

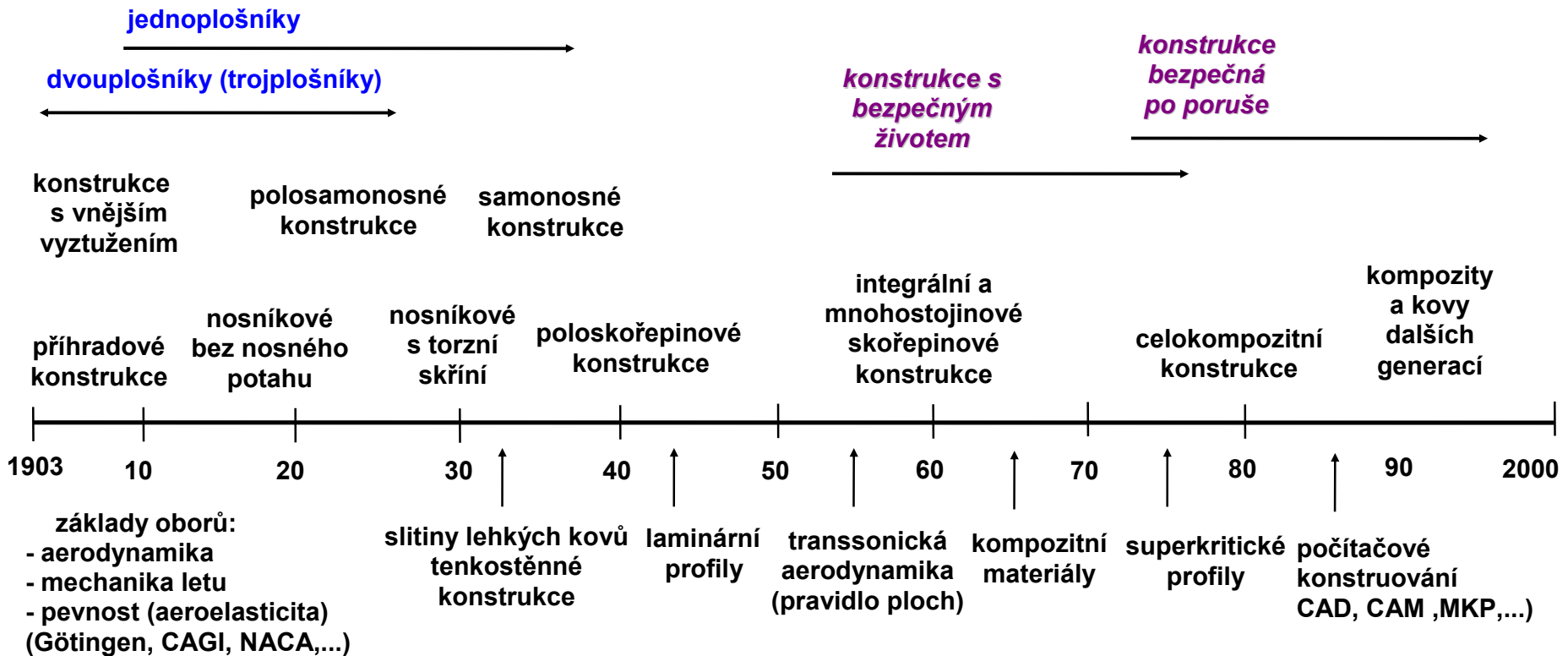
Bezpilotní prostředky

2. Konstrukce

Letecká konstrukce – zajišťuje vnější tvar + vnitřní prostory + přenos zatížení

Konstrukci ovlivňuje: – pohonná jednotka + aerodynamika (síly) + mechanika letu (pohyb - letové výkony a vlastnosti) + letecké materiály + pevnost a pružnost (dimenzování) + výrobní technologie + bezpečnost (letecké předpisy) + ...

Vývojové leteckých konstrukcí



Bezpečnost - Spolehlivost - Letová způsobilost

Vývoj požadavků na letecké konstrukce:

1. etapa (úplné začátky létání)
2. etapa (brzy po začátku létání)
3. etapa (letectví jako průmyslový obor)

konstrukce = funkce
konstrukce = funkce + bezpečnost
konstrukce = funkce + bezpečnost + ekonomie ...optimalizace

Trend – ↑ nákladů na letadlovou techniku (↑ požadavků na: bezpečnost + komfort + vyšší výkony,...)

Bezpečnost = vlastnost plnit funkci bez ohrožení zdraví či života lidí.

Minimální míru bezpečnosti zajišťují letecké předpisy (konstrukce, provoz, školení,...)
– evropská norma JAR, americká FAR

Spolehlivost = měřítko poruch a odchylek provozních ukazatelů (mimo meze a v čase).
(analýza dopad poruch a odchylek na bezpečnost)

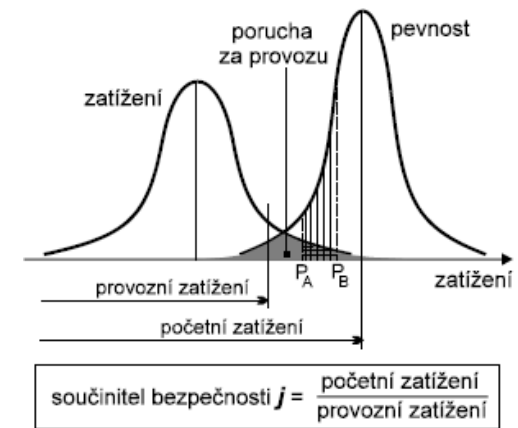
Teorie spolehlivosti letadlové techniky - technická disciplína (pevnost, letadlové systémy, lidský faktor,...).

Etická míra kritéria poruch - účastník provozu nesmí být ohrožen více než v běžném životě tj. 1x za 75 let

míra poruch na 1 hodinu = $1/(75 \text{ let} \cdot 12 \text{ měsíců} \cdot 30 \text{ dnů} \cdot 24 \text{ hod}) = 1,5 \cdot 10^{-6}$ poruch/hod

statistika: 80% lidský faktor + 20% technika → míra poruch techniky $1,5 \cdot 10^{-7}$ poruch/hod

Letová způsobilost – technický stav daný leteckými předpisy garantující předepsanou úroveň bezpečnosti



Bezpečnost a pevnost konstrukce

Základní konstrukční požadavek: **minimální hmotnost !!!**
⊕
Bezpečnostní požadavek: $1,5 \cdot 10^{-7}$ poruch/hod

letecké konstrukce = navrhování a průkaz na početní mezní stavy konstrukcí

mezní stav:

- materiálová porucha (utržení, ukroucení, zlomení...)
- zborcení (ztráta stability) ... zvlnění vybočení - letecké konstrukce = tenkostěnné a štíhlé prvky
- nepřípustná deformace omezující funkce (řízení, spoje křídla s trupem, ...)

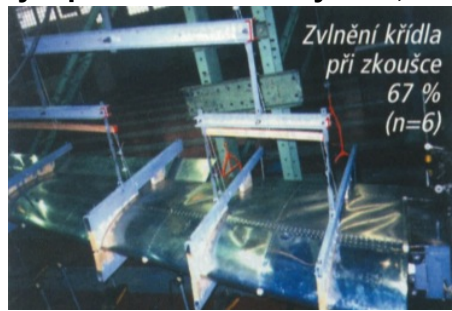
- Postup**
- 1) P_{pr} - **provozní zatížení** (s malou pravděpodobností může být na součásti překročeno)
 - 2) P_{po} - **početní zatížení** (zatížení, při kterém dojde k poruše konstrukce)

$$P_{po} = P_{pr} \cdot j$$

součinitel bezpečnosti $j = 1,5 - 2 !!!$

zahrnuje: nejistoty v materiálových charakteristikách, odchylky od skutečného zatížení, nejistoty v pevnostních analýzách,...

- 3) **dimenzování** = "při početním zatížení dochází k poruše"
- 4) **pevnostní zkouška** = experimentální průkaz na početní zatížení ("lámačka")
 - porucha pod 100% P_{po} – podmimenzováno není bezpečné
 - porucha při 100% P_{po} – správný návrh
 - porucha nad 100% P_{po} – bezpečné, ale předimenzované ("těžká konstrukce")
- 5) **ověření dynamické pevnosti** = únava, aeroelasticita (samobuzené kmitání –"Flutter",...)



obtížnost postupu – stanovení mezního stavu !!! (numerické metody konečných prvků, experiment)

Letecké materiály

Kovové:

Oceli - konstrukční uzly

ušlechtilé oceli tř. ČSN 12 (L-VARD), 14 (L-ROL) 15 (L-CM3) 16 (L-RC)

Slitiny na bázi lehkých kovů

- slitiny Al: AL-Cu- Mg, Al-CU Zn-Mg
(dural !!!, superdural - žebra nosníky, potahy,...)
Al-Si-...silumin (odlitky)
Al-Li-X slitiny s lithiem (perspektivní, drahé)
- slitiny Mg: elektron

Slitiny Ti: - pevnostně a hmotnostně mezi ocelí a slitinami Al,
tepelná odolnost

Nekovové:

Kompozitní materiály

Ostatní nekovové materiály (dřevo, plastické hmoty)

Kombinované:

Vrstvené materiály

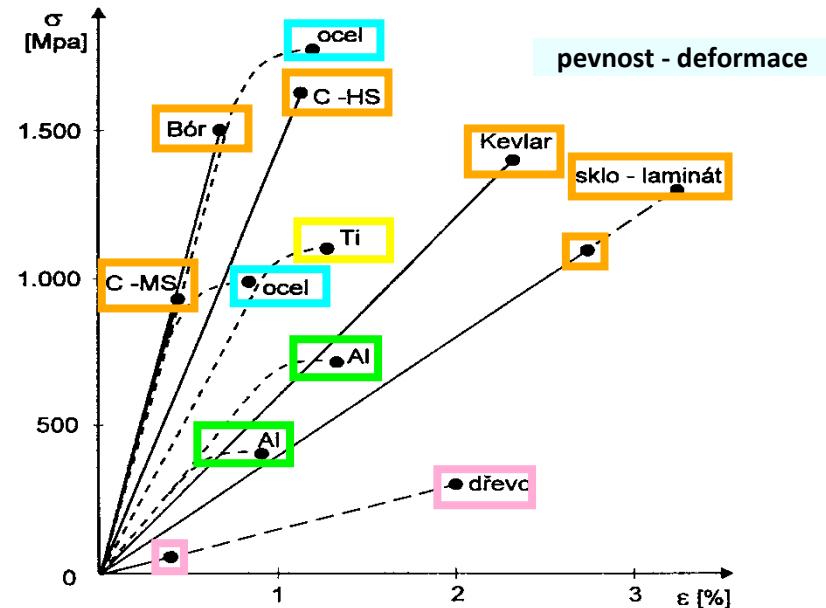
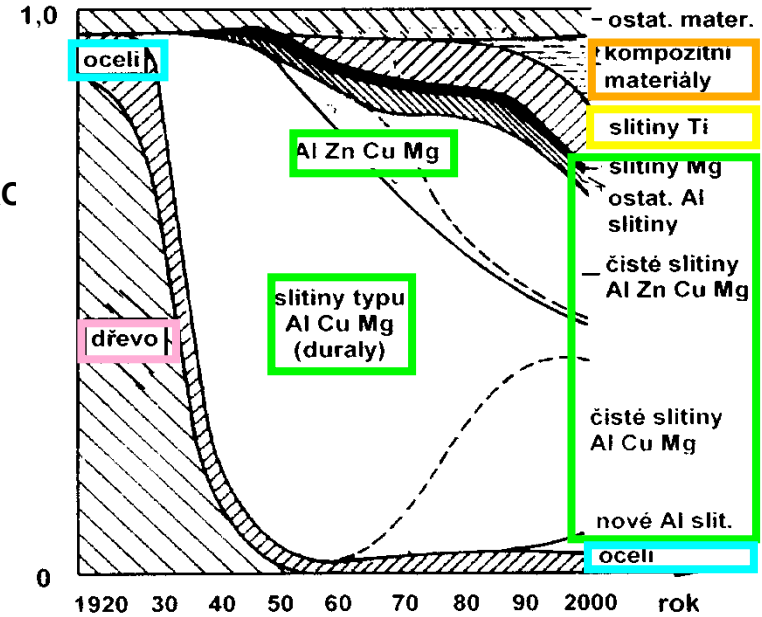
Současnost: - (50-70)% slitin AL
- (25-50)% kompozity

