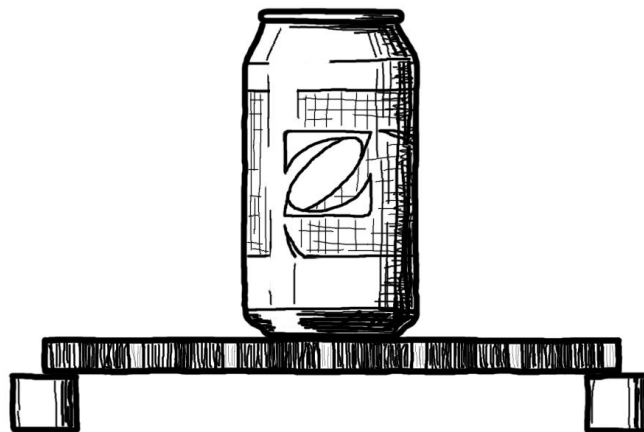




# Zodiac Aerospace Challenge

## Teoretické poznámky k sendvičům



Tento dokument je určen jako teoretický úvod k soutěži Zodiac Aerospace Challenge pro studenty bakalářského studia. Níže uvedený obsah nikterak nenahrazuje oficiální zadání soutěže. Ačkoliv je zde kladen důraz na principy sendvičových konstrukcí, jejich skladbu a výrobu neznamená to, že aplikace sendviče v soutěži je tou „nejlepší“ volbou.

**Vypracoval:**

František Löffelmann

## Obsah

1. Úvod .....	3
2. Základní principy.....	3
2.1 Poruchy sendvičů.....	4
3. Materiály a typy jader .....	5
4. Technologie výroby .....	8
5. Typické konstrukční detaily .....	9
6. Navrhování a výpočty.....	10
7. Použitá literatura.....	13

## 1. Úvod

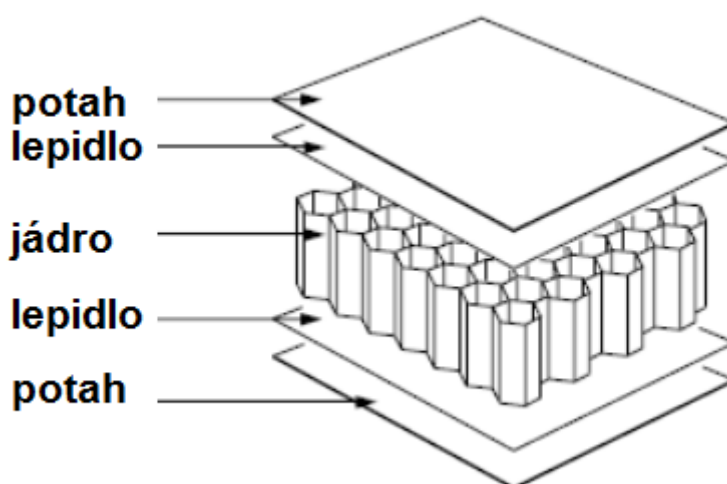
Soutěžní úkol je stanoven tak, aby alespoň částečně reflektoval praktické aplikace v Plzeňské pobočce Zodiac Galleys Europe, která je zaměřena převážně na výrobu kuchyňek do letounů Airbus. V interiérech dopravních letadel se používají sendviče velmi často díky jejich vysoké ohybové tuhosti při zachování nízké hmotnosti.

Předložený dokument shrnuje vybrané informace z oblasti obecných i leteckých sendvičových konstrukcí, protože zadání soutěže je blízko takovému návrhu. Klasické koncepce a postupy, které jsou dále uvedeny, by tedy mohly posloužit soutěžícím k inspiraci pro jejich vlastní návrh. Na začátku je popsán základní princip sendvičů a poruchy, ke kterým u nich může dojít, dále jsou vyjmenovány často používané materiály, ukázky typických druhů jader. Další kapitolu tvoří přehled technologií výroby, jejíž vhodná volba a pečlivé provedení může silně ovlivnit výsledky soutěže. Nakonec jsou zmíněny ještě poznámky k výpočtům (jejichž praktické použití je v našem případě komplikováno vstupními daty) a k filozofii navrhování jako takové.

I když předložený dokument pojednává hlavně o sendvičích, neznamená to, že by taková struktura musela být v soutěži povinně použita nebo že je nutně nejvýhodnější.

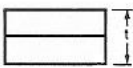
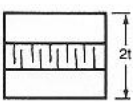
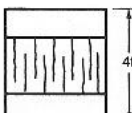
## 2. Základní principy

Pojem „sendvič“ v technickém pojetí celkem odpovídá obecnému povědomí, tedy o vrstvách materiálu nad sebou. V konstrukční praxi leteckého průmyslu se jako sendvič bere typicky třívrstvá konstrukce, kde vnější vrstvy jsou tvořené tenkým tuhým potahem, který je oddělen tlustou vrstvou lehkého materiálu (obr. 1). Základní myšlenka je podobná jako v případě I nosníku, ve kterém je materiál rozložen mnohem efektivněji pro ohybová namáhání než nosník obdélníkového průřezu.



