KVALIFIKACE / CERTIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Ing. Bohuslav Cabrnoch, Ph.D.
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

Úvod

- **Certifikace (homologace)**
  - proces posuzování shody produktu s požadavky technických předpisů a technických specifikací.
- **Certifikační základna**
  - soubor předpisů, norem a jiných požadavků na certifikovaný produkt.
- **Kvalifikace**
  - ohodnocení, posouzení, případně zjištění způsobilosti osoby / produktu vykonávat / plnit danou funkci.

Úvod

- **Certifikace kompozitní konstrukce**
  - součást vyššího celku (kosmická družice, letadlo, automobil, kolejové vozidlo, ...)

- **Kvalifikace materiálu**
  - prokázání způsobilosti konkrétního materiálu plnit požadovanou funkci

Úvod

- **Verifikace**
  - ověřování, kontrola funkce / vlastností produktu
  - ověřujeme, že námi vyvinutý produkt odpovídá návrhu, čili jsme vyrobili to, co jsme vyrobit chtěli (vytváříme produkt správně)
  - simulační model odpovídá abstraktnímu modelu (materiálové vlastnosti, okrajové podmínky, rozměry, zatížení, atd.)

Úvod

- **Validace**
  - prokázání, že určitý proces bude trvale poskytovat produkt odpovídající předem určené specifikaci
  - prokázání toho, že použitý postup je vhodný pro zamýšlené použití
  - ověření, že model dává validní výsledky (vhodný typ prvků, hustota sítě, ...)

- **Kalibrace**
  - nastavení, metody, postupu, činnosti nebo parametrů na určitou úroveň

Kvalifikace kompozitů

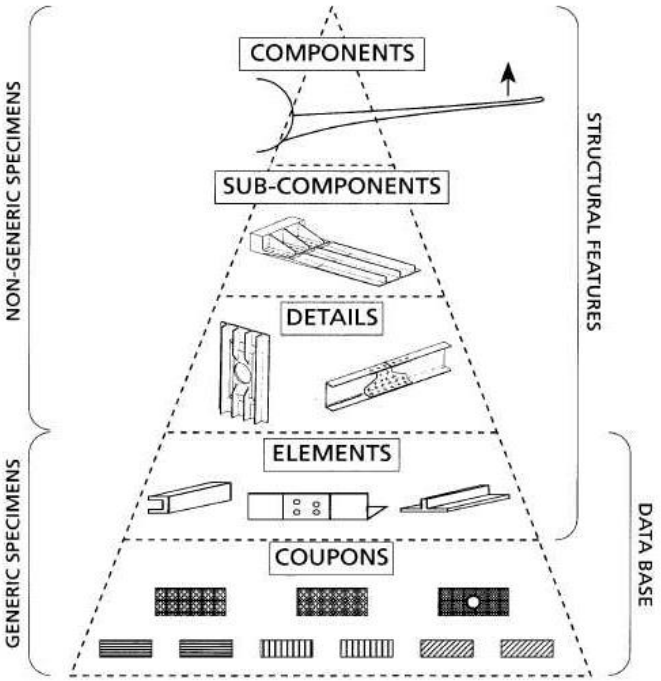
Kritické aspekty kompozitních konstrukcí

- Spojení konstrukčního návrhu s opakovatelným výrobním procesem
  - Materiálové vlastnosti a řízené parametry procesu
- Konstrukční uspořádání, výrobní defekty a provozní poškození, které způsobují lokální koncentrace napětí
  - Pevnost, únava, damage tolerance
  - Problematika měřítka (demonstrátor → sériová výroba)
- Vliv prostředí
  - Teplota, vlhkost
- Provozní prohlídky a opravy
  - obtížně zjistitelné vady při prohlídkách, složité opravárenské postupy

Kvalifikace kompozitů

- Samotná analýza se obecně nepovažuje za dostatečnou pro prokázání vlastností kompozitních konstrukcí.

- Při návrhu a kvalifikaci / certifikaci kompozitních konstrukcí se obvykle používá tzv. „Building Block Approach“ (BBA) (Poprvé použitý pro certifikaci letadel v 50. letech.)



- Aplikace BBA je nezbytná pro kvalifikaci / certifikaci kompozitních konstrukcí pro jejich citlivost na zatížení v normálovém směru, velký počet módů porušení a chybějící spolehlivé analytické metody.

Kvalifikace kompozitů

- Konstrukční návrh kovových konstrukcí je oproti kompozitům „jednoduchý“
  - Konstruktér získá vlastnosti materiálu z tabulek, definuje slitinu a tepelné zpracování a prakticky bez zkoušek provede návrh kovové konstrukce
  - Zkoušky se provádí pro ověření, že slitina, proces a výsledné vlastnosti odpovídají standardu (materiálový atest)
  - Následuje konstrukce, výroba a kvalifikace součástí

