

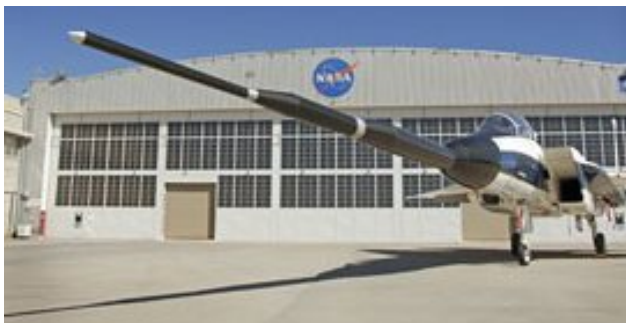
© 2016 Jiří Škorpič

**481 Kumulace šikmých rázových vln**

(a) stupňující se plocha; (b) vznik kompresních vln u pozvolna se zvedající plochy [4]. KV soustava kompresních vln. Každá kompresní vlna představuje drobné zvýšení tlaku, současně se zvětšuje jejich sklon, protože se snižuje Machovo číslo, to znamená, že v místě kde se protnou bude tlak roven součtu zvýšení tlaků v jednotlivých kompresních vlnách, tak v těchto místech vzniká šikmá rázová vlna o nižší intenzitě, než je intenzita původních vln v místě zdroje tlakové poruchy. Proudění dále od plochy tedy prochází šikmou rázovou vlnou než při okrajích s větším úhlem  $\beta_R$ .

proudění ve zužujícím se prostoru, tak jak popisuje Hugoniotův teorém. V praxi ale tento děj není uskutečnitelný, protože snižování průtočného průřezu by muselo být nekonečně malé [11, s. 405]. Asi nejbližše ideálním kompresním vlnám je případ kumulace rázových vln (Obrázek 481). Pokud totiž za šikmou rázovou vlnou vznikne další šikmá rázová vlna, pak tato vlna bude mít větší úhel (protože ji vytvoří menší rychlost), takže tyto dvě vlny se v určité vzdálenosti od místa vzniknu střetnou. V místě střetu se sečtou jejich účinky tj. hybnost a tlak, tím vznikne nová šikmá rázová vlna s úhlem odpovídající tomuto součtu.

V letectví se provádí experimenty se snižování zvukových efektů způsobené rázovými vlnami při nadzvukových letech založené na rozdělení rázové vlny na několik dílčích vln tzv. zředění rázové vlny (Obrázek 905).

**905 Projekt Quiet Spike**

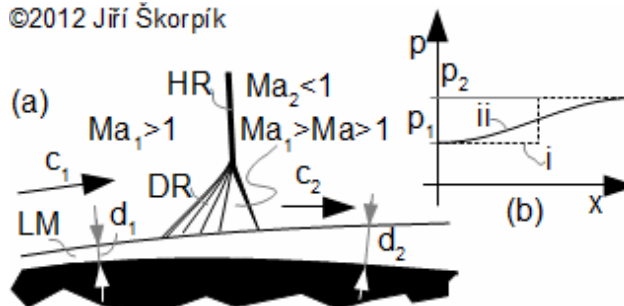
Projekt Quiet Spike se úspěšně zabýval možností snížit intenzitu zvukových efektů pomocí odstupňovaně prodloužené přídě letounu. Zde testování teleskopické přídě letounu F-15B [9].

Kompresní vlny s počáteční rázovou vlnou vznikají také v pozvolna se zužujících nadzvukových difuzorech.

 **$\lambda$ -rázová vlna**

$\lambda$ -rázová vlna (Obrázek 865) vzniká při obtékání těles transonickou rychlostí s laminární mezní vrstvou typickou pro laminární proudění. Její vznik je popsán v kapitole 17. Ztráta rázem při obtékání profilu.

© 2012 Jiří Škorpič

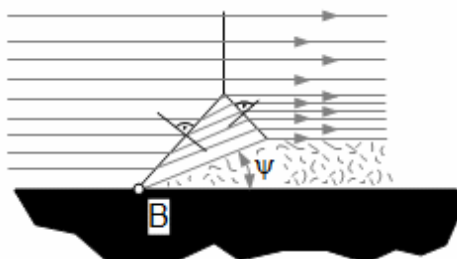
**865 Zjednodušený popis  $\lambda$ -rázové vlny**

(a) celkový náhled; (b) průběh změny tlaku v rázové vlně a v mezní vrstvě. **i** průběh tlaku v jádru proudění těsně před a za rázovou vlnou; **ii** průběh tlaku v laminární mezní vrstvě. **P** stěna profilu; **x** [m] souřadnice profilu; **LM** laminární mezní vrstva; **d** [m] tloušťka mezní vrstvy; **HR** hlavní přímá rázová vlna; **DR** druhotné šikmé rázové vlny vznikající v důsledku zvětšení tloušťky mezní vrstvy.