Obr. 1 Struktura sendviče [1]

Sendvičový efekt lze názorně popsat v analogii na běžně používaný I nosník. V případě I nosníku lze zjednodušeně předpokládat, že ohybový moment je přenášen pásnicemi ve formě tahového napětí, resp. tlakového napětí v protější pásnici. Obdobně působí potah sendviče. Díky velké vzdálenosti potahů (dané výškou jádra) je rameno ohybového momentu velké a síly v potazích se radikálně zmenší oproti plnému materiálu. To vede k výraznému nárůstu ohybové tuhosti a pevnosti (napětí v potazích je menší než by měl materiál bez jádra). Jádro má ovšem neméně důležitou roli. Tak jako u I nosníku přenáší posouvající sílu, která v něm vyvolá smykové napětí. Rozdíl mezi stojinou nosníkem a jádrem sendviče je, že jádro souvisle podepírá potah a brání jeho lokálnímu zvlnění po celé ploše. Proto se často používají sendviče ve formě desek (plochých nebo různě zakřivených). Vhodnou volbou jádra pak lze dosáhnout výborné tepelné nebo zvukové izolace či pohlcení velkého množství deformační energie.

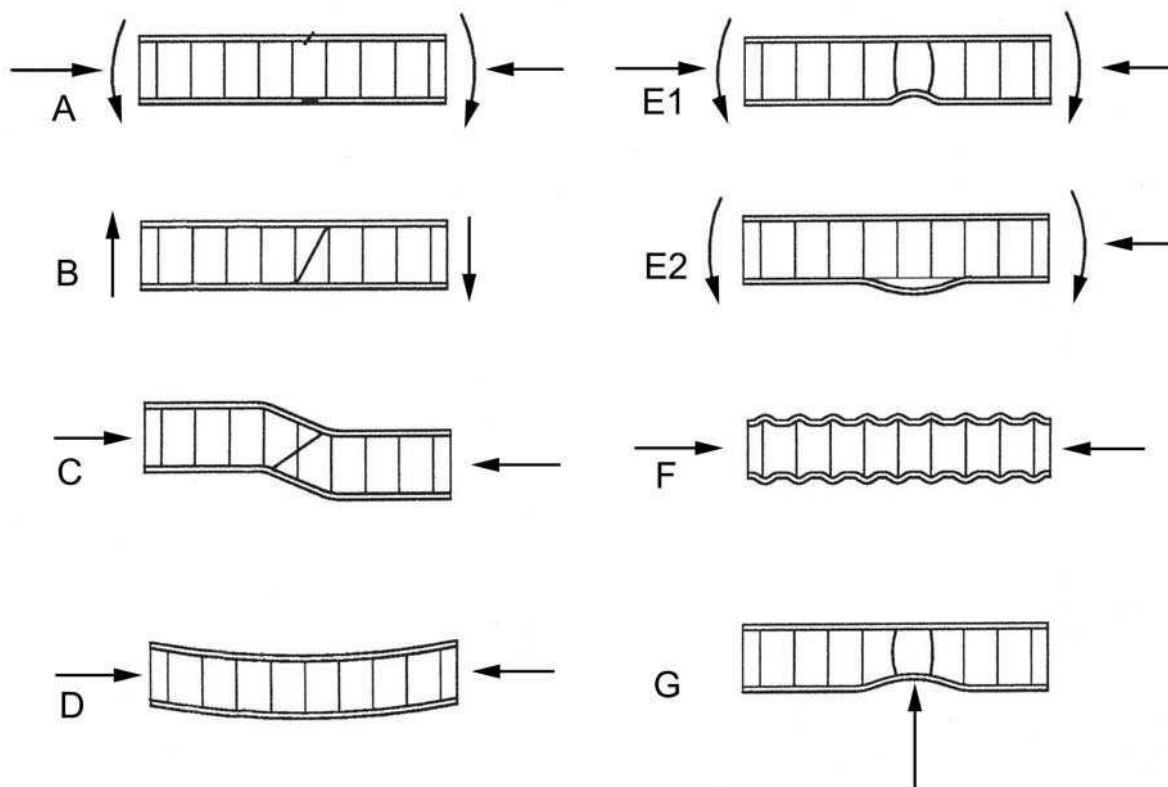
vliv tloušťky jádra na relativní vlastnosti			
tuhost	1	7	37
pevnost v ohybu	1	3,5	9,2
hmotnost	1	1,03	1,06

Obr. 2 Vliv tloušťky jádra [1]