Sendvičové materiály

Kovové

Nekovové

podíl materiálů v konstrukci letadel



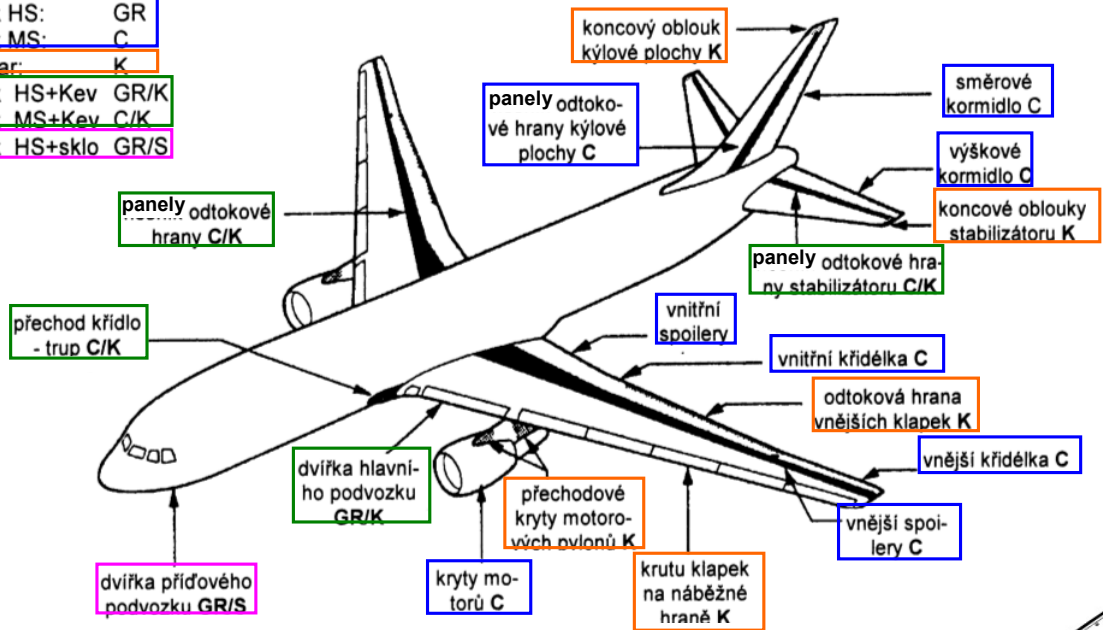
Kompozitní materiály

Kompozity = **pojivo** (matrice – spojovací složka) + **výztuž** (vlákna různých druhů a uspořádání – pevnostní složka)

Pojivo: nekovové - **polymerní matrice** (pryskyřice: **epoxidové**, polyesterové), **uhlík**, **keramické hmoty**
 kovové - matrice **dural**, **Mg**, **Ti**, **slitina Ni-Co**,...

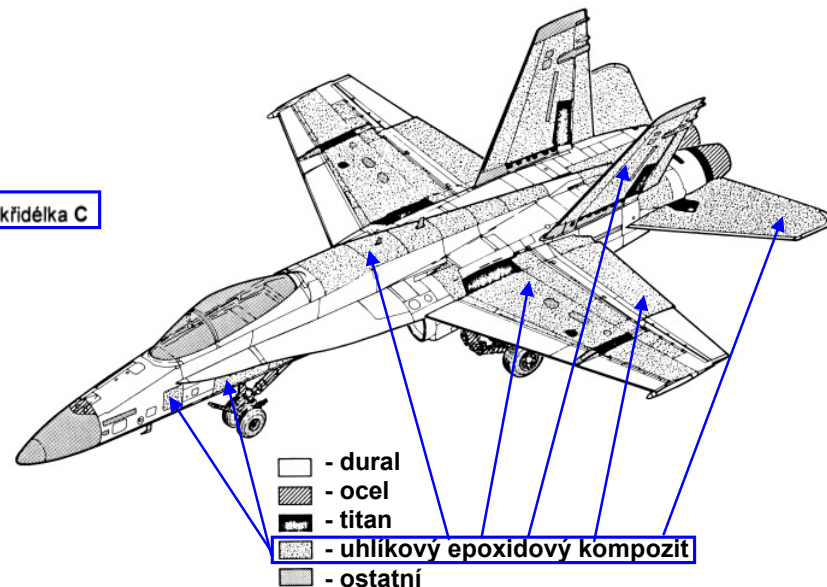
Výztuž: vysokomodulová vlákna (formy: pramence, tkaniny, sekaná vlákna,)
 - **sklo**, **uhlík** (HS - vysokopevnostní grafitizované HM, MS - vysokotuhostní grafitizované), **kevlar**, **bór**,
 - **kombinovaná** (uhlík + kevlar, uhlík + sklo)

uhlík HS:	GR
uhlík MS:	C
Kevlar:	K
uhlík HS+Kev	GR/K
uhlík MS+Kev	C/K
uhlík HS+sklo	GR/S



Kompozitní materiály v konstrukci dopravního letounu B-767
 3% hmotnosti draku

Materiály v konstrukci letounu F-18
 kompozity – 10,3% hmotnosti



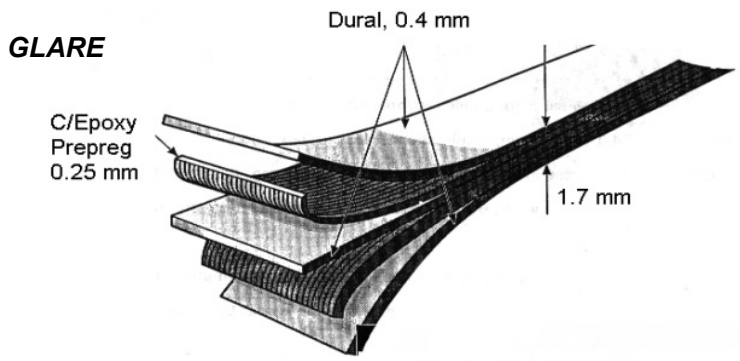
Vrstvené a sendvičové materiály

Vrstvené materiály = lepené kompozitní a kovové vrstvy

Výhody: vyšší pevnost, odolnost proti ohni, rázovému poškození, zvýšená odolnost proti šíření únavové trhliny,

Př. **GLARE** – uhlíkový kompozit + slitiny AL v počtu 2/1 až 6/5 (vnější vždy kov) s tloušťkami od 0,2 až do 0,6 mm

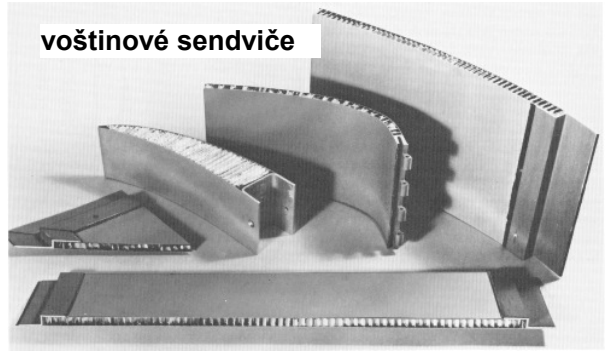
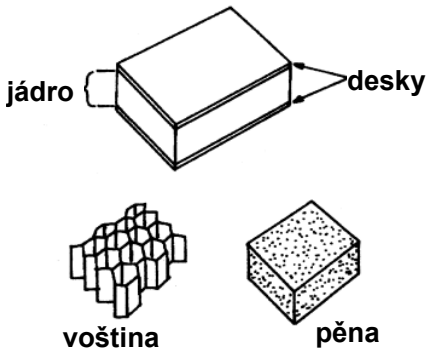
úspora hmotnosti 20 – 30%, použito: Airbus A-380 - potah horní části trupu



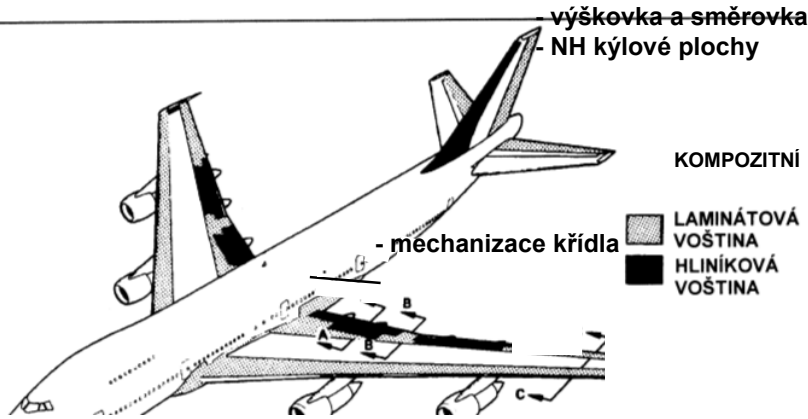
Sendvičové materiály = spodní deska + výplň + horní deska ..."panelová materiálová konstrukce"

Desky: **nekovové** ... kompozit, **kovové** ...dural, ocel. titan

Výplň: kompozitní nebo hliníkové voštiny, polyuretanové pěny,...