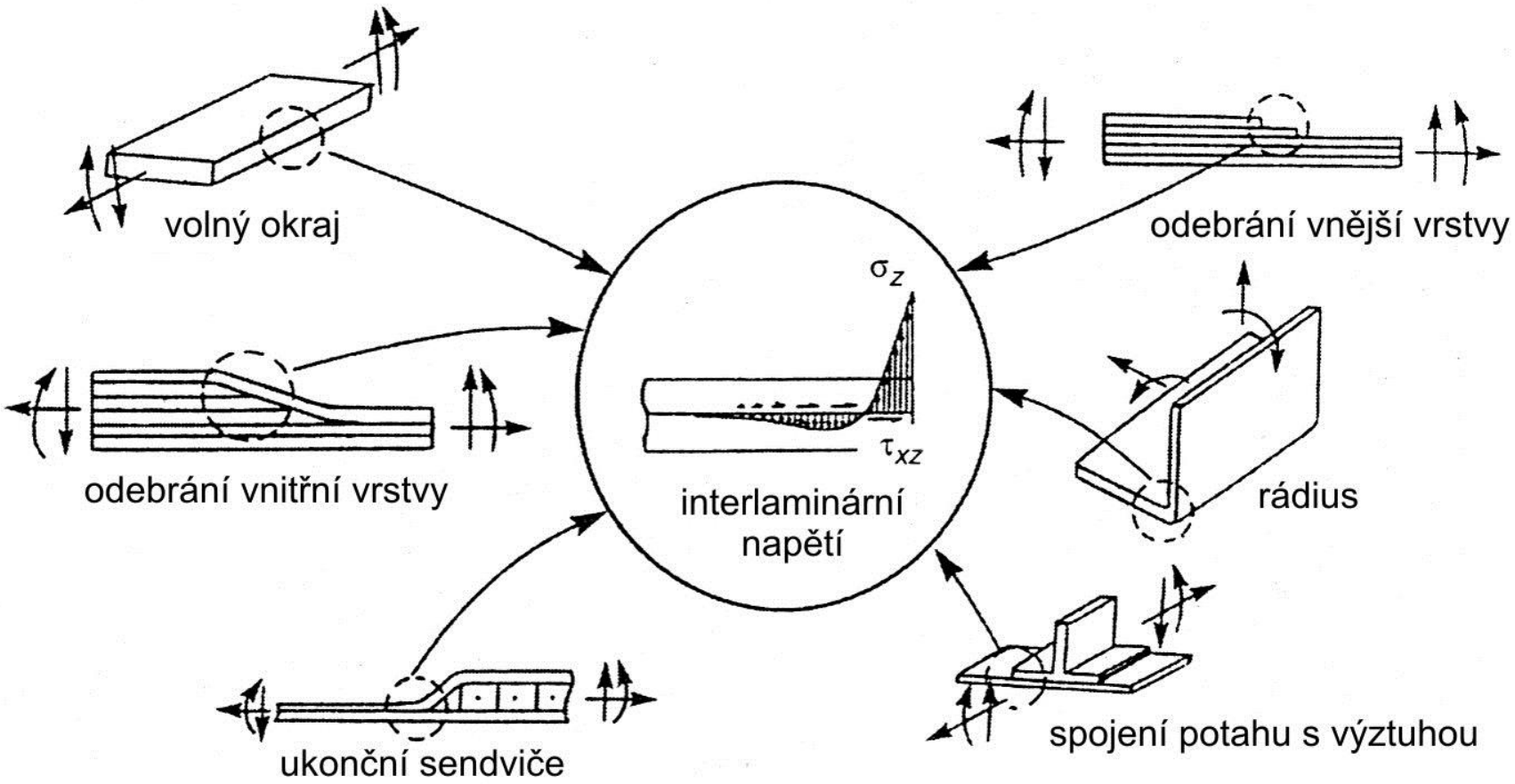
Building Block Approach

Postup

- Určení základní materiálových vlastností a předběžných návrhových hodnot
- Výběr kritických míst konstrukce pro následné experimentální ověření na základě analýzy konstrukce
- Určení kritických módů porušení každého konstrukčního prvku
- Určení zkušební prostředí, při kterém nastává kritický mód porušení
  - Módy porušení ovlivněné matricí (tlak, interlaminární smyk)
  - Potenciálně problematická místa s normálovým tahovým zatížením

Building Block Approach

Potenciálně problematická místa s normálovým tahovým zatížením



Building Block Approach

Postup – pokr.

- Návrh, výroba a zkoušky zkušebních vzorků pro jednotlivé zátěžné stavy a módy porušení
- Porovnání výsledků zkoušek s predikovanými parametry
- Korelace modelů, určení návrhových hodnot.
- Návrh, výroba a zkoušky konstrukční uzlů (složitější zátěžné stavy a módy porušení)
- Porovnání výsledků zkoušek s predikovanými parametry
- Korelace modelů.
- Návrh, výroba a zkoušky konstrukčních celků
- Porovnání výsledků zkoušek s predikovanými parametry
- Korelace modelů.

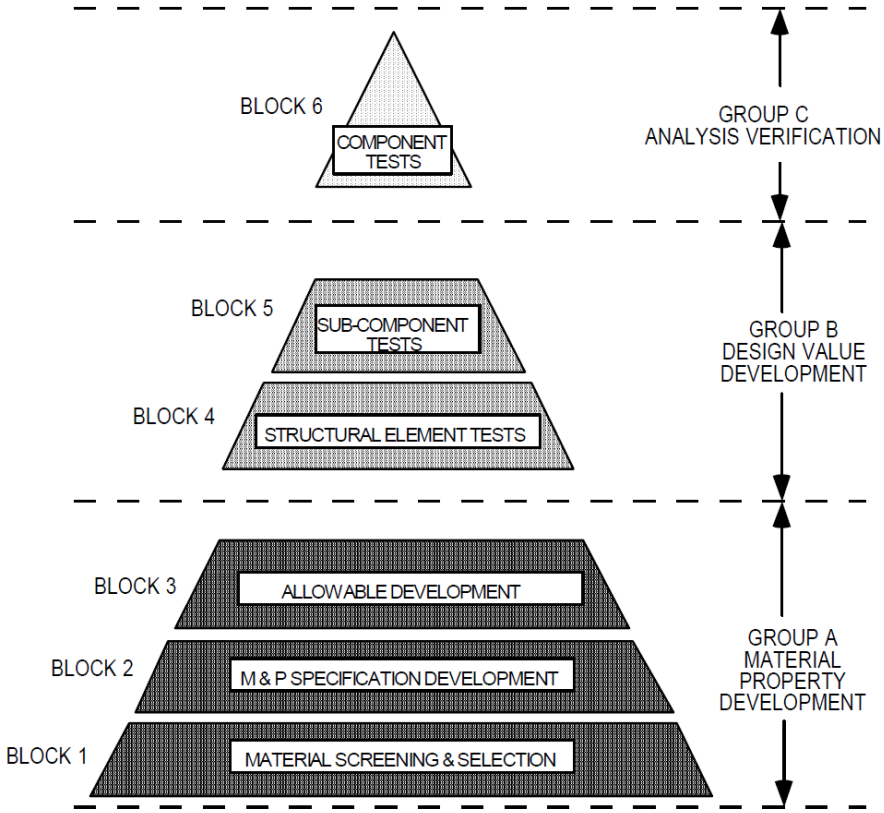
Building Block Approach

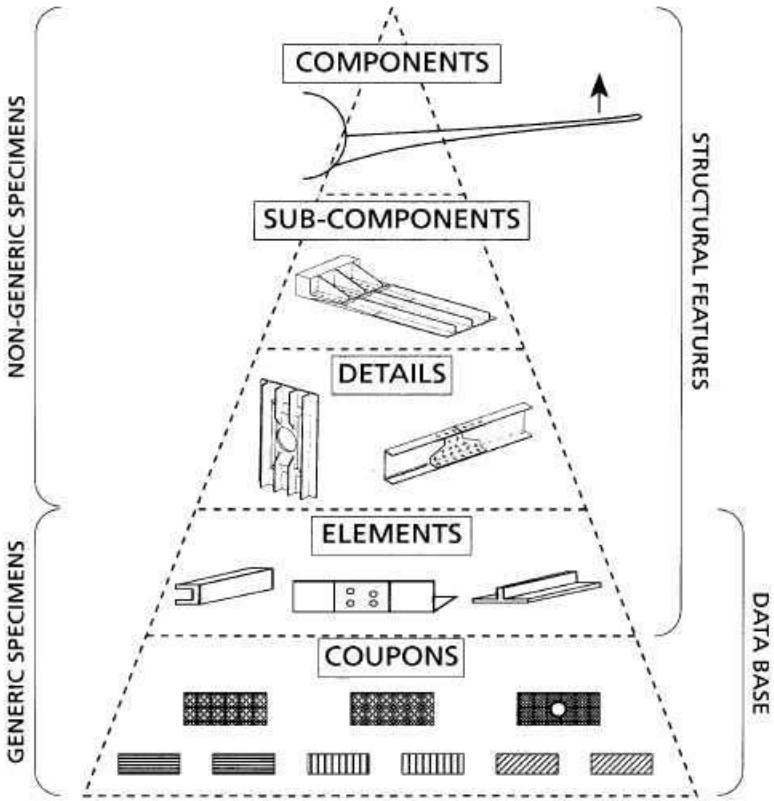
Postup – pokr.

- Statické a únavové zkoušky celých konstrukcí
- Porovnání výsledků zkoušek s predikovanými parametry
- Korelace modelů

- Kvalifikace kompozitních konstrukcí je často složitější díky tomu, že kritické zátěžné stavy nastávají při zvýšené teplotě a vlhkosti. Zahrnutí těchto vlivů se často provádí přetížením zkušební tělesa (knock-down factor) při zkoušce za standardních podmínek nebo analýzou módu porušení spojené s měřeními deformací vztažených k testům menších celků za zvýšené teploty a vlhkosti.