Protože v mezní vrstvě je podzvukové proudění, zvyšuje se v ní tlak postupně zároveň na úkor rychlosti. Tím se zvětšuje její tloušťka a vzniká klín od kterého dochází ke kumulaci šikmých rázových vln podle Obrázku 481. Výsledná rázová vlna je často mírně skloněna dopředu [1].

V případě turbulentního proudění je klín velmi malý (turbulentní proudění není tak citlivé na změnu tlaku) a na hranici mezní vrstvy vzniká přímo kolmá rázová vlna.

Obecně ztráta v  $\lambda$ -rázové vlně je menší než u přímé rázové vlny a větší než u šikmé [1, s. 201]. Z toho je také zřejmé, že proudnice jenž prošly šikmými rázovými vlnami (ta část  $\lambda$ -vlny blíže k profilu) budou mít jinou rychlost (i když podzvukovou) než proudnice, které prošly přímo přes přímou rázovou vlnu. Navíc ke ztrátě rázovou vlnou je nutné přičíst ztrátu odtržením od profilu, která vzniká za  $\lambda$ -rázovou vlnou [1, s. 198], [6, s. 132], viz *Obrázek 867*.



867 Održení proudu od profilu za  $\lambda$ -vlnou  
B bod odtržení;  $\psi$  [°] úhel odtržení.

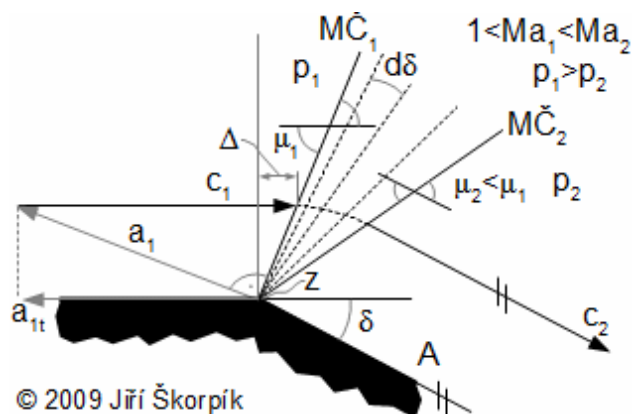
• • •

©2012 Jiří Škorpík

## Expanzní vlny

Pokud se nadzvukové proudění dostane do prostoru se zvyšujícím se průtočným průřezem musí expandovat do vyšší rychlosti jak predikuje Hugoniotův teorém. Taková nadzvuková expanze probíhá formou expanzních vln.

Zvyšující se průtočný průřez vytvářejí i tupé úhly na tělesech, například odtoková hrana projektilů, místa počátku zužování trupu letounů apod., viz *Obrázek 340*, *Obrázek 810*. Při obtékání tupých úhlů nadzvukovou rychlostí musí docházet k expanzi plynu z tlaku  $p_1$  na tlak  $p_2$  a ke zvýšení rychlosti proudu z  $c_1$  na  $c_2$ , zároveň dojde i k vychýlení směru proudícího plynu o úhel  $\delta$  od původního směru.



© 2009 Jiří Škorpík

340 Obtékání tupého úhlu nadzvukovou rychlostí  
MČ Machova čára;  $\Delta$  [rad] odklon proudu při obtékání tupého úhlu.

V expanzní vlně nedochází ke skokové ale pozvolné změně stavových veličin při expanzi s velmi nízkými ztrátami (izoentropická expanze). Hrana z vyvolává tlakovou poruchu, která se šíří proti proudění rychlostí  $a_{1t}$ . První proudnice zareaguje okamžitě a začne expandovat do tlaku nižšího změnou směru proudění ve směru poklesu tlaku. Vzdálenější proudnice expanduje až za hranou z, protože než k ní dorazí tlaková porucha urazí vzdálenost  $\Delta$ . Hranice z, na které se začne měnit směr proudění a plyn expandovat je tzv. Machova čára nebo také