## 2.1 Poruchy sendvičů

Pro sendviče jsou vedle materiálových poruch (v tahu nebo v tlaku) typické ještě další poruchy lokální ztráty stability, které lépe vystihuje obrázek 3. Globální ztráta stability (D) u sendvičů může nastat podobně jako u tlačných prutů, vzhledem k velké ohybové tuhosti sendviče ale častěji hrozí některá z lokálních stabilitních poruch: wrinkling (zvrásnění, E1, E2) kdy se na tlačném potahu objeví lokální vlna, buď směrem od potahu (potah se odlepí od jádra) nebo se vtlačí do potahu při překročení tlakové pevnosti jádra. V případě, že jádro není kontinuální (např. voštinové, vlnité, apod.) tak se může podobně jako u wrinklingu potah zvlnit s vlnovou délkou odpovídající jádrem nepodepřené délce potahu, což se nazývá dimpling nebo intracell buckling (F). Další lokální poruchou je crimping (C), kdy dojde vlivem tlakového zatížení sendviče ke smykové poruše jádra kolmo na osu tlakového zatížení, což je porucha podobná jako při překročení smykové pevnosti jádra zatíženého posouvající silou (B), s tím rozdílem, že při crimpingu se jedná o stabilitní poruchu, která záleží na tuhosti jádra a potahu a ne na smykové pevnosti jádra. Vlivem nevhodné technologie lepení může dojít k odlepení potahu od jádra (lepení je obtížné zejména při spojování potahu a voštiny z tenké kovové fólie). Lehké jádro je navíc náchylné na koncentrované zatížení, které se může projevit promáčknutím potahu a drcením jádra (G).

Při třibodovém ohybu sice nehrozí celková ztráta stability tak jako při tlakovém zatížení, ale ztráta stability jednoho z potahů ve formě wrinklingu (E1, E2) nebo dimplingu (F) nastat může podobně jako smyková porucha jádra při překročení smykové pevnosti jádra (B).

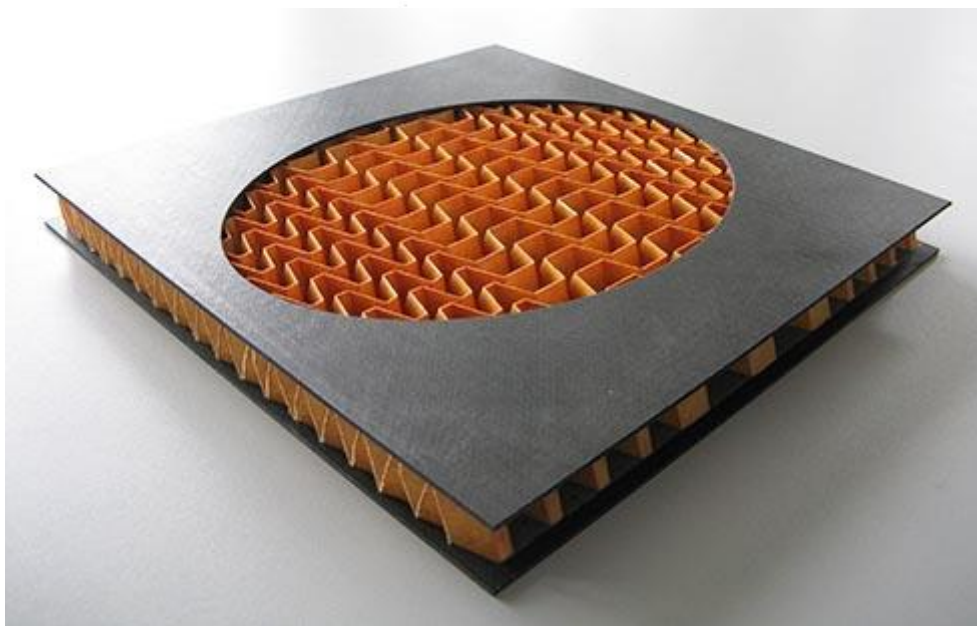


Obr. 3 Poruchy sendvičů: A) Porušení potahu / překročení meze kluzu potahu, B) Smyková porucha jádra, C) Shear crimping, D) Celková (Eulerova) ztráta stability, E1) E2) Wrinkling, F) Dimpling / Intracell buckling, G) Rozdrcení jádra [2]