Building Block Approach





COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK - VOLUME 3, Polymer Matrix Composites, Materials Usage, Design, and Analysis

Building Block Approach

- Hlavním účelem BBA je snížit certifikační náklady a rizika při plnění technických, předpisových a zákaznických požadavků

- Nákladová efektivita je dosažena pomocí
  - testováním většího počtu méně nákladných malých vzorků, (vyšší úroveň zahrnuje méně zkušebních těles než předchozí)
  - posouzení technologických rizik na počátku programu
  - nahrazení testů analýzami, kde je to možné

Building Block Approach

- Úrovně strukturální složitosti
  - Konstituent (vlákno, matrice)
  - Lamina
  - Laminát
  - Konstrukční uzel
  - Konstrukční celek

Building Block Approach

- Materiál, který má být testován, a rozsah jeho zkoušek na každé úrovni BBA by měl být určen na začátku plánování zkušebního programu

- Stěžejní faktory:
  - Výrobní proces
  - Strukturální aplikace
  - Podnikové postupy
  - Požadavky dohlédacího úřadu / zákazníka

Building Block Approach

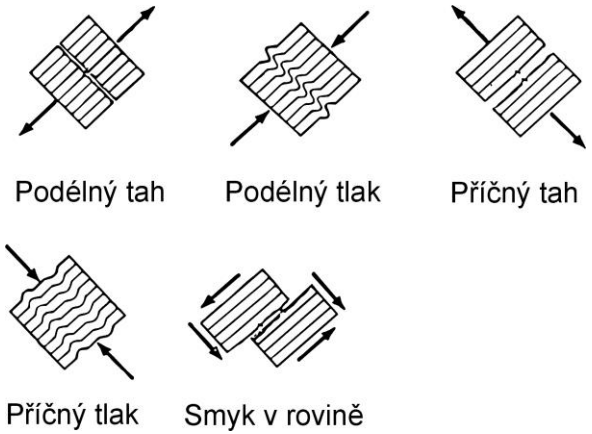
Zkoušky konstituentů

- Určují fyzikální a mechanické vlastnosti vláken, formy výztuže, pojiv a vláknových polotovarů.
  - Hustota
  - Mez pevnosti v tahu
  - Modul pružnosti v tahu
  - ...

Building Block Approach

Zkoušky laminy

- Určují vlastnosti jedné vytvrzené vrstvy výztuže
- Klíčové vlastnosti
  - Plošná hmotnost výztuže
  - Podíl matrice / vláken, porezita
  - Tloušťka vytvrzené vrstvy
  - Mez pevnosti v tahu / tlaku / smyku
  - Modul pružnosti v tahu / tlaku / ve smyku
  - Interlaminární smyková pevnost



Building Block Approach

Zkoušky laminátu

- Charakterizace chování kompozitu dané skladby
- Klíčové vlastnosti
  - Mez pevnosti v tahu / tlaku / smyku
  - Modul pružnosti v tahu / tlaku / ve smyku
  - Interlaminární smyková pevnost
  - Interlaminární lomová houževnatost
  - Únavová odolnost

Building Block Approach

Zkoušky konstrukčních uzlů

- Určují schopnost materiálu odolat běžným nespojitostem laminátu
- Klíčové parametry
  - Mez pevnosti v tahu / tlaku otevřeného / vyplněného otvoru (OHC, OHT, FHC, FHT)
  - Mez pevnosti v tlaku po rázovém poškození (Compression after Impact – CAI)
  - Únosnost mechanických spojů (otlačení, protažení)
  - Lepené spoje

Building Block Approach

- Zkušební program dle BBA
  - Výběr materiálu a výrobního procesu
  - Vývoj výrobního procesu
  - Určení materiálových vlastností
  - Konstrukční uzly a elementy
  - Konstrukční celek
  - Celá konstrukce
  - Certifikační zkoušky

Building Block Approach

Výběr materiálu a výrobního procesu

- Nelze oddělit, nutno řešit společně
- Analýza konstrukčních požadavků a tržních nákladů
- Nutné posoudit vyspělost materiálu a výrobního procesu
  - Návrhové hodnoty (jsou již k dispozici?)
  - Opakovatelnost výroby (výrobní postup již použitý?)
  - Přenos zkušeností z předchozích programů

Výstup: Potenciálně vhodné materiály a výrobní procesy

Building Block Approach

Vývoj výrobního procesu

- Definování mezí procesu
  - Určení mechanických vlastností pro horní/dolní meze
- Prokázání opakovatelnosti výroby pro dané meze
- Definice kritických parametrů procesu (operace, nástroj, zařízení)
- Vyvinutí kontrolního procesu (mezioperační kontrola, souběžné vzorky, NDT, ...)

Výstup: Specifikace výrobního procesu

Building Block Approach

Vývoj výrobního procesu

- Díky variabilitě materiálových vlastností kompozitů a výrobního procesu, může i relativně malá změna výroby způsobit dramatickou změnu v kvalitě dílu vedoucí ke snížení únosnosti nebo módu porušení (např. porezita).

Building Block Approach

Materiálové vlastnosti

- Určované fyzikální a chemické vlastnosti
  - Hustota
  - Viskozita (závislost na čase / teplotě)
  - Gel time
  - Kinetika vytvrzovacího procesu
  - Skladovatelnost (-18°C, NT)
  - Lepivost (prepregy)
  - Teplota skelného přechodu (DSC, DMA)
  - Max. / min. provozní teplota

Building Block Approach

Materiálové vlastnosti

- Mechanické vlastnosti
  - Pevnost
  - Tuhost
  - Citlivost na vruby / poškození
- Vyšetření všech kritických případů a vlivu prostředí
  - Teplota, vlhkost, provozní kapaliny
- Určení návrhových hodnot
  - A-, B- hodnoty

Výstup: Materiálové specifikace, návrhové hodnoty

Vliv prostředí

Materiálové vlastnosti - vliv prostředí

- Vlastní laminát
  - Absorpce vlhkosti spojená se snížením pevnostních parametrů ovlivněných matricí (tlak, ILSS, otlačení), zvláště za zvýšené teploty
  - Snížení teploty skelného přechodu matrice
  - Velice malý vliv na tuhostní parametry
- Sendvičové / lepené konstrukce
  - Vlhkost proniká do lepené spáry → snížení smykové a odlupové pevnosti
  - Vlhkost proniká do voštin → přetlak vodní páry při ohřevu nebo rozpínání kondenzované vody při mrazu
- Integrované kovové díly
  - Galvanická koroze, převážně Al slitiny / uhlíkové kompozity, velmi kritické v solném prostředí

Vliv prostředí

Materiálové vlastnosti - vliv prostředí

- Vlhkost absorbuje zejména matrice
  - Termosety
  - Termoplasty méně
- Výztuž pohlcuje vlhkost výrazně méně
  - Uhlíková vlákna a ani jejich rozhraní s matricí nejsou vlhkostí negativně ovlivněny
  - Skelná vlákna vlhkost neabsorbují, rozhraní je už problém – provádějí se úpravy jejich povrchu
  - Aramidová vlákna obvykle absorbují více vlhkosti než matrice