Sendvičové konstrukce na B-747



OCEL

<u>měrná hmotnost ρ</u> : 7800 [kg/m ³]
<u>modul pružn. v tahu E</u> : 2,1·10 ⁵ [MPa]
<u>modul pružn. ve smyku G</u> [MPa]:
oceli třídy 11 <u>pevnost v tahu R_m</u> : 270 - 450 [MPa]
oceli třídy 12 L-VARD (12024.1, .4) 12090.1 <u>pevnost v tahu R_m</u> : 600 - 900 [MPa] (2000) [MPa]
oceli třídy 14 L-AUTOR (14140.3, .7) 14220.2 L-ROL (14331.1, .3, .7) <u>pevnost v tahu R_m</u> : 1300 - 1600 [MPa]
oceli třídy 15 a 16 L-CM3 (15130.1, 3, .7) 15230 15231 L-ROLN (16532.1, .3, .8) <u>pevnost v tahu R_m</u> : 1200 - 1800 [MPa]
oceli třídy 17 chromové žárupevné nerez oceli a chromniklové nerez oceli

HLINÍK

<u>měrná hmotnost ρ</u> : 2800 [kg/m ³]
<u>modul pružn. v tahu E</u> : 7,2·10 ⁴ [MPa]
<u>modul pružn. ve smyku G</u> [MPa]:
slitiny typu Al-Cu-Mg <u>pevnost v tahu R_m</u> : 424201.6- dural 380 - 400 (analog: D1-AT 424203.6, 424253.6 superdural 450 - 490 [MPa] (analog: D16-T, D16A-T 560 [MPa]
omcan, pantal 424432.0,1,2 - omcan 130 - 170 [MPa] (analog: AMc A-M, AMc-P, 424400.1,6,7 - pantal 150 - 300 [MPa]
slitiny typu Al-Zn-Cu-Mg <u>pevnost v tahu R_m</u> : 424222.7 550 [MPa] 424202 (analog: V95-T1 490 - 580 [MPa] amer. 7175 V96-T1 700 - 720 [MPa]
slitiny typu Al-Si-Mg <u>pevnost v tahu R_m</u> : 424331.7- silumín 270 [MPa] 424334 320 [MPa] (analog: A12, A14, A19
slitiny typu Al-Li-X <u>pevnost v tahu R_m</u> : ALCAN (Lital) ALCOA (Alithalite) KAISER ALUMINIUM (Kalite)

HOŘČÍK

<u>měrná hmotnost ρ</u> : 1800 [kg/m ³]
<u>modul pružn. v tahu E</u> : 7,2·10 ⁴ [MPa]
<u>modul pružn. ve smyku G</u> [MPa]:
slitiny Mg <u>pevnost v tahu R_m</u> : 424911.7- elektrón 250 [MPa] (analog: ML5-T4 MA8 potahové plechy 280 [MPa] MA5 340 [MPa]

TITAN

<u>měrná hmotnost ρ</u> : 4500 [kg/m ³]
<u>modul pružn. v tahu E</u> : 1,2·10 ⁵ [MPa]
<u>modul pružn. ve smyku G</u> [MPa]:
<u>pevnost v tahu R_m</u> : VT 3-1 1000 [MPa] (Poldi T110) VT 8 1200 [MPa]

σ
[MPa]

DŘEVO

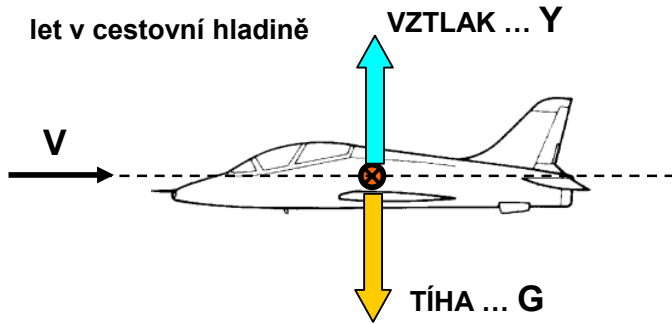
<u>měrná hmotnost ρ [kg/m³]:</u>	
borovice	300 - 900 [kg/m ³]
smrk	330 - 680
jasan	440 - 850
překližka: buk	610 - 1100
bříza	700 - 1000
vrstvený buk	1280 - 1400
<u>pevnost v tahu R_m [MPa]:</u>	
borovice	35 - 200 [MPa]
smrk	20 - 250
jasan	75 - 300
překližka: buk	50 - 180
bříza	60 - 135
vrstvený buk	235 - 320
<u>modul pružnosti v tahu E [MPa]:</u>	
borovice	(7 - 18) · 10 ³ [MPa]
smrk	(9 - 22) · 10 ³
jasan	(9 - 18) · 10 ³
překližka: buk	(8 - 18) · 10 ³
bříza	(9 - 14) · 10 ³
vrstvený buk	(26 - 32) · 10 ³
<u>modul pružnosti ve smyku G [MPa]:</u>	
borovice	(0,8 - 0,9) · 10 ³ [MPa]
smrk	
jasan	(1,1 - 1,4) · 10 ³
překližka: buk	(2,0 - 6,2) · 10 ³
bříza	(1,9 - 4,7) · 10 ³
Uvedené hodnoty odpovídají zatižení ve směru nejvhodněji orientovaných vláken.	

KOMPOZITY

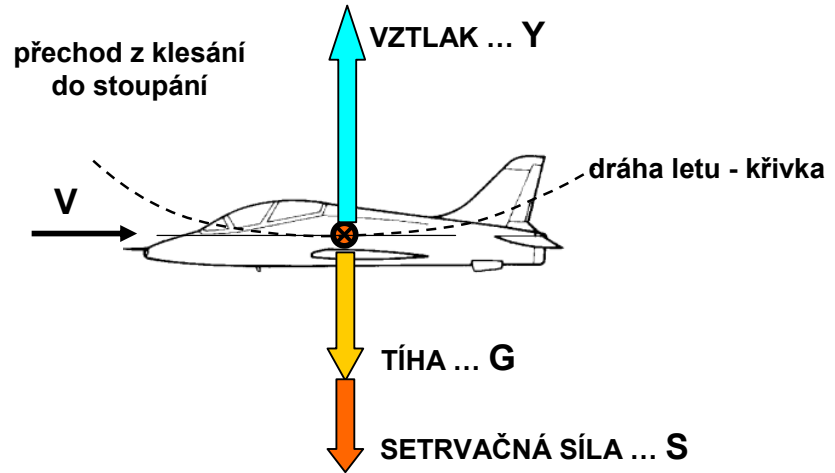
<u>měrná hmotnost jader ρ [kg/m³]:</u>	
voština	30 - 100 [kg/m ³]
polyuretan	30 - 200
polystyren	40 - 100
integrální pěna	200 - 700
<u>pevnost v tlaku jádra [MPa]:</u>	
voština	0,5 - 3 [MPa]
polyuretan	0,2 - 3
polystyren	0,3 - 9
integrál. pěna	15 ($\rho = 500 \text{ kg/m}^3$)
<u>modul pružnosti v tlaku E [MPa]:</u>	
voština	75 - 130 [MPa]
polyuretan	2 - 80
polystyren	12 ($\rho = 60 \text{ kg/m}^3$)
integrál. pěna	117 ($\rho = 500 \text{ kg/m}^3$)
<u>modul pružnosti ve smyku G [MPa]:</u>	
voština	90 - 350 [MPa]
polyuretan	0,15 - 20
polystyren	0,7 ($\rho = 40 \text{ kg/m}^3$)
integrál. pěna	117 ($\rho = 500 \text{ kg/m}^3$)
<u>tepelná odolnost [°C]:</u>	
voština	-60 - +80 [°C]
polyuretan	- +110
polystyren	- +80

<u>měrná hmotnost ρ [kg/m³]:</u>	
výztuž:	sklo 2500 [kg/m ³]
	uhlík HS 1900
	uhlík HM 1800
	bor 2700
	Kevlar 1450
matrice:	
	epoxid. pryskyřice
skelný laminát	2100
kompozit:	uhlík 1500
	bor
	kevlar 1400
<u>pevnost v tahu R_m [MPa]:</u>	
výztuž:	sklo 3500 [MPa]
	uhlík HS 2800
	uhlík HM 2100
bor 3800	
Kevlar 2500	
(AL ₂ O ₃ 14000)	
matrice:	
	epoxid. pryskyřice 70 - 130
skelný laminát	1100 - 40
(orientace 0°-90°)	
kompozit (orientace 0°-90°):	
	uhlík 1300 - 40
	bor 1500
	kevlar 1400 - 30
<u>modul pružn. v tahu /tlaku E [MPa]:</u>	
výztuž:	sklo (77/) · 10 ³ [MPa]
	uhlík HS (280/) · 10 ³
	uhlík HM (400/) · 10 ³
	bor (380/) · 10 ³
	Kevlar (130/) · 10 ³
matrice:	
	epoxid. pryskyřice (3-5/4-5,2) · 10 ³
skelný laminát	(40/) · 10 ³
kompozit:	uhlík (134/) · 10 ³
	bor (200/) · 10 ³
	Kevlar (85/) · 10 ³
<u>modul pružnosti ve smyku G [MPa]:</u>	
skelný laminát	3,5 · 10 ³ [MPa]
(orientace 0°)	
kompozit (orientace 0°-90°):	
	uhlík 4,2 · 10 ³
	bor
	Kevlar 2,1 · 10 ³

Násobek zatížení



Horizontální let - $VZTLAK = TÍHA$ $Y = G$



Křivočarý let - $VZTLAK > TÍHA$ $Y = G + S$

NÁSOBEK ... $n = \frac{VZTLAK}{TÍHA} = \frac{Y}{G}$

Horizontální let - $n = 1$

Křivočarý let - $n > 1$

Omezení max. násobku:

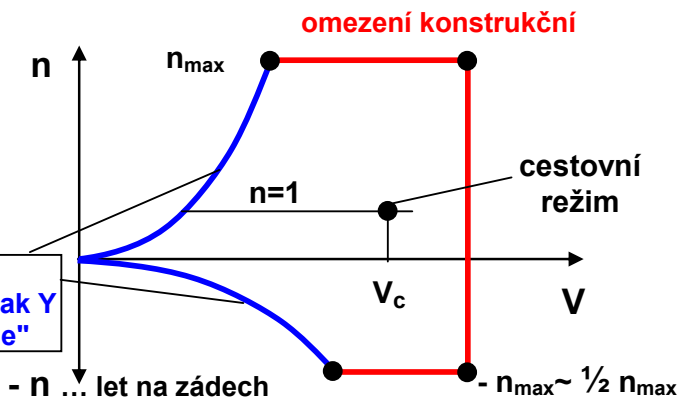
- 1) fyzické možnosti člověka (max $n = 12$ krátkodobě, trénovaný pilot)
- 2) větší násobek = větší síly do konstrukce ... hmotnost konstrukce