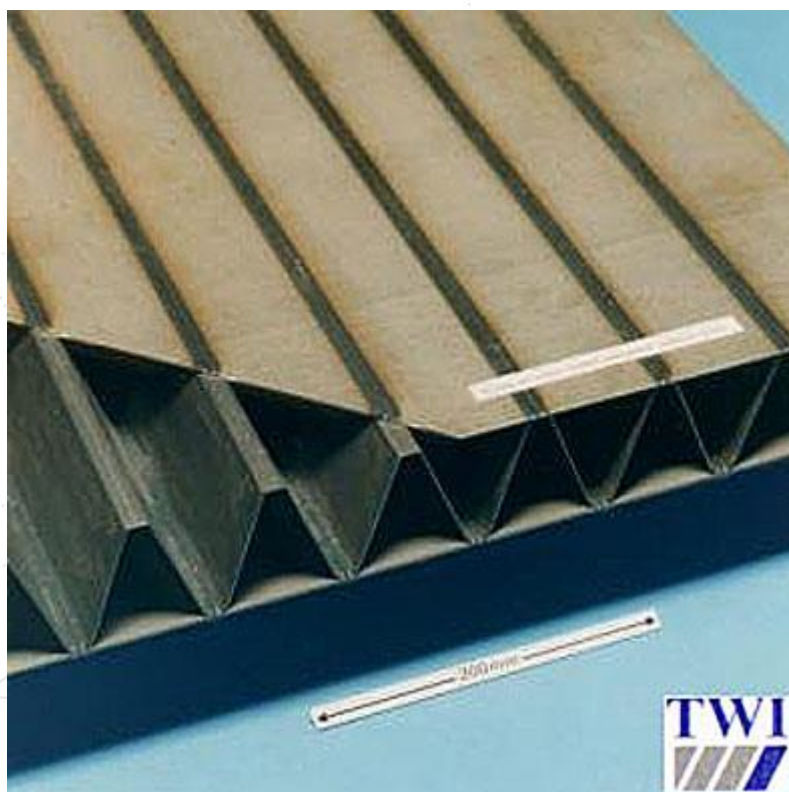
### 3. Materiály a typy jader

Škála používaných materiálů je opravdu široká. Všeobecně lze říci, že ve funkci potahů se jedná o pevnější materiál (hliníkové slitiny, kompozity, ve stavebnictví ocel) a na jádro buď lehčí materiál (polymerní pěny, balza) nebo materiál skládaný do různých tvarů, takže potah může být ze slitiny hliníkového plechu (např. tloušťky 1 mm) a jádro opět z hliníkového plechu nebo tenké fólie (třeba i jen 0,05 mm tlusté). Výborných vlastností též dosahují nomexová jádra, což je skládaný aramidový (kevlarový) papír prosycený pryskyřicí.