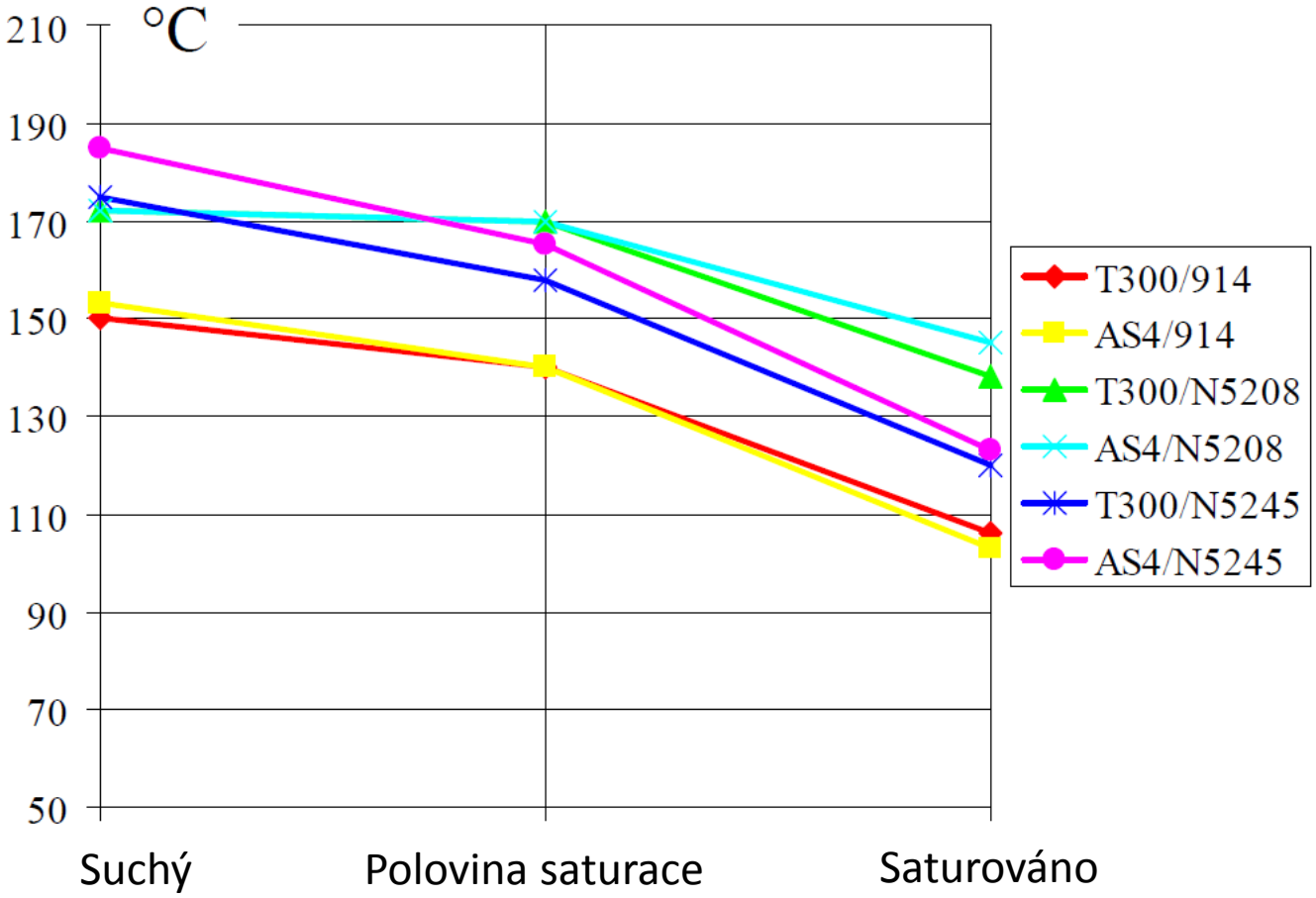
Vliv prostředí

Materiálové vlastnosti - vliv prostředí

- Vlhkost v kompozitu snižuje jeho mechanické vlastnosti a Tg
  - Hodnota Tg obvykle závisí na zvoleném pryskyřičném systému a teplotě vytvrzování
  - Hodnota Tg matrice při nasycením vlhkostí by měla být o 20 ÷ 30°C vyšší než max. provozní teplota
  - Hodnota Tg se s vlhkostí obvykle snižuje, velikost poklesu závisí na absolutní hodnotě Tg (1 hm. % ≈ 20°C)
    - Tg dry ≈ 115°C → Δ Tg ≈ 20 ÷ 30°C
    - Tg dry ≈ 200°C → Δ Tg ≈ 40 ÷ 50°C
  - Buď průkaz v HW podmínkách nebo zvyšující součinitele na prostředí
  - Platí i pro polymerní lepidla