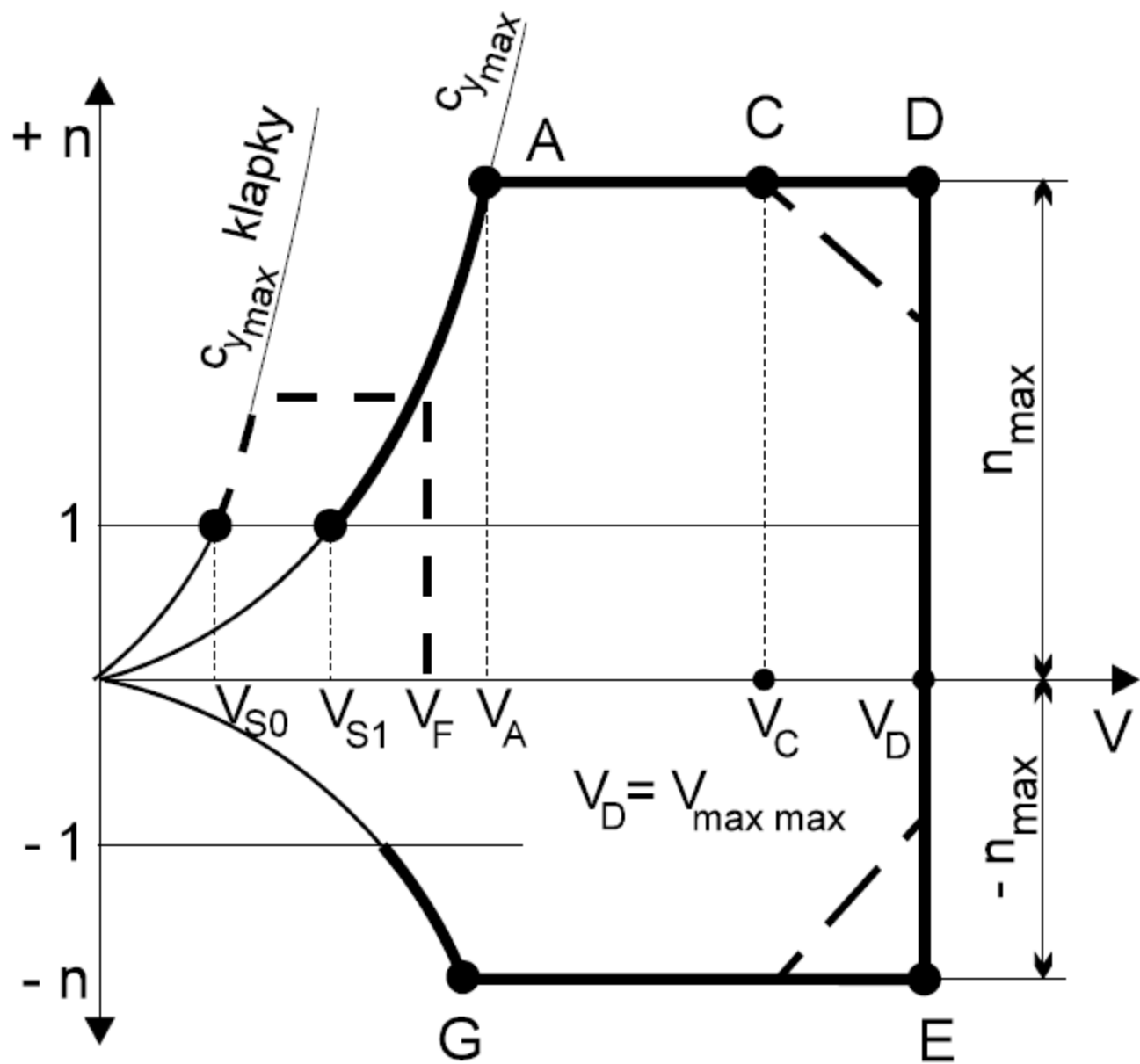
dopravní letouny ...	$n_{max} = 4$
poloakrobatické letouny ...	$n_{max} = 6$
akrobatické letouny ...	$n_{max} = 9 - 12$

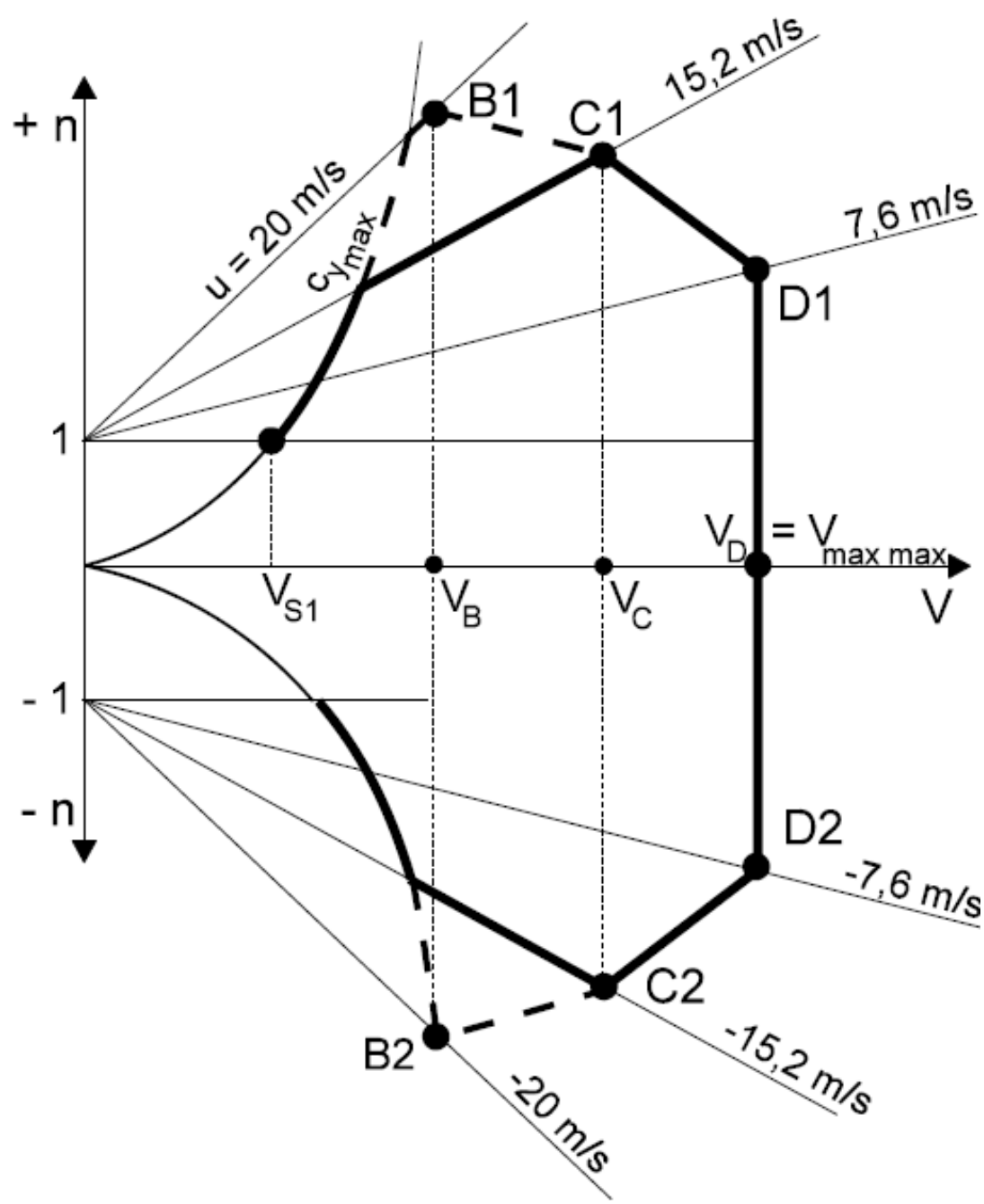
Obálka násobků:

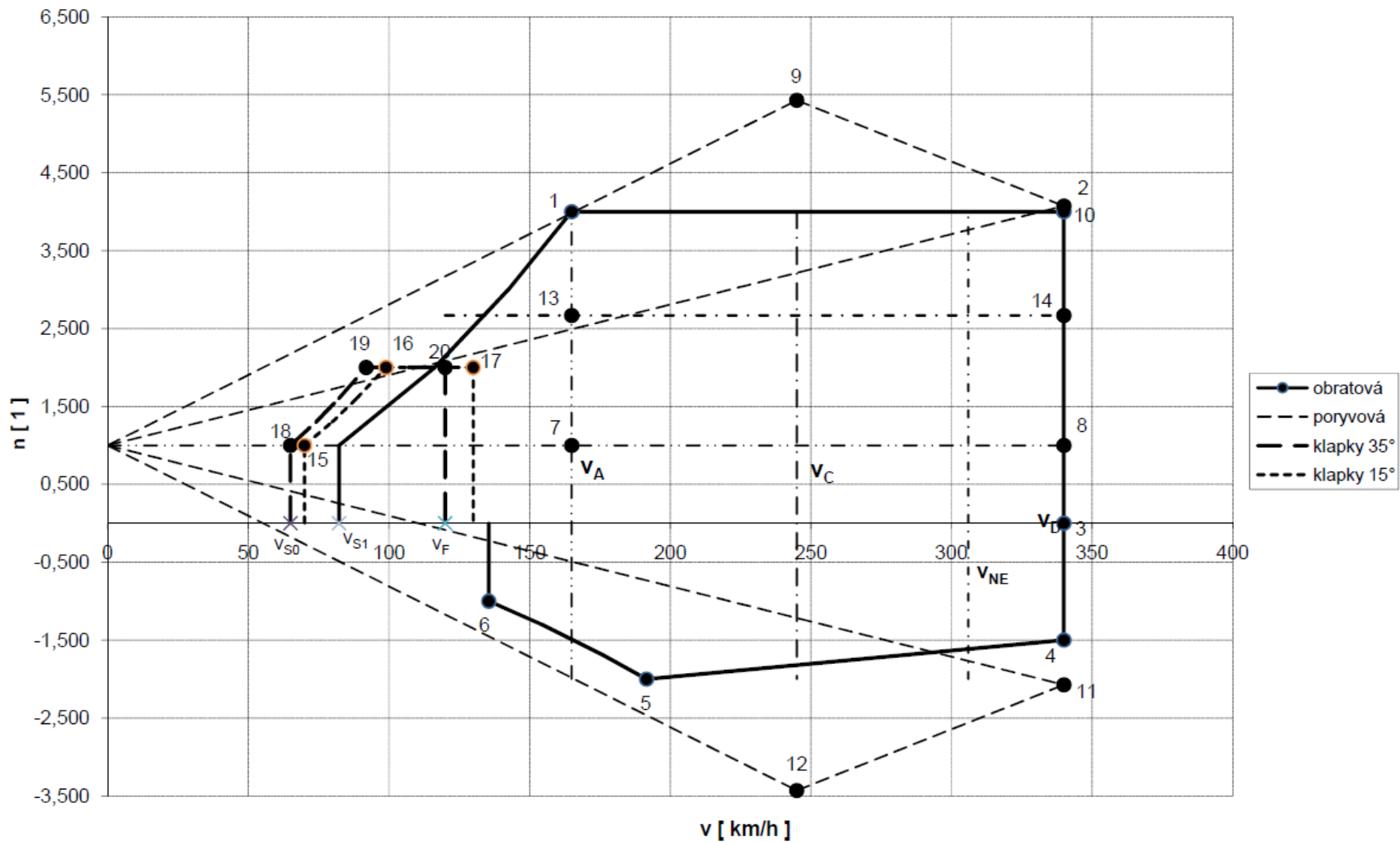
... "co konstruktér musí" - návrh a dimenzování
 "co pilot nesmí" - létat mimo obálku

omezení fyzikální:
 maximálně dosažitelný vztlak Y
 "odtržení proudu na křídle"



