké nedostanú sa profily na svoje maximum naraz ale postupne. To má za následok, že prúdenie sa neodtrhne naraz na celom krídle, ale postupne sa rozširuje s oblastí, kde dôjde ako k odtrhnutiu najskôr.



Obr. 78 Porovnanie kriviek vztlaku na profile a krídle

Odchýlenie miestnej rýchlosťi prúdu v o indukovaný uhol nábehu spôsobí na jednotlivých profiloch odchýlenie miestneho vztlaku (koeficientu vztlaku) od smeru prúdu. Miestny vztlak prispieva len jednou zložkou k celkovému vztlaku krídla a jeho druhá zložka má charakter odporu. Pretože má svoju podstatu v indukovanom uhle nábehu a je úmerná jeho veľkosti, nazýva sa indukovaný odpor.

Indukovaný odpor je vlastne zložka profilového vztlaku do smeru nenarušeného prúdu. Tento odpor je viazaný na prítomnosť voľných vírov za krídlom. Energia potrebná pre prekonanie indukovaného odporu sa nestráca trením krídla o vzduch, ale v kinetickej energii voľných vírov, ktoré krídlo vytvára.

$$D_i = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c_{D_i} \cdot S \quad (4.3)$$

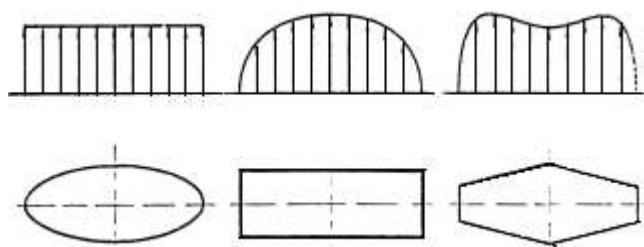
kde c_{D_i} je koeficient indukovaného odporu.

$$c_{D_i} = \frac{c_L^2}{\pi \lambda} (1 + \delta) \quad (4.4)$$

λ je štílosť krídla a δ je korekčný člen malej veľkosti vyjadrujúci vplyv tvaru pôdorysu krídla (pre približné úvahy a výpočty je ho možné zanedbať)

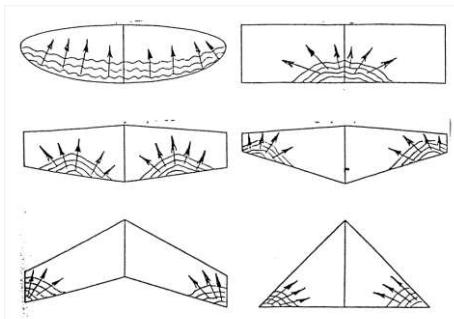
4.4. Pôsobenie síl na krídlo konečného rozpätia

Rozloženie vztlaku po rozpäti krídla je vždy spojité a svojim tvarom sa blíži k elipse. Táto vlastnosť je v súlade s nahradením prúdového obrazu krídla vírovým systémom a nie je závislá na pôdorysnom tvaru krídla. Inak je to s priebehom súčiniteľa vztlaku po rozpäti. Miestne súčinitele (koeficienty) vztlaku sú ovplyvnené pôdorysným tvarom krídla a ich priebeh jednoznačne určuje aerodynamické vlastnosti krídla. Najjednoduchšia je situácia na eliptickom krídle. Vztlak (cirkulácia) i hĺbka profilu sa vyznačuje eliptickým priebehom, koeficient vztlaku je pre všetky profily rovnaký.



Obr. 79 Priebeh vztlaku na rôznych tvaroch krídel

Znamená to, že pri zvyšovaní uhla nábehu celého krídla sa dosiahne odtrhnutie prúdu na všetkých profiloch naraz.



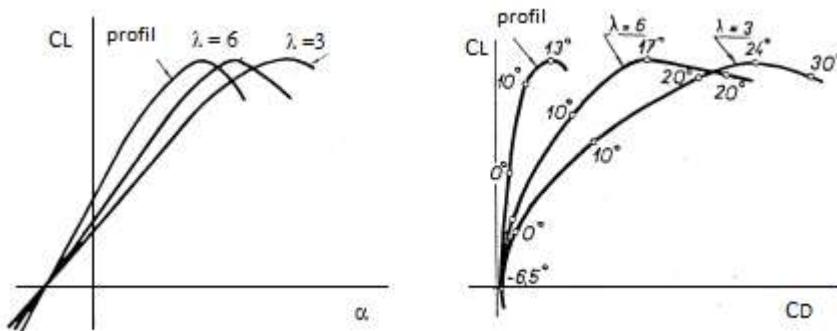
Obr. 80 Miesto odtrhnutia prúdu pri rôznych tvaroch krídel [27]

Teoretickým rozborom vírového modelu krídla je možné matematicky vyjadriť závislosť indukovaného uhla nábehu a koeficienta indukovaného odporu

$$\alpha_i = \frac{c_L}{\pi \cdot \lambda_{ef}} \quad (4.5)$$

$$c_{Di} = \frac{c_L^2}{\pi \cdot \lambda_{ef}} \quad (4.6)$$

kde λ_{ef} je efektívna štílosť krídel. Je to geometrická štílosť upravená o vplyv pôdorysného tvaru krídla a ďalšie faktory, ako vplyv koncových telies atď. Geometrická a efektívna štílosť sa od seba líšia v praxi iba o niekoľko percent. Fyzikálne je uvedené závislosti možné vysvetliť tým, že vyššia štílosť krídla (pri rovnakej ploche) spôsobí, že celkovo menšia časť krídla je ovplyvnená indukovaným uhlom nábehu. Ovplyvnenie aerodynamických charakteristík je vidieť na vztlakovej čiare a poláre krídla s rôznou štílosťou.