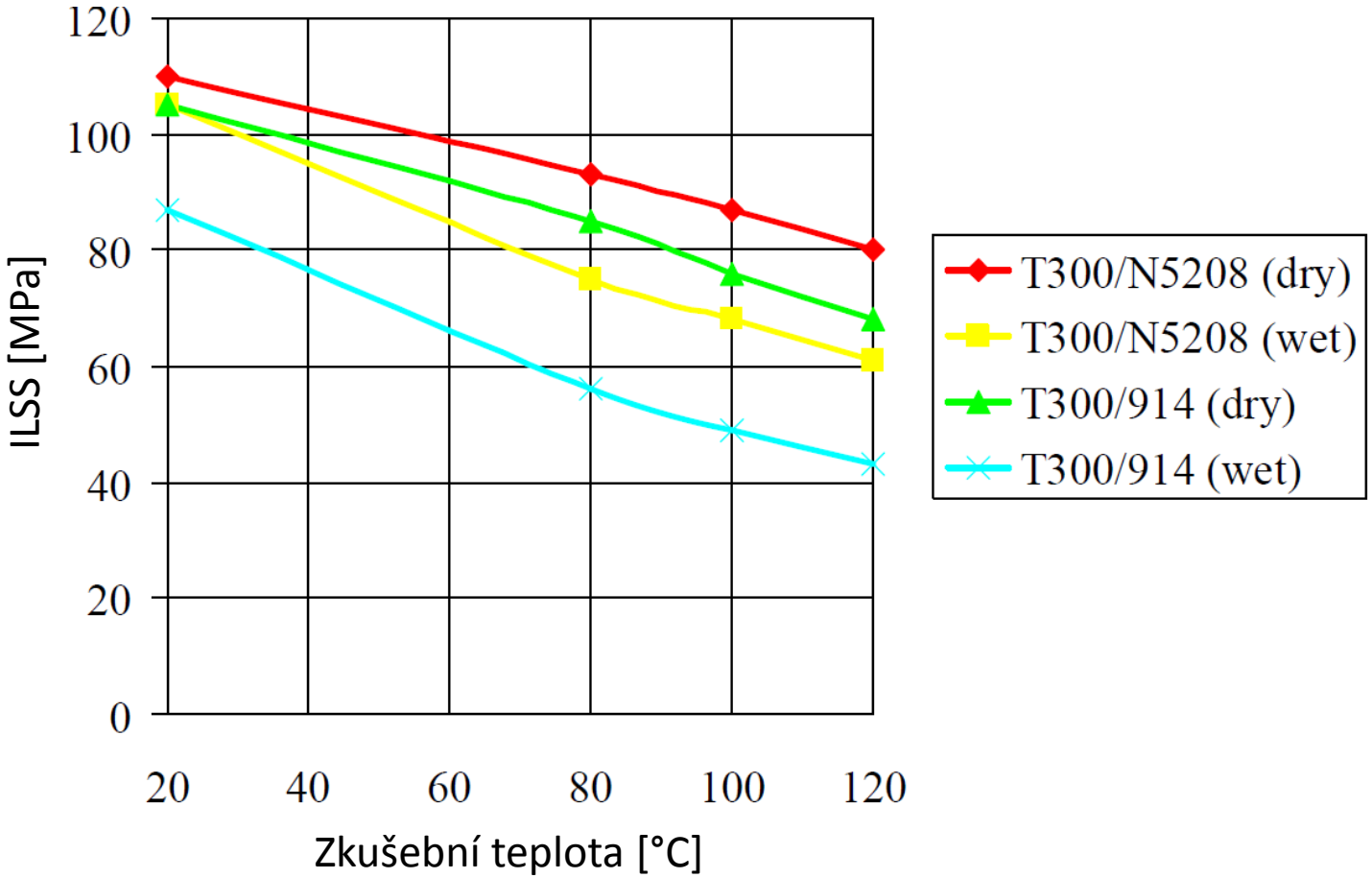
Vliv prostředí

Pokles Tg vlivem vlhkosti



Vliv prostředí

Pokles mechanických vlastností vlivem prostředí



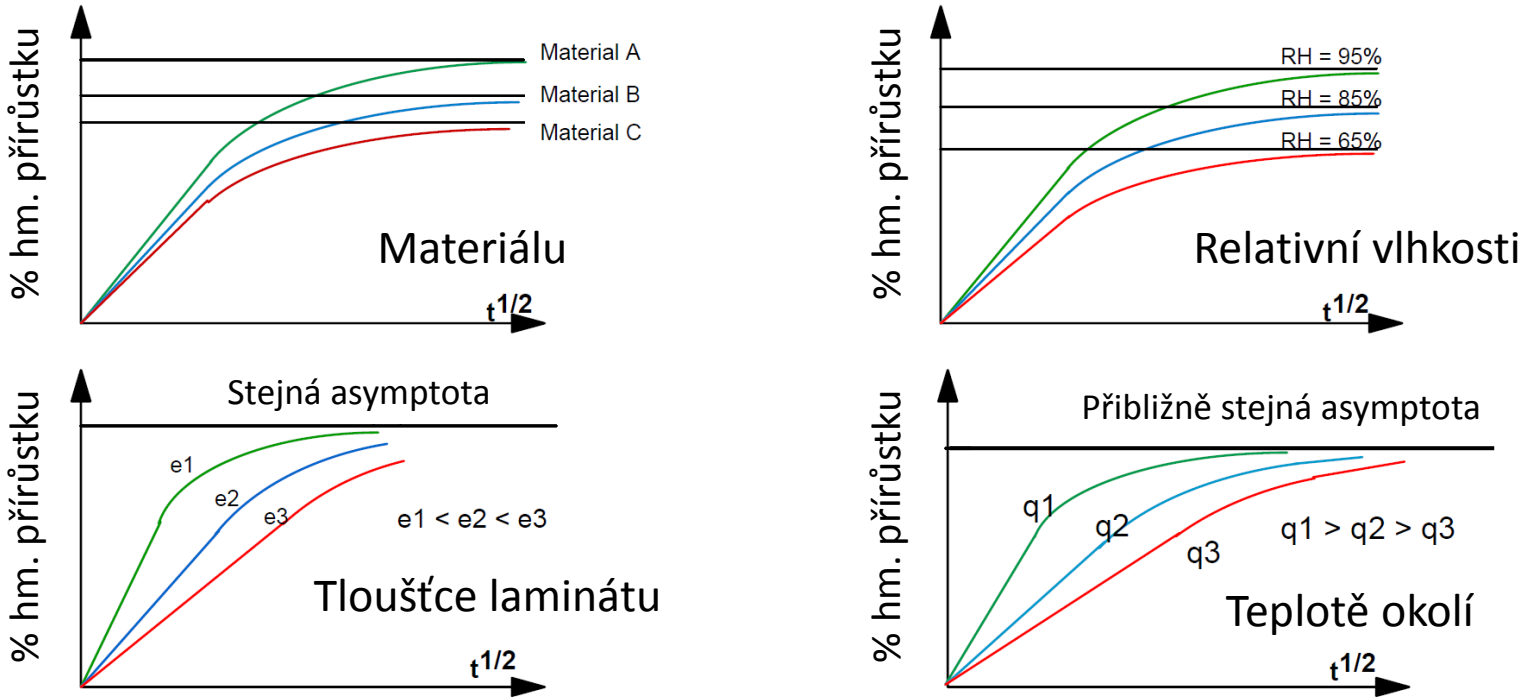
Vliv prostředí

Pokles mechanických vlastností vlivem prostředí

- Předpokládá se, že účinek vlhkosti je vratný (asymptotický)
- Kombinací nejhorších možných podmínek (teplota, vlhkost) může vést ke snížení statických pevností v následujících rozsazích (platí pro 180°C systémy):
  - max. provozní teplota do 80°C od -5% do -15%
  - max. provozní teplota > 100°C od -15 do -25%
- Uvažovány jsou pouze vlastnosti závislé na matrici (tlak, smyk, otlačení)

Vliv prostředí

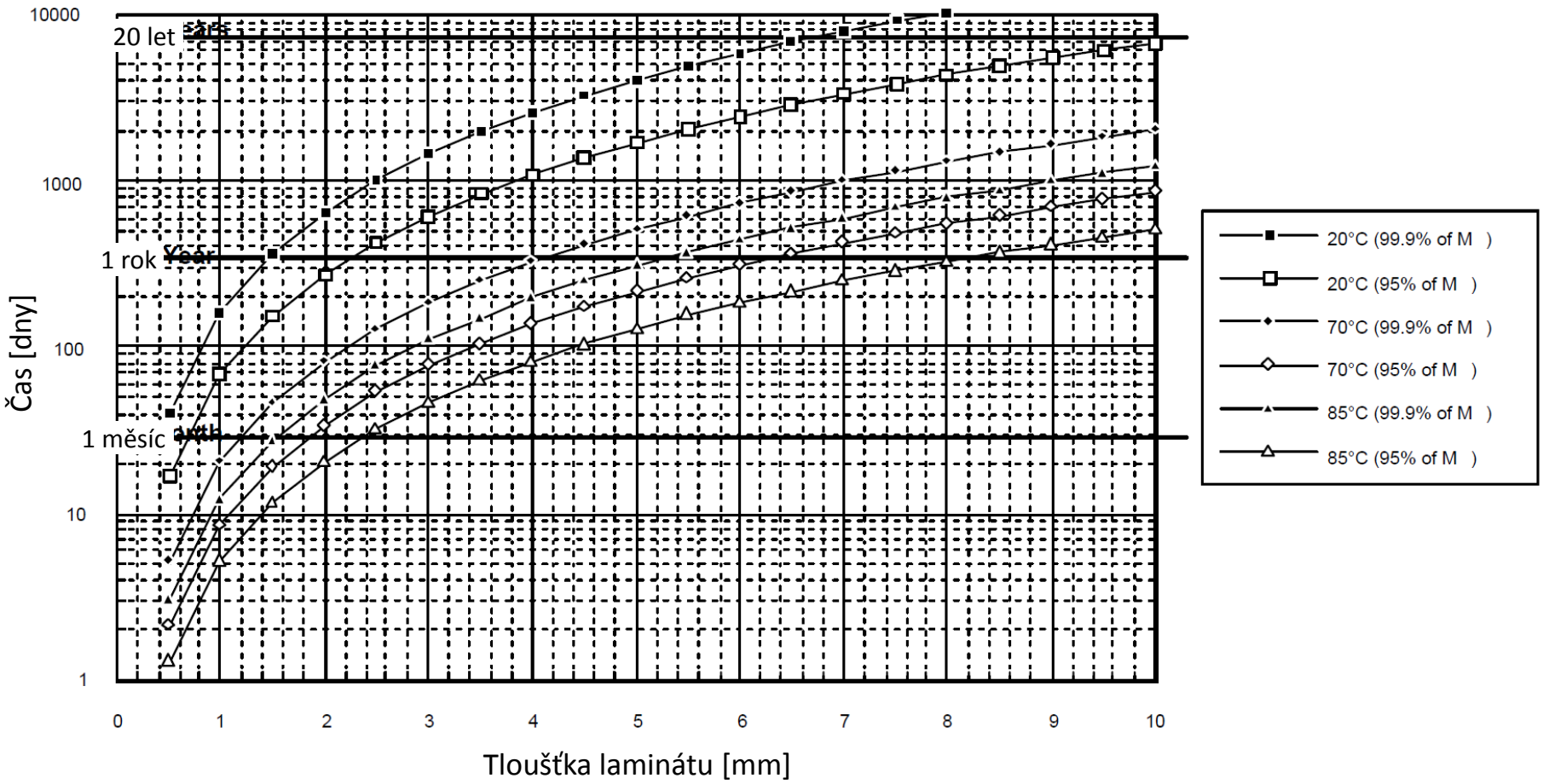
Absorpce vlhkosti závisí na:



Za stálých podmínek závisí rovnovážný obsah vlhkosti převážně na materiálu a relativní vlhkosti. Teplota množství ovlivňuje jen mírně.