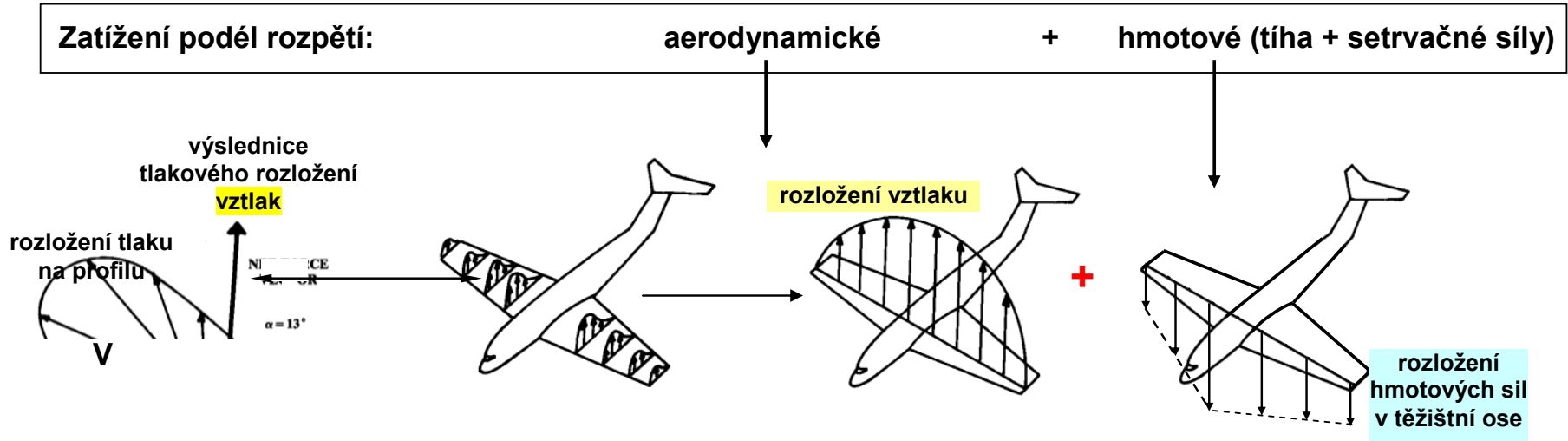




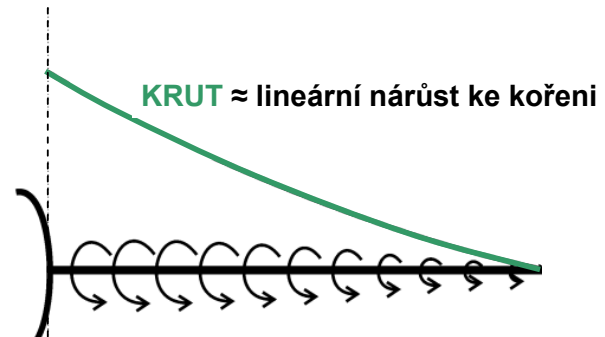
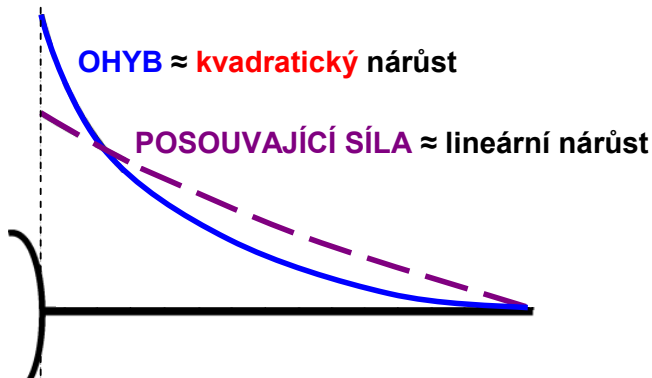


Zatížení křídla

Obálka násobků → násobek (bod obálky) → letový režim:

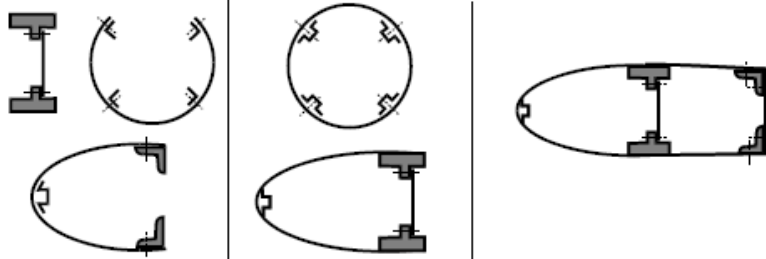


Namáhá křídla: **OHYB** + **POSOUVAJÍCÍ (STŘIŽNOU) SILU** + **KRUTEM**

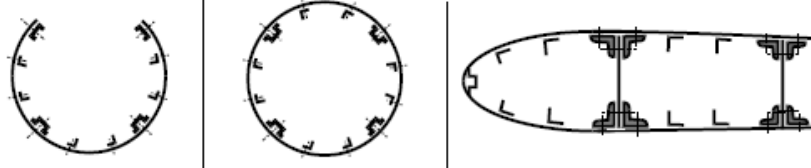


NORMÁLNÍ NAPĚTÍ - VÝZTUHY + SPOLUNOSNÁ ŠÍŘKA POTAHU
 SMYKOVÁ NAPĚTÍ - TENKÉ STĚNY

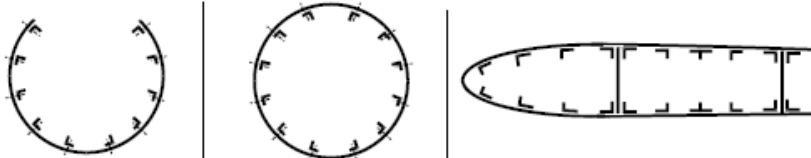
NOSNÍKOVÁ KONSTRUKCE



NOSNÍKOVÁ POLOSKOŘEPINA

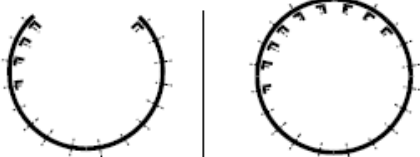


POLOSKOŘEPINA

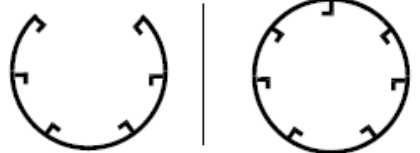


SKOŘEPINOVÉ KONSTRUKCE

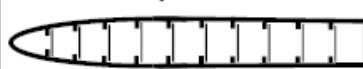
HUSTĚ PODÉLNĚ VYZTUŽENÝ POTAH



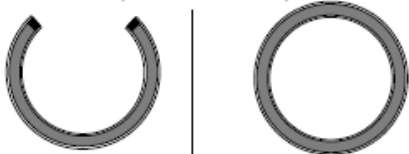
INTEGRÁLNÍ POTAH



mnohastojinová konstrukce



TŘÍVRSTVÁ (SENDVIČOVÁ) KONSTRUKCE

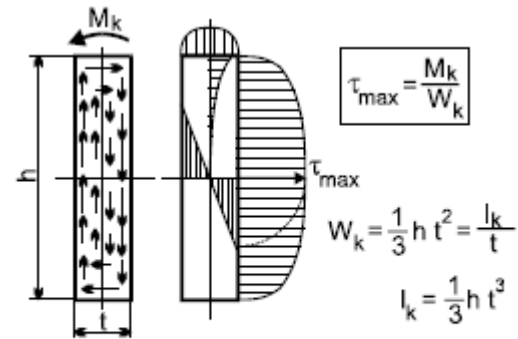
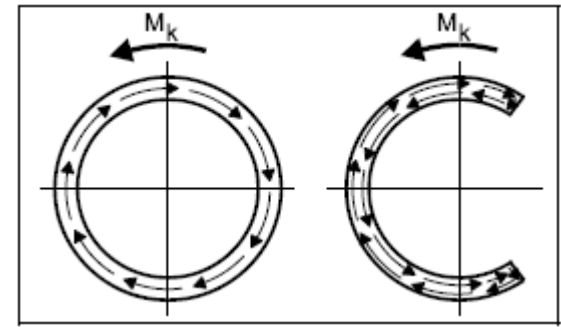


KAŽDÝ PRVEK PRŮŘEZU PŘENÁŠÍ
 NORMÁLNÍ I SMYKOVÁ NAPĚTÍ

OTEVŘENÝ

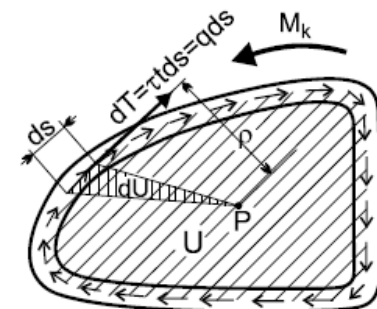
UZAVŘENÝ

VÍCEDUTINOVÝ



W_k ... průřezový modul v krutu

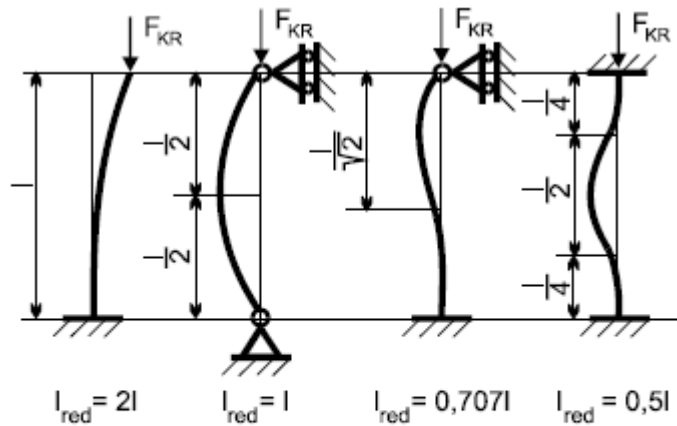
I_k ... modul tuhosti v krutu



$$M_k = \oint q_k \rho ds = q_k \oint \rho ds = q_k 2 U$$

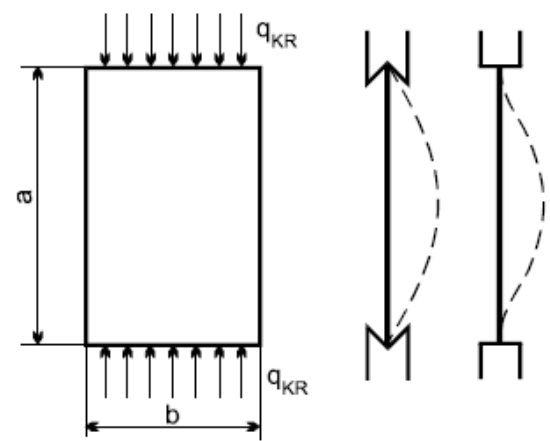
$$\tau = \frac{q_k}{t} = \frac{M_k}{2Ut}$$

$$\tau_{\max} = \frac{q_k}{t_{\min}} = \frac{M_k}{2Ut_{\min}} \Rightarrow W_k = 2Ut_{\min}$$



$$F_{KR} = \pi^2 \frac{EJ}{l_{red}^2} \quad \sigma_{KR} = \pi^2 \frac{E}{\lambda_{red}^2}$$