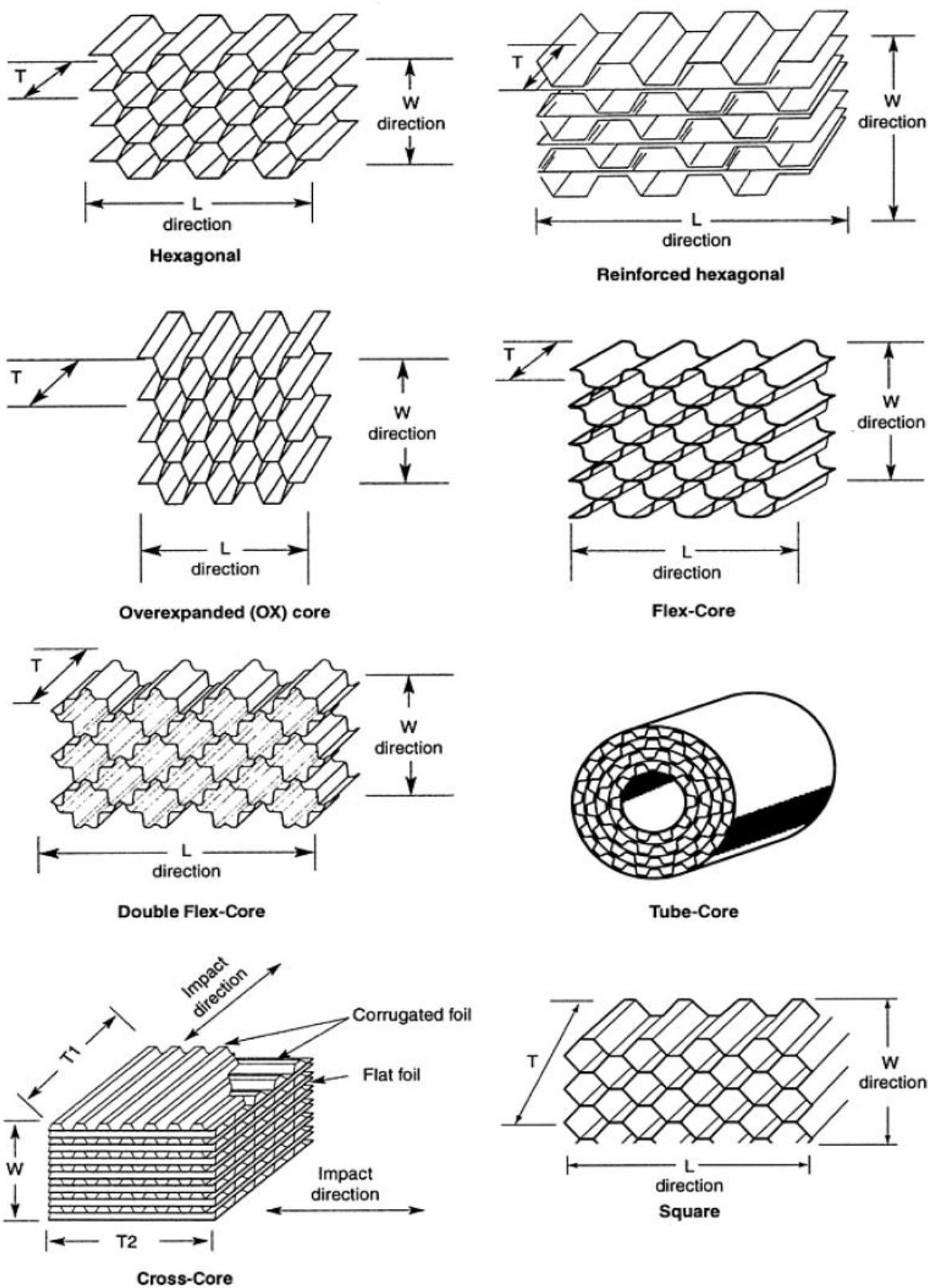




*Obr. 4 Jádro ze skládaného nomexového papíru [3]*



*Obr. 5 Jádro z vlnitého plechu (v tomto případě z oceli) [4]*

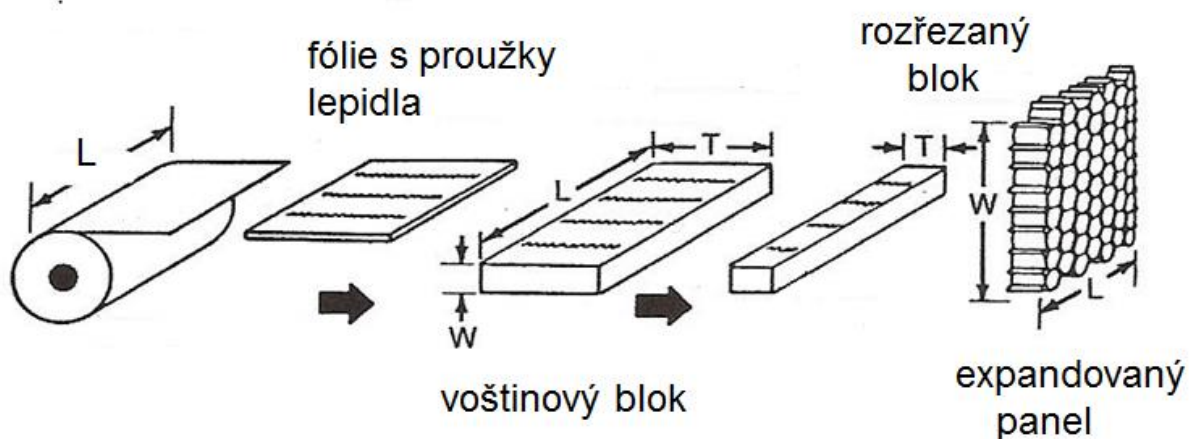


Obr. 6 Různé druhy voštin.  $L$  – délka,  $W$  – šířka,  $T$  – tloušťka [5]

## 4. Technologie výroby

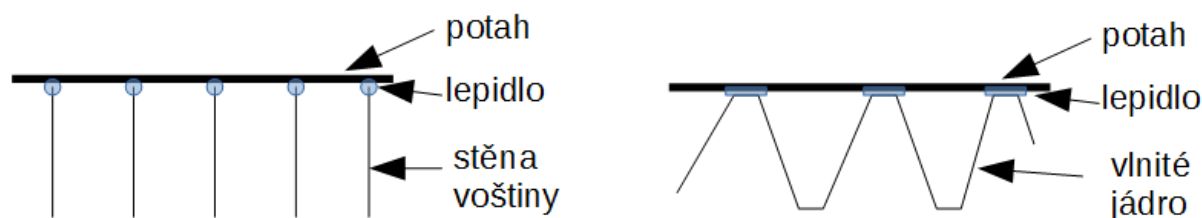
Pokud se jádro vyrábí z nomexového papíru, tak se papír nejprve naskládá do požadovaného tvaru buněk. Pak se prosycuje pryskyřicí a nechá volně vytvrdit, případně se postup opakuje, aby se dosáhlo požadované tloušťky papíru. Zlepšují se tak mechanické vlastnosti, ale pochopitelně roste i hmotnost.