Vliv prostředí

Potřebná doba k dosažení rovnovážného obsahu vlhkosti (T300/914)



Vliv prostředí

Doporučený postup pro vlhčení vzorků (Airbus)

1. Zjistit následující vlastnosti vybraného materiálu

- „Material Target Moisture Content“ (MTMC) určený jako součet obsahu vlhkosti pro saturované vzorky při 70°C / 85% RV a uvolněné vlhkosti ze sušených vzorků.
- Max. tloušťku laminátu, u které se dosáhne saturace během života letadla (Airbusu akceptovaná hodnota je 8 mm, při expozici z obou stran)

2. Vyrobit souběžné vzorky (travellers) - stejný materiál, skladba, výrobní proces. Typicky 100 x 100 mm, 2 souběžné vzorky pro materiál a tloušťku.

Vliv prostředí

Doporučený postup pro vlhčení vzorků (Airbus)

3. Při zahájení vlhčení je jeden souběžný vzorek do klimatizační komory ke zkušebním tělesům a druhý je vložen do sušárny pro určení počátečního obsahu vlhkosti.

4. Během vlhčení je souběžný vzorek průběžně vážen a při dosažení MTMC je vlhčení ukončeno (nutné vzít v úvahu i sušení dle bodu 3)

Vliv prostředí

Jak zkrátit čas vlhčení

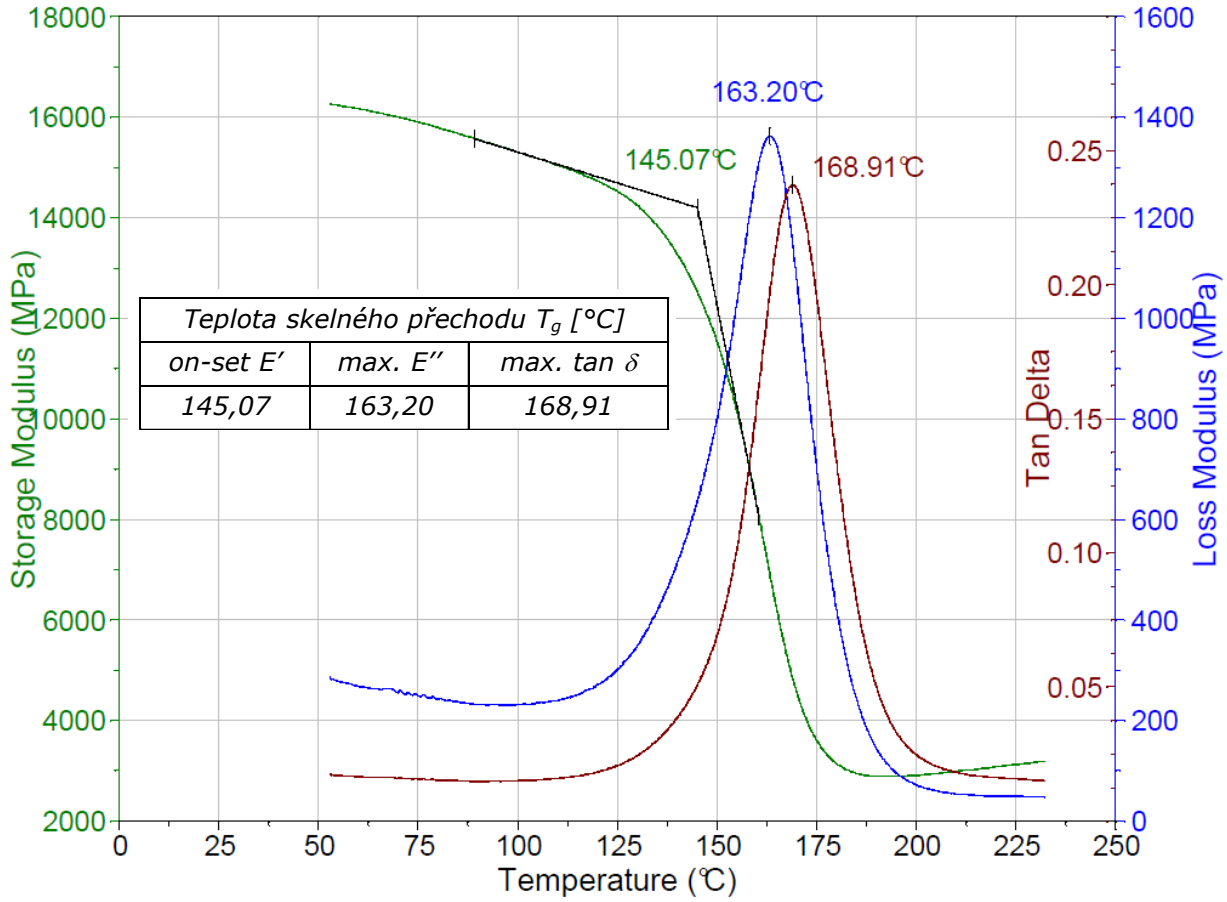
1. Zvýšit relativní vlhkost z 85% na 95%.
   - Při aplikaci je doporučeno dokončit vlhčení při 85% RV pro homogenizaci obsahu vlhkosti přes tloušťku laminátu

2. Zvýšit teplotu
   - Doporučené maximální hodnoty
     - Evropa: 70°C
     - USA (MIL-HDBK-17): 82°C

Příliš vysoká teplota může změnit strukturu materiálu, která již nemusí odpovídat provozním podmínkám. (degradace vlastností, dotvrzení, ...)