TLAKOVĚ ZATÍŽENÁ DESKA

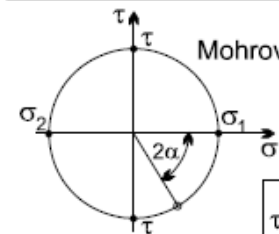
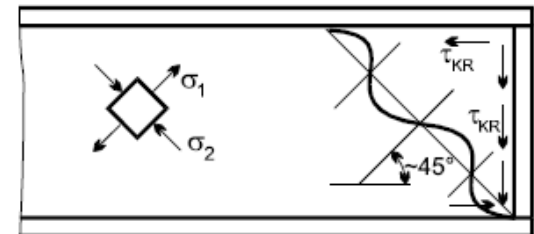


$$\sigma_{KR} = \frac{q_{KR}}{t} = K_T \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$\mu = 0,3: \quad \sigma_{KR} = 0,9 K_T E \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$K_T = (a/b, \text{ charakter uchycení})$

SMYKOVĚ ZATÍŽENÁ DESKA

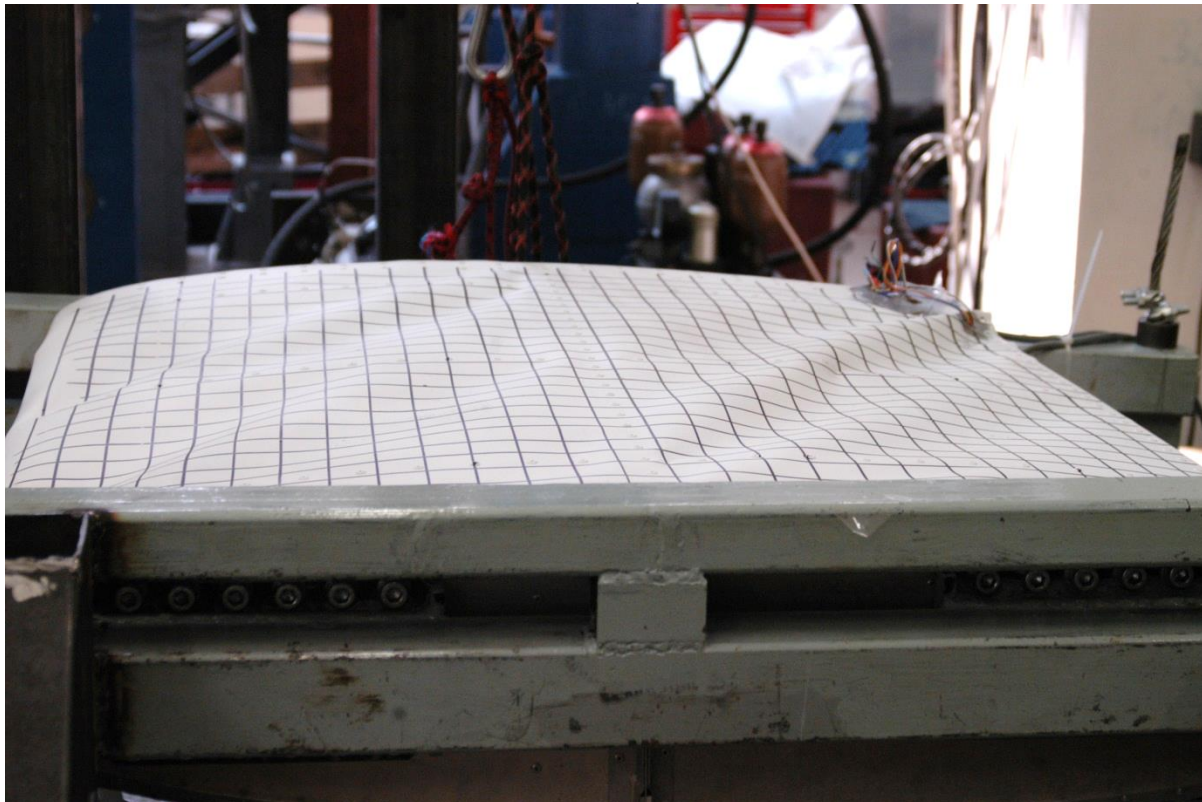


Mohrova kružnice:

$$\sigma_1 = |\sigma_2| = \tau$$

$$\tau_{KR} = 0,9 K_S E \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$K_S = (a/b, \text{ charakter uchycení}), \quad a > b$



Konstrukční schémata křídel

Konstrukce bez nosného potahu

Potah **nelze využít k přenosu krutu** – *tkaninové potahy* ... (historické, malé amatérské sportovní letouny)