Výroba voštinového jádra (obr. 6) pomocí expanze nemusí být tak zřejmá jako např. výroba vlnitého jádra (obr. 5). Expanzní metoda (obr. 7) začíná nařezáním fólie a naskládáním do bloku, ve kterém jsou střídavě v mezivrstvách proužky lepidla. Po jeho vytvrzení se blok nařeže na požadovanou tloušťku  $T$  a roztáhne do šířky  $W$ . Takto vyrobená voština má obvykle vyšší mechanické vlastnosti v podélném směru  $L$ .



Obr. 7 Postup výroby expandovaného voštinového jádra [1]

Při použití kompozitních potahů je možné využít k přilepení jádra k potahu pryskyřicí obsaženou v kompozitu, ale někdy se i v tomto případě vkládá fóliové lepidlo mezi potah a jádro, zvláště pokud se jedná o hliníkovou voštinu, která je zpravidla z tenkého hladkého materiálu a lepení „na tupo“ je v tomto případě náročnější než lepení vlnitého jádra, které se dotýká stěnou namísto hrany.

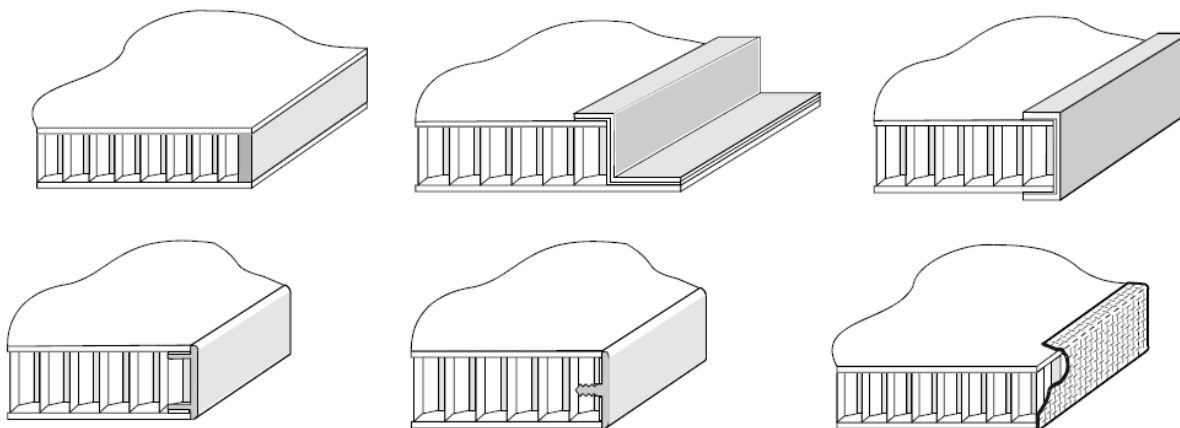


Obr. 8 Schéma lepeného spoje mezi voštinou a potahem, resp. vlnitým jádrem a potahem

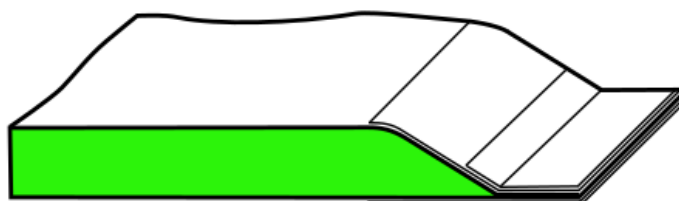


## 5. Typické konstrukční detaily

Konce sendviče se v praxi většinou nenechávají otevřené, protože by zde mohlo snadno dojít k mechanickému poškození a pronikání vlhkosti dovnitř jádra.

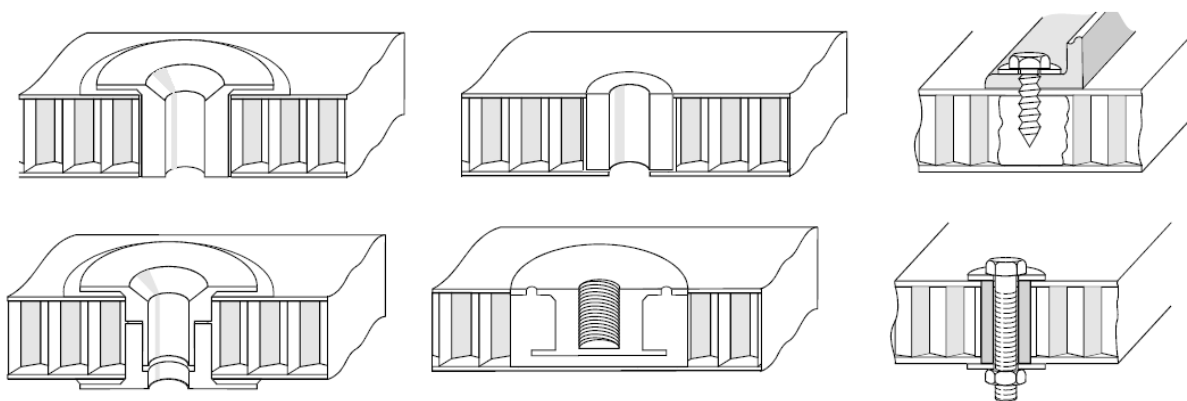


Obr. 9 Příklady zakončení sendvičů [6]