Teplota skelného přechodu

Materiálové vlastnosti – teplota skelného přechodu (DMA)



Teplota skelného přechodu T_g [°C]		
on-set E′	max. E″	max. tan δ
145,07	163,20	168,91

Building Block Approach

Materiálové vlastnosti – nutno zohlednit

- Citlivost na vady a poškození
  - Vliv defektu na mechanické vlastnosti
    - Porezita
    - Delaminace
    - Vrásky
  - “Damage” tolerance
    - Nízko rychlostní ráz (impact)
- Opravy
  - Vyvinutí metodiky oprav (materiály a postupy)
  - Prokázání použitelnosti

Kvalifikace materiálu

Klasifikace leteckých konstrukcí dle DOD/NASA vs. požadavky na max. výrobní vady polymerních kompozitů

Aircraft Structure		Physical Defect Maximum Requirements for Parts: Carbon or Glass Reinforced PMC Example	
Classification	Description	Tape	Fabric
PRIMARY • Fracture critical (F/C)	CARRIES PRIMARY AIR LOADS • Failure will cause loss of vehicle	≤2% porosity over ≤5% of area. No delaminations allowed. No edge delaminations allowed (including holes).	≤3% porosity over ≤5% of area. No delaminations allowed. No edge delaminations allowed (including holes).
• Noncritical (N/C)	• Failure will not cause loss of vehicle, cost critical replacement or repair.		
SECONDARY • Fatigue critical (FA/C)	CARRIES SECONDARY AIR & OTHER LOADS • Failure will not cause loss of vehicle, cost critical replacement	≤2% porosity over ≤10% of area. No delaminations. No edge delaminations allowed (including holes).	≤3% porosity over ≤10% of area. No delaminations. No edge delaminations allowed (including holes).
• Noncritical (N/C)	• Failure will not cause loss of vehicle • Not cost or fatigue critical		
NONSTRUCTURAL • Noncritical (N/C)	NON- OR MINOR LOAD BEARING • Failure/replacement minor inconvenience, not cost critical	≤3% porosity over ≤10% of area. Delaminations over ≤2% of area. Repaired edge delaminations ≤4% of edge length or hole circumference are allowed.	≤4% porosity over ≤15% of area. Delaminations over ≤2% of area. Repaired edge delaminations ≤4% of edge length or hole circumference are allowed.

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK - VOLUME 3, Polymer Matrix Composites, Materials Usage, Design, and Analysis

Building Block Approach

Konstrukční uzly a elementy

- Výroba konstrukční detailů
- Ověření analýz
- Zpřesnění definice výrobních a provozních kontrol a opravárenských postupů
- Snížení rizika vyrobení neshodného výrobku, odladění výrobních parametrů a konstrukce přípravků

Building Block Approach

Kompozitní díly

- Výroba celého dílu dle navržených postupů
  - Ověření výrobního procesu (FAI)
  - Destruktivní zkoušky
- Ověření opravárenských postupů
- Ověření mechanických vlastností dílu a porovnání výsledků zkoušek s analýzami
- Ověření smontovatelnosti s vyššími celky

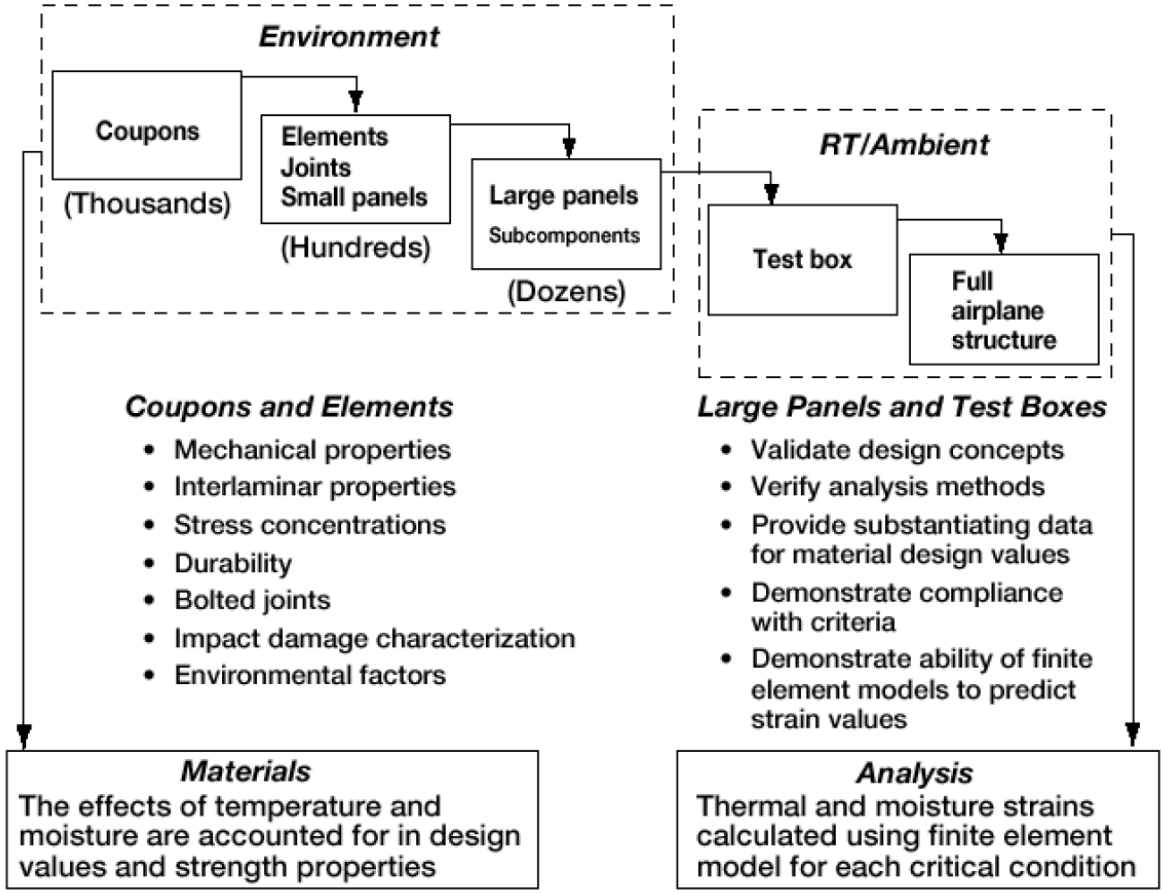
Building Block Approach

Konstrukční celky

- Certifikační zkoušky
  - Statika
  - Dynamika
  - Únava
- Provozní zkoušky
  - Uvolnění do provozu na základě výsledků celého řetězce analýz a zkoušek

Building Block Approach

- Aplikace BBA na ocasní plochy Boeing 777



COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK - VOLUME 3, Polymer Matrix Composites, Materials Usage, Design, and Analysis

Building Block Approach

- Materiálové zkoušky mohou být také rozděleny dle použití jejich výsledků
  - Screening
  - Kvalifikační
  - Akceptační
  - Ekvivalenční
  - Certifikační

Kvalifikace materiálu

Screeningové zkoušky

- Účelem je prokázat vhodnost materiálu ke kvalifikaci
  - program zkoušek se soustředí na nové nadějné nebo doposud nepoužívané materiály a posuzuje jejich vhodnost / potenciální přínosy pro danou aplikaci
  - tyto předběžné zkoušky se věnují posouzení kritických strukturálních vlastností jako damage tolerance, citlivost na vruby, odolnost prostředí atd.
  - obvykle se zkouší pouze jedna šarže materiálu

Kvalifikace materiálu

Kvalifikační zkoušky

- Účelem je prokázat schopnost materiálu splnit požadavky materiálové specifikace, která by měla zajistit, že:
  - Materiál má dostatečné mechanické vlastnosti pro plánovanou aplikaci
  - Materiál neobsahuje žádné nebezpečné látky
  - Klíčové parametry výrobního procesu daného materiálu jsou definovány včetně přípustných mezí

Materiálová specifikace by měla definovat minimální hodnoty pro všechny prováděné zkoušky

Kvalifikace materiálu

Kvalifikační zkoušky

- Kvalifikace materiálu je zcela v odpovědnosti výrobce produktu
- I když je materiál kvalifikovaný dle dané specifikace, musí být kvalifikovaný i pro každou aplikaci. Jinak řečeno kvalifikace je podmínka nutná, nikoliv však postačující pro schválení použití materiálu v dané aplikaci.
- Určení návrhových hodnot by nemělo být cílem kvalifikačního programu, ačkoliv výsledky kvalifikačních zkoušek jsou k nim přiřazeny
- Výsledky kvalifikačních zkoušek by měly umožnit vytvoření materiálové specifikace, která zajistí, že každá dodaná šarže materiálu bude ve všech ohledech ekvivalentní k referenčnímu kvalifikovanému materiálu.