OHYB – pásnice nosníku

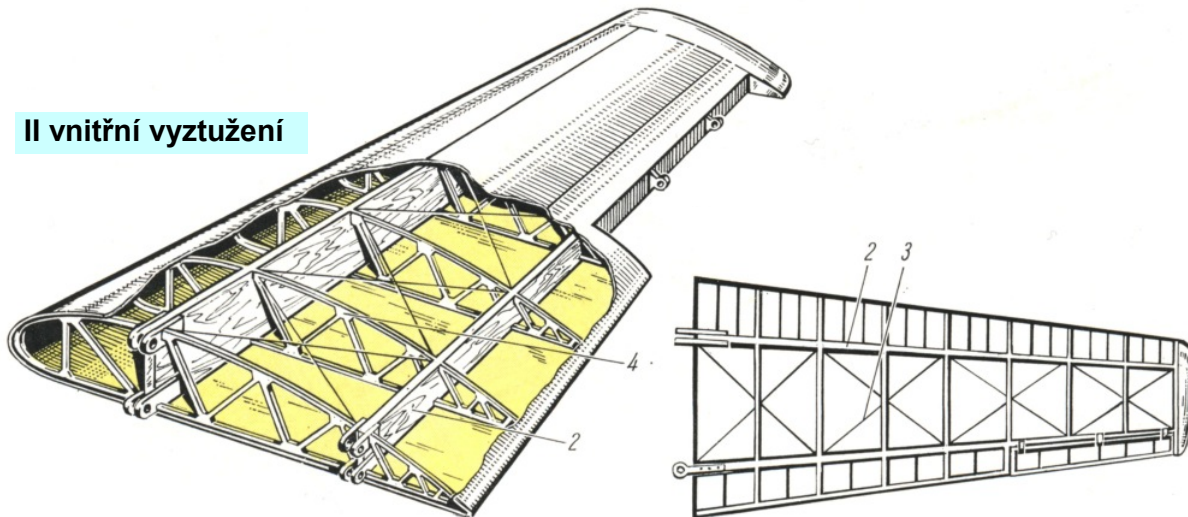
POSOUBAJÍCÍ SÍLA – stojina nosníku

KRUT: → skříňový nosník
→ vnitřní vyztužení

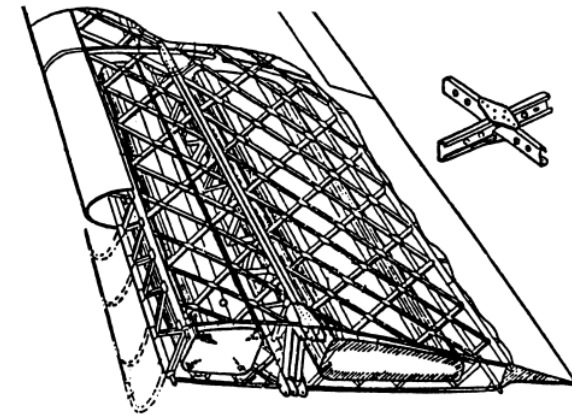
I. skříňový nosník



II vnitřní vyztužení



III geodetická konstrukce



Nosíkové konstrukce s nosným potahem a nosíkové poloskořepiny

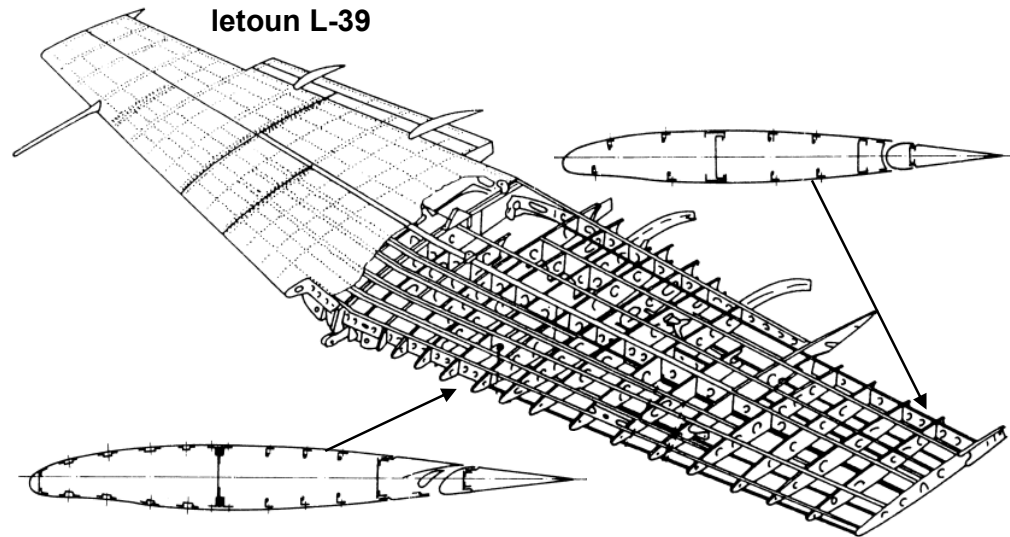
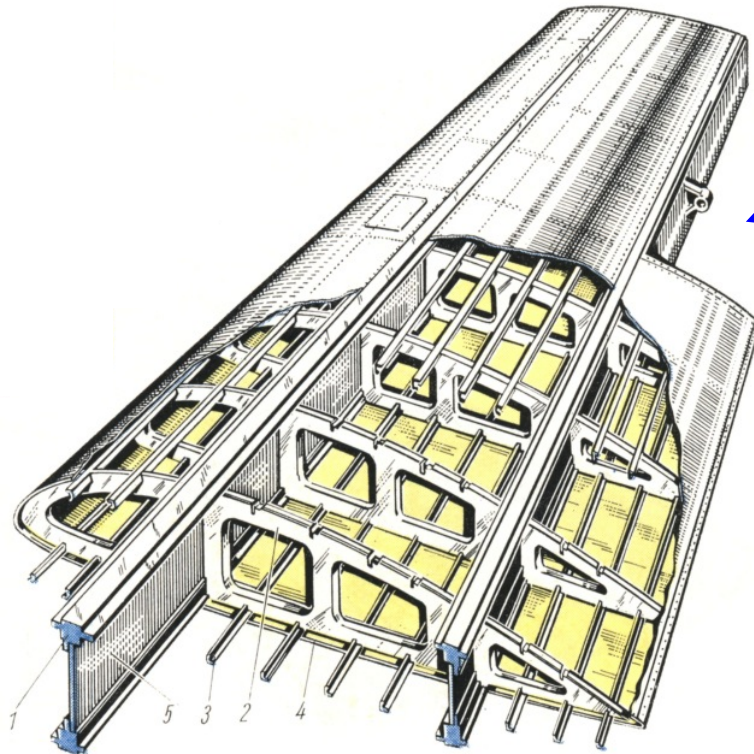
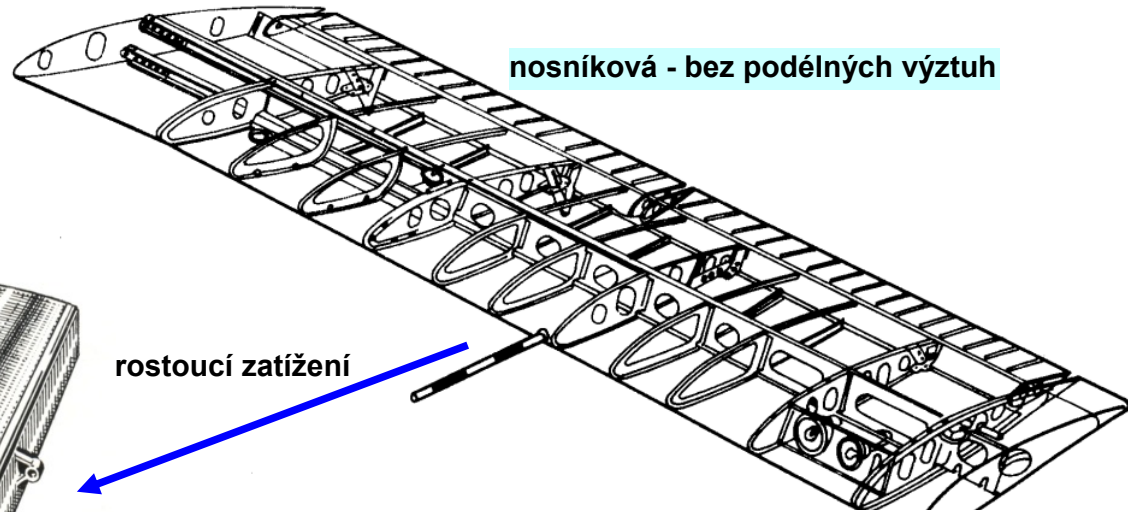
Potah **využit k přenosu krutu** – **torzní skříň** ... (křídla menších a středních letounů)

OHYB – pásnice nosíku + podélné výztuhy

POSOUVAJÍCÍ SÍLA – stojina nosíku

KRUT: - torzní skříň

nosíková poloskořepina – podélné výztuhy



Poloskořepiny a skořepiny

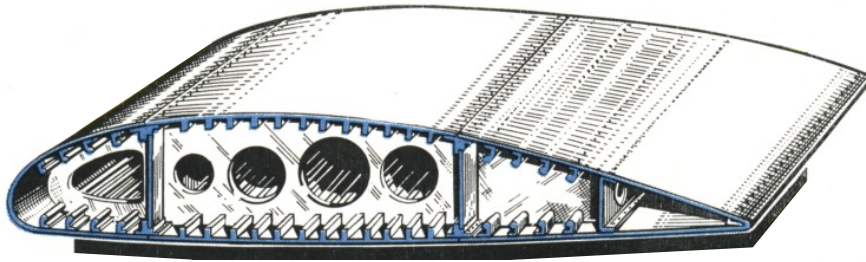
Potah **přenáší krutu i ohybu** – **nosná skříň**: (potah + husté výztuhy = poloskořepina) → panely ("potah nese vše") = skořepina

OHYB – nosná skříň

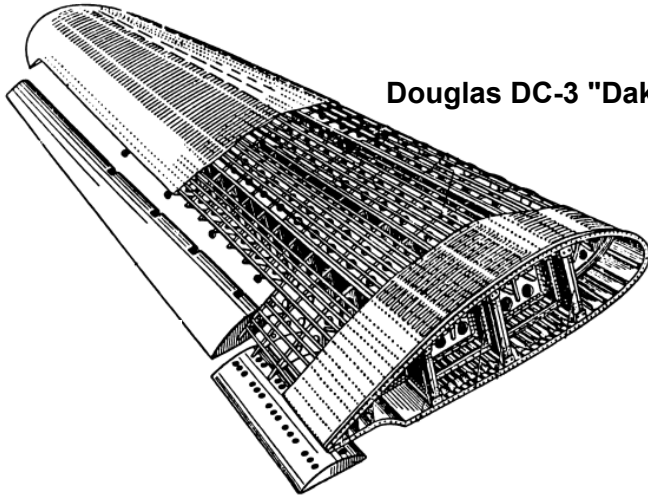
POSOUVAJÍCÍ SÍLA – stojiny

KRUT: - nosná skříň

poloskořepina



Douglas DC-3 "Dakota"



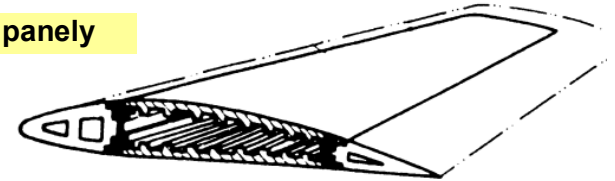
skořepiny

sendvičové a kompozitní panely

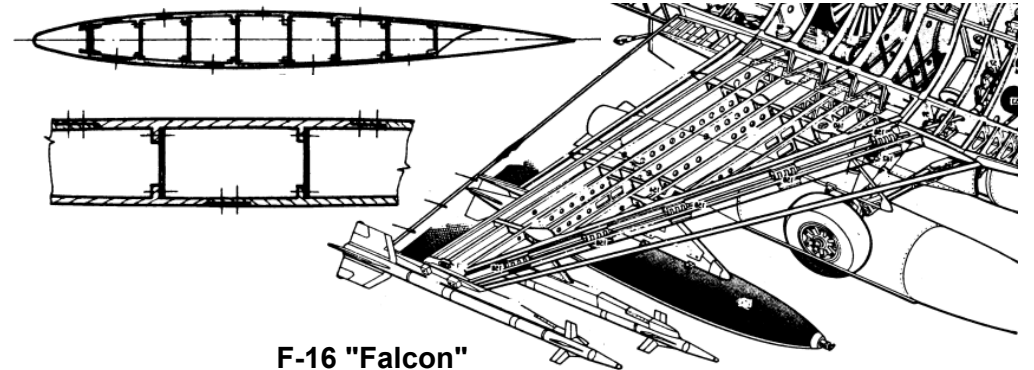


integrální panely

zatížení



mnohostojinové integrální panelové konstrukce



F-16 "Falcon"

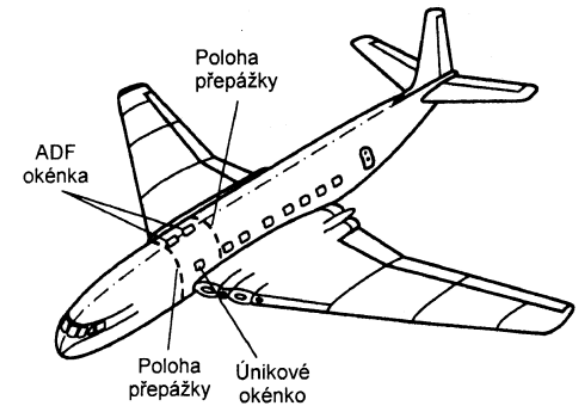
Únavová pevnost

Poruchy konstrukce při dlouhodobějším opakovaném zatížení než je pevnost (statická) materiálu

důvod - postupné rozšiřování mikroporuch v materiálu do kritického zeslabení průřezu

podmínka – namáhání které, "pomáhá šířit trhlinu" tj. tah, ohyb, kombinace....

historicky – únavové lomy na cyklicky zatěžovaných nápravách železničních vagónů (Wöhler)



letectví - řada katastrof letounu Comet 1953-1954 - únavová porucha okenního rámu, únavové zkoušky trupu ve vodním bazénu

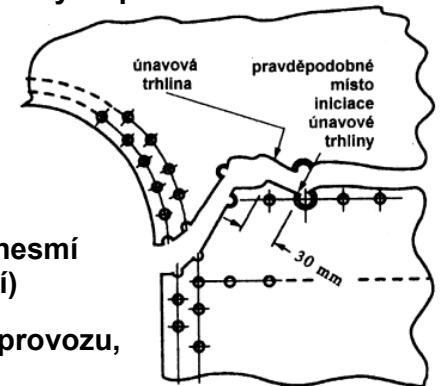
důsledek: *Letecké pevnostní předpisy vyžadují únavový průkaz*