Obr. 10 Zakončení se zkosením, které je častěji používáno v kombinaci s kompozitními potahy

V případě bodového zatížení uprostřed sendvičové desky nebo zatížení na jejích okrajích je potřeba tato místa vyztužit aby nedošlo k promáčknutí jádra (obr. 3G), které nemá pro koncentrovanou sílu dostatečnou pevnost. V závislosti na typu použitého jádra existuje velké množství variant řešení. Pro uchycení různých prvků do sendvičových panelů se často vkládají do místa zavedení síly (obvykle přes šroub) vložky označované jako inserty. Mohou se vkládat jako náhrada jádra již před přilepením potahu nebo se naopak vyrobí panel kontinuální a dodatečně se vyřízne, aby se do něj vložil insert, který napomáhá rozvedení síly a brání lokální poruše původního lehkého jádra. Spoj insertu se zbytkem jádra se provede pomocí vypěňovacího lepidla nebo jednoduše zalitím pryskyřice. Pro zavedení menší síly postačuje částečný insert, který nesahá skrz celé jádro. Pro zavedení větších sil se použije pro insert celá výška jádra a šroub může být prostrčený skrz celý panel s hlavou na jedné straně a maticí na druhé. Někdy se v takovém případě ještě překládá potah, do kterého vstupují lokální smyková zatížení v rovině panelu.



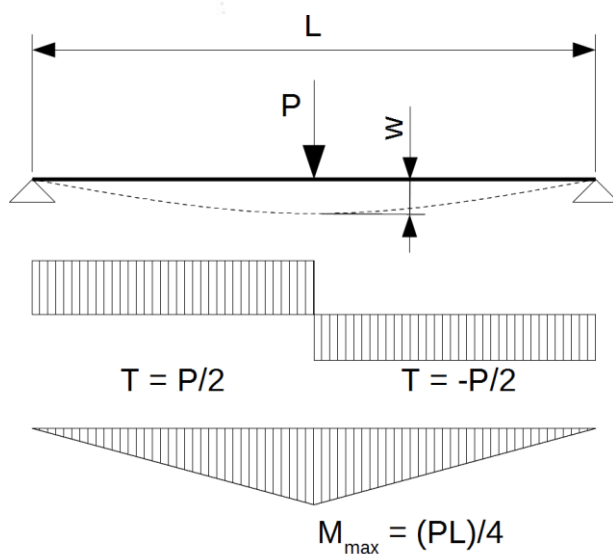
Obr. 11 Příklad modifikací pro zavedení osamělých sil [6]

Na větších dílech se někdy používají různé hustoty jádra podle zatížení v dané oblasti. Je potřeba při tom zvážit větší složitost při výrobě a manipulaci s potřebným materiálem vzhledem k hmotnostním úsporám / zvýšení tuhosti.

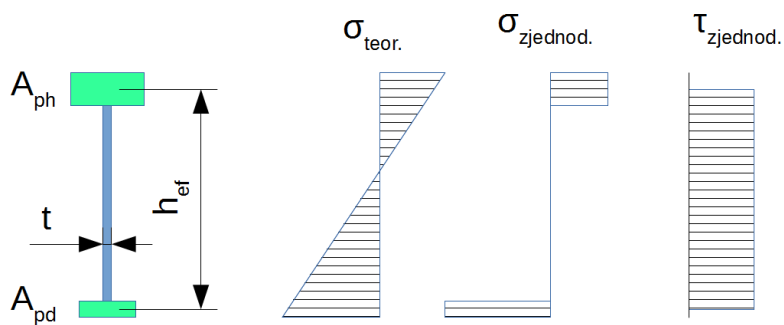
## 6. Navrhování a výpočty

Vedle numerického modelování existují i analytické vztahy pro výpočty sendvičových desek s různými okrajovými podmínkami, ale pokud se okrajové podmínky podobají nosníku, tak lze dosadit do poměrně jednoduchých vztahů a odhadnout tak průběh posouvající síly a ohybového momentu, ze kterých může být dopočteno napětí v nosníku a průhyb. Pro ilustraci jsou výsledné vnitřní účinky nosníku na třech podporách na obr. 12. Průběh napětí po tloušťce nosníku se zjednodušením pro případ s tenkou stojinou je na obr. 13 a analogicky na obr. 14 pro sendvičový průřez, kde se projeví různé moduly pružnosti potahu a jádra.