Kvalifikace materiálu

Ukázka kvalifikační specifikace

- Fyzikální vlastnosti prepregu (plošná hmotnost, obsah pryskyřice, obsah těkavých podílů, lepivost, gel time, atd.)
- Fyzikální vlastnosti laminátu (Tg)
- Mechanické vlastnosti:
  - Lamina: základní vlastnosti (tah, tlak, smyk) + G1c, G2c a ILSS.
  - Laminát (tři typy skladeb): OHC, OHT (open hole); FHC, FHT (filled hole), CAI (Compression after impact), Pevnost v otlačení
- Expozice agresivním kapalinám (Skydrol, palivo a MEK)

Počet šarží: od 1 do 5 v závislosti na měřené vlastnosti.

Počet vzorků: 6 ks na zkoušku, kromě CAI, G1c a G2c.

Celkový počet zkušebních těles pro mechanické zkoušky více než 1200 ks (kvalifikace), 200 ks (screening).

Kvalifikace materiálu

Verifikační zkoušky

- Účelem je určit návrhové hodnoty
- Návrhové hodnoty jsou nezbytné k ověření únosnosti. Mají podobu napětí, poměrných deformací, zatížení, životnosti a jsou použity k výpočty míry bezpečnosti pro každou část konstrukce
- Tyto hodnoty jsou určeny na základě výsledků zkoušek s vysokou spolehlivostí (obvykle A- nebo B- hodnoty) a musí zohledňovat:
  - proměnnost materiálových vlastností
  - proměnnost parametrů výrobního procesu
- Návrhové hodnoty mohou být určeny na různých úrovních strukturální složitosti dle úrovně nejistoty výpočetního modelu

Kvalifikace materiálu

Akceptační zkoušky

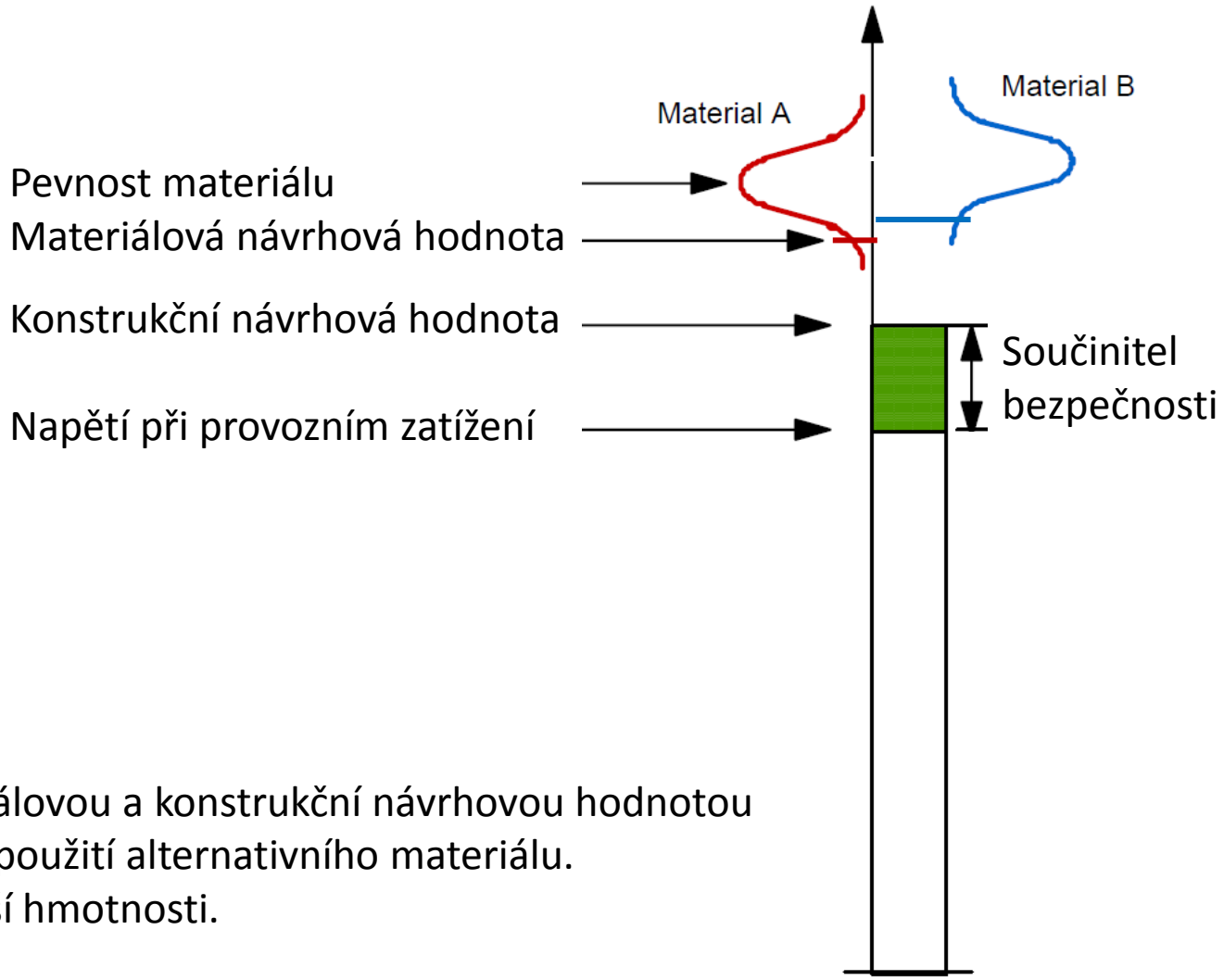
- Účelem je ověřit, že šarže materiálu je ekvivalentní ke kvalifikovanému referenčnímu materiálu
- Zatímco kvalifikační zkoušky zahrnují několik šarží materiálu, akceptační zkoušky ověřují pouze jednu šarži, což by mělo být zohledněno v požadovaných parametrech, tj. definován interval hodnot, ve kterém se daná vlastnost může pohybovat.
- Akceptační zkoušky nemohou nahrazovat systém řízení jakosti výrobce materiálu

Návrhové hodnoty

- Konstrukční
  - Materiálové vlastnosti a parametry konstrukčních uzlů určené na základě zkoušek s vysokou spolehlivostí

- Materiálové
  - Materiálové hodnoty laminy a/nebo laminátu určené na základě pravděpodobnostní analýzy výsledků zkoušek, např. A-, B-hodnoty
    - A-hodnota - 99% pravděpodobnost poruchy při 95% spolehlivosti
    - B-hodnota - 90% pravděpodobnost poruchy při 95% spolehlivosti

Návrhové hodnoty



Záloha mezi materiálovou a konstrukční návrhovou hodnotou umožňuje budoucí použití alternativního materiálu.
Ovšem za cenu vyšší hmotnosti.

Návrhové hodnoty

Materiálové návrhové hodnoty

- Vstupní parametry pro standardní pevnostní kritéria použitelné v různých místech konstrukce.
  - Pevnosti laminy, pevnost v otlačení, ...
  - Soubor hodnot určený na základě statistického vyhodnocení výsledků zkoušek, které jsou vázány na individuální materiálové vzorky
  - Materiálové návrhové hodnoty jsou použity k určení konstrukčních návrhových hodnot tak, že konstrukční návrhové hodnoty zahrnují všechny materiály a konstrukční principy, které jsou použity v konstrukci