životnost = stanovená doba do poruchy / součinitelem spolehlivosti

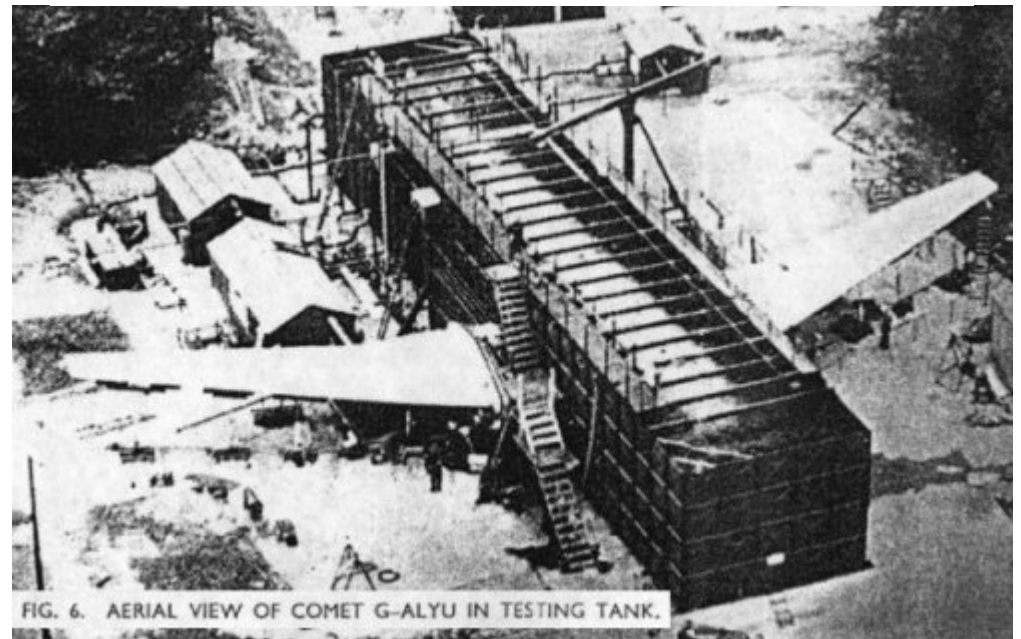
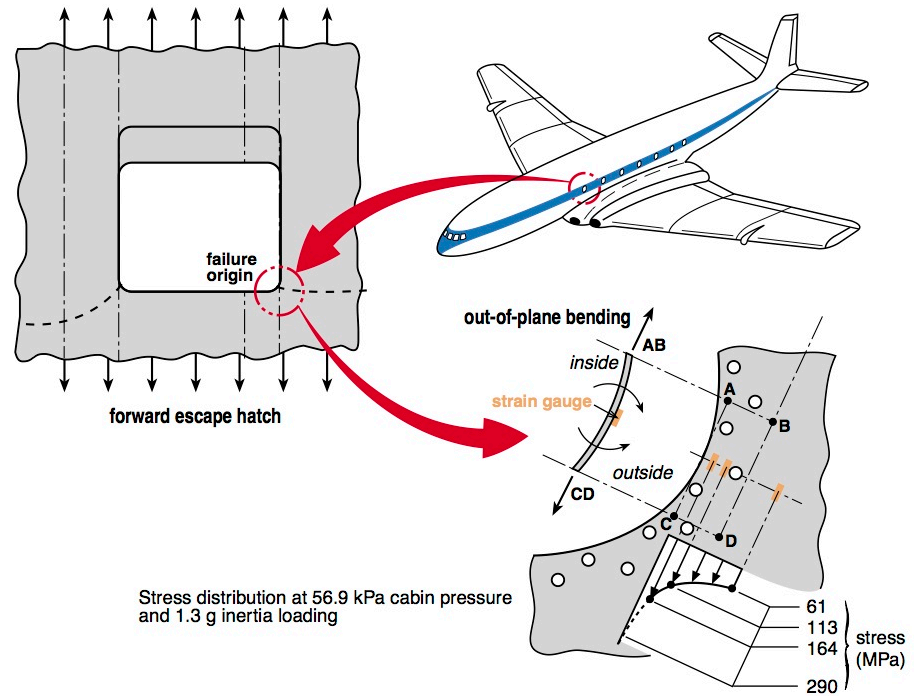
konstrukční filosofie: **konstrukce bezpečná po poruše** "Fail Safe" x **konstrukce s bezpečným životem** "Safe Life"

bezpečná po poruše – **připouští** se za provozu únavová trhlinka, během periodických prohlídek nesmí překročit kritickou délku (provozní systém monitorování, zálohování)

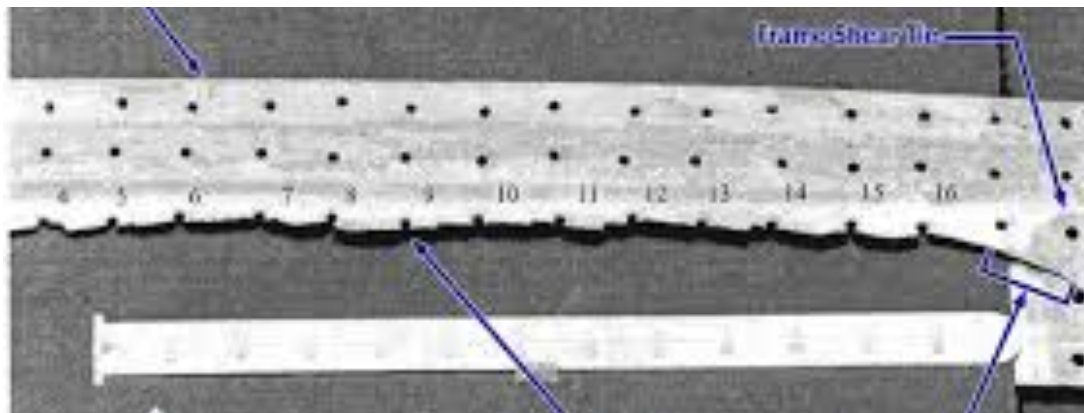
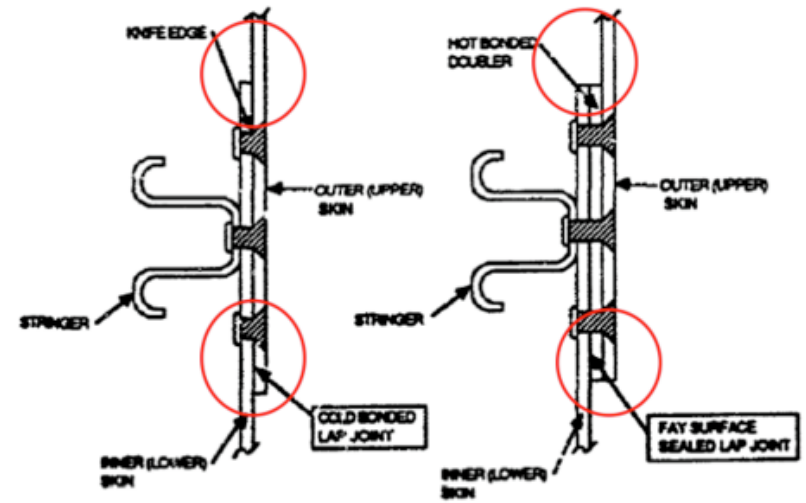
bezpečný život – **nepřipouští** se za provozu únavová trhlinka, po vyčerpání životnosti odstavit z provozu, i když není porušena !!!



De Havilland Comet - 1952

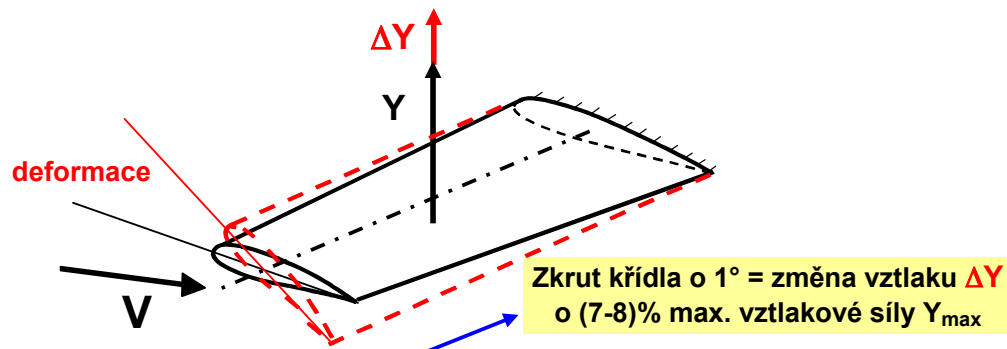


Aloha Airlines Flight 243 - 1988



Aeroelasticita

vliv netuhosti konstrukce: zatížení → deformace → zatížení od deformace ...**zpětná vazba deformace !!!**



Specifika leteckých konstrukcí:

1. "malá" tuhost (minimální hmotnost !)
2. citlivost aerodynamických sil na deformaci

Důsledky:

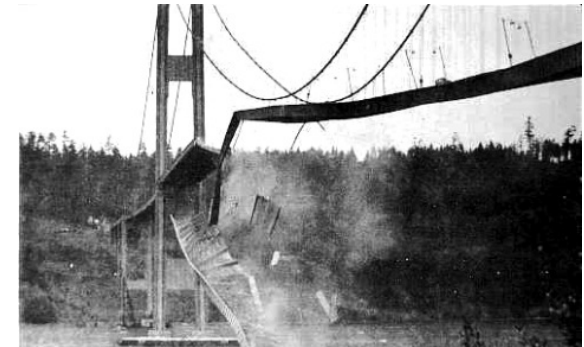
1. ukroucení křídel od trvalého nárůstu přidavného zatížení – tzv. **torzní divergence křídla** (přírůstek vnitřních elastických sil konstrukce od deformace - nižší než přírůstek vnějšího zatížení ... nerovnováha)
2. konečná deformace křídla omezující funkci kormidel – **snížení účinnosti křidélek – reverze křidélek (řízení)** (přírůstek vnitřních elastických sil je větší než přírůstek vnějšího zatížení - rovnováha)
3. ukmitání křídla – tzv. **flutter křídla** (řada katastrof, rychlé, **nebezpečné !!!**) (dynamická nerovnováha elastických, aerodynamických a setrvačných sil)

Historicky – první pokusy s motorovým letounem prof. S. P. Langley – torzní divergence křídla

- bři Wrightové první (9 dnů !!!)
- klasické dvojplášňíky (vnější vyztužení)



Analogie "flutteru" u stavebních konstrukcí:
Tacoma Narow Bridge - 1940



Řízená tuhost

Aeroelastické projevy:

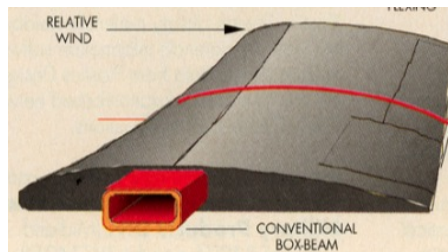
1. **kontrola – letecké předpisy** - poruchy při rychlostech větších než maximální návrhová (obálka násobků),
- přípustné omezení funkčnosti konstrukce deformací

kontrolní "pasivní přihlížení" k tuhosti konstrukce plynoucí z pevnostního dimenzování konstrukce

2. využívání netuhosti k omezení aeroelastických projevů a zlepšení letových vlastností – **řízená tuhost**

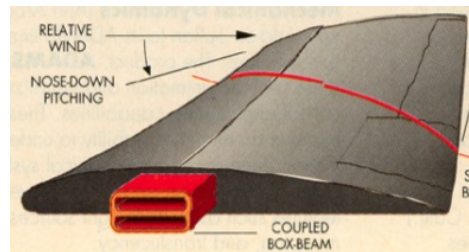
Stupně řízené tuhosti: konstrukční → aktivní řízení "inteligentní" konstrukce ("smart structure")

1. Konstrukčně řízená tuhost – návrh konstrukce s ohledem na požadovanou deformaci



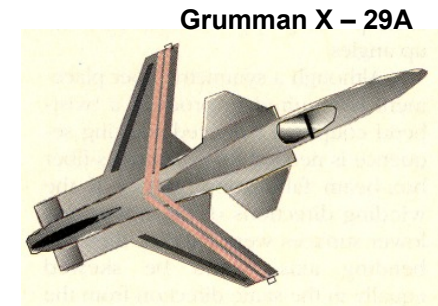
jednoduchý skříňový nosník: čistý ohyb

nevhodná torzní deformace



dvojitý skříňový nosník ohyb + krut

příznivá torzní deformace



Grumman X – 29A