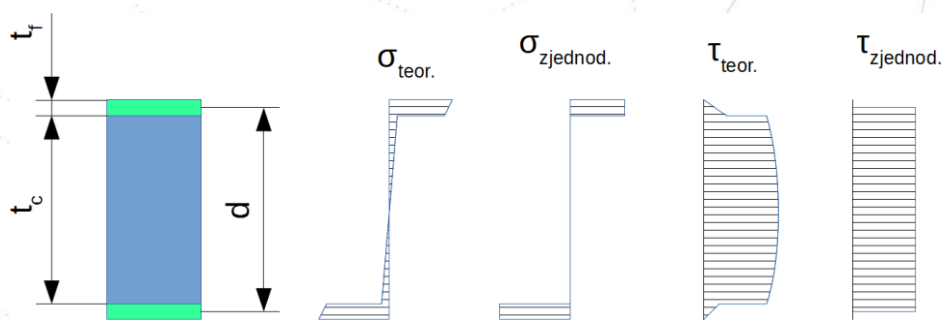
Zjednodušené průběhy respektují předpoklad, že ohybový moment vyvolá normálové napětí v potazích a posouvající síla vyvolá smykové napětí v jádře, jejichž orientace pro je naznačena na obr. 15. Výpočtové vztahy již dále uváděny nejsou, protože bez odpovídajících materiálových charakteristik nejsou použitelné, ale některé z nich lze snadno nalézt v [7]. Na rozdíl od tlustostěnných nosníků, kde se únosnost určuje podle hodnoty napětí v materiálu ve vztahu k mezi pevnosti (kluzu), případně kontroly celkové ztráty stability, tak u sendvičů je nutné navíc porovnávat hodnoty napětí s kritickými napětími, které vyvolají další poruchy uvedené v podkapitole 2.1.



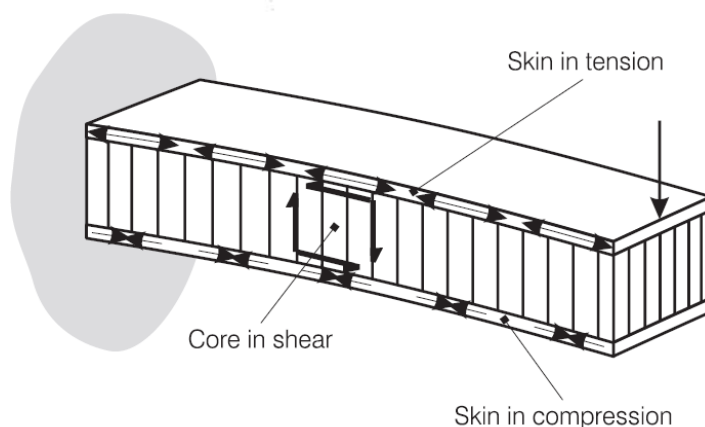
Obr. 12 Průběh výsledných vnitřních účinků při tří bodovém ohybu nosníku



Obr. 13 Průběh napětí na průřezu nosníku s tenkou stojinou



Obr. 14 Průběh napětí na průřezu sendvičového nosníku



Obr. 15 Orientace napětí ve vetknutém sendvičovém nosníku [7]

Obr. 16 ilustruje způsob zkoušení, kdy se nejprve provádějí nenáročné zkoušky malých částí konstrukce, pro získání cenných data pro postupné analýzy a různých variant výrobku a až později se přistupuje k menšímu množství zkoušek větších celků. Např. při návrhu letadla stojí na začátku velké množství materiálových zkoušek a na konci vývoje se pevnostně zkouší několik málo kusů celých křídel a např. jen jeden celý letoun jde na únavovou zkoušku.



Obr. 16 Zkušební pyramida

## 7. Použitá literatura

- [1] Klement, J. Podklady z předmětu Technologie výroby letadel I: Výroba sendvičů
- [2] Space engineering: Insert design handbook. ECSS-E-32-22A. ESA-ESTEC 2011 Noordwijk Netherlands
- [3] Foldcore Faltstruktur für Verbundwerkstoffe und Composites. Heute Innovation. Dostupné z: <http://www.haute-innovation.com/de/magazin/leichtbau/foldcore-faltstruktur-fuer-verbundwerkstoffe-und-composites.html>
- [4] Lightweight sandwich panel. Design for Laser Manufacture. Available at: [http://www.designforlasermanufacture.com/17/Lightweight\\_sandwich\\_panel.html](http://www.designforlasermanufacture.com/17/Lightweight_sandwich_panel.html)
- [5] ASM Handbook Volume 21: Composites. ASM International 2001
- [6] Sandwich Panel Fabrication Technology. Hexcel Composites. Duxford 2001. Available at: <http://hexcel.com/resources/technology-manuals>
- [7] HexWeb(tm) Honeycomb Sandwich Design Technology. Hexcel Composites. Duxford 2000. Available at: <http://hexcel.com/resources/technology-manuals>
- [8] Zenkert, D. An Introduction to Sandwich Structures, 2nd edition, KTH 2005 Stockholm.