Obr. 81 Poláry krídel s rôznou štílosťou [27]

Z uvedených závisostí vyplýva aj vplyv pôdorysného tvaru krídla na aerodynamické charakteristiky. Pri rovnakej ploche má eliptické krídlo najväčšiu štílosť, lichobežníkové menšiu a obdĺžnikové najmenšiu. Z toho je možné odvodiť, že najlepšie odporové vlastnosti a zmeny charakteristík je možné očakávať pri eliptickom krídle. Jeho výroba je v praxi náročná a preto je málo využívané. Indukovaný odpor a zmeny v stúpaní vztlakovej krvky a maximálneho koeficientu vztlaku má lichobežníkové krídlo menšie ako obdĺžnikové, aj keď jeho vlastnosti sú pri odtrhnutí horšie.

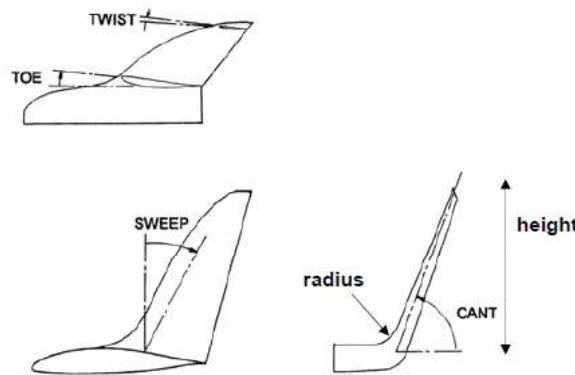
Pomerne najhoršie z hľadiska všetkých efektov spojených s existenciou okrajových vírov je na tom šípové krídlo. Šípové krídlo je podobné obdĺžnikovému, ale indukovaný uhol nábehu a koeficient indukovaného odporu sú väčšie a sú inak rozložené po krídle. Prispievajú k zväčšeniu miestnych koeficientov vztaku na koncoch krídla a tým zväčšujú možnosť odtrhnutia prúdu v týchto častiach. Okrem toho sa prejavuje aj hrubnutie medznej vrstvy smerom ku koncom krídla, spojené so vznikom nepriaznivého tlakového gradientu. Šípom krídla je ovplyvnené aj stúpanie vztakovej krivky, tj. zväčšenie šípu spôsobuje zmenšenie sklonu krivky.

4.5. Winglet pri veterných zariadeniach

Ku zníženiu indukovaného odporu, je pri veľkých uhloch nábehu používaná plocha na konci krídla (prídavné krídlo), ktorému sa hovorí winglet. Jeho úlohou je obmedziť vplyv na indukovaný uhol nábehu. Vplyv wingletu sa prejavuje znížením indukovaného odporu [9].

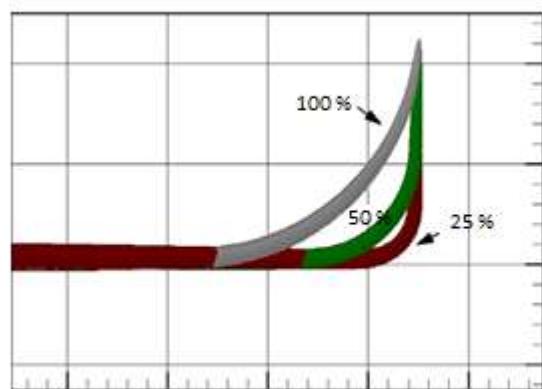
Základné parametre wingletu sú [9]:

- Výška wingletu
- Uhol úklonu (sweep angle)
- Uhol sklonu (cant angle)
- Polomer zakrivenia wingletu (curvature radius)
- Uhol skrútenia (twist angle)
- Uhol zbiehavosti (toe angle)



Obr. 82 Geometrické charakteristiky wingletu

Výška wingletu sa často uvádzá v relatívnom vyjadrení (%) v pomere ku polomeru rotora resp. dĺžke listu rotora. Väčšinou je to okolo 2 %. Uhol skrútenia (twist) je v rozpätí 0 – 8°. Uhol úklonu (sweep) 0 – 30°. Polomer zakrivenia sa tiež vyjadruje v percentoch, a hovorí o to do akej výšky wingletu zakrivenie siaha.



Obr. 83 Zakrivenie wingletu

Z výsledkov výskumov využitia wingletov pri veterných zariadeniach vyplýva, že nárast výkonu veterného zariadenia je do 3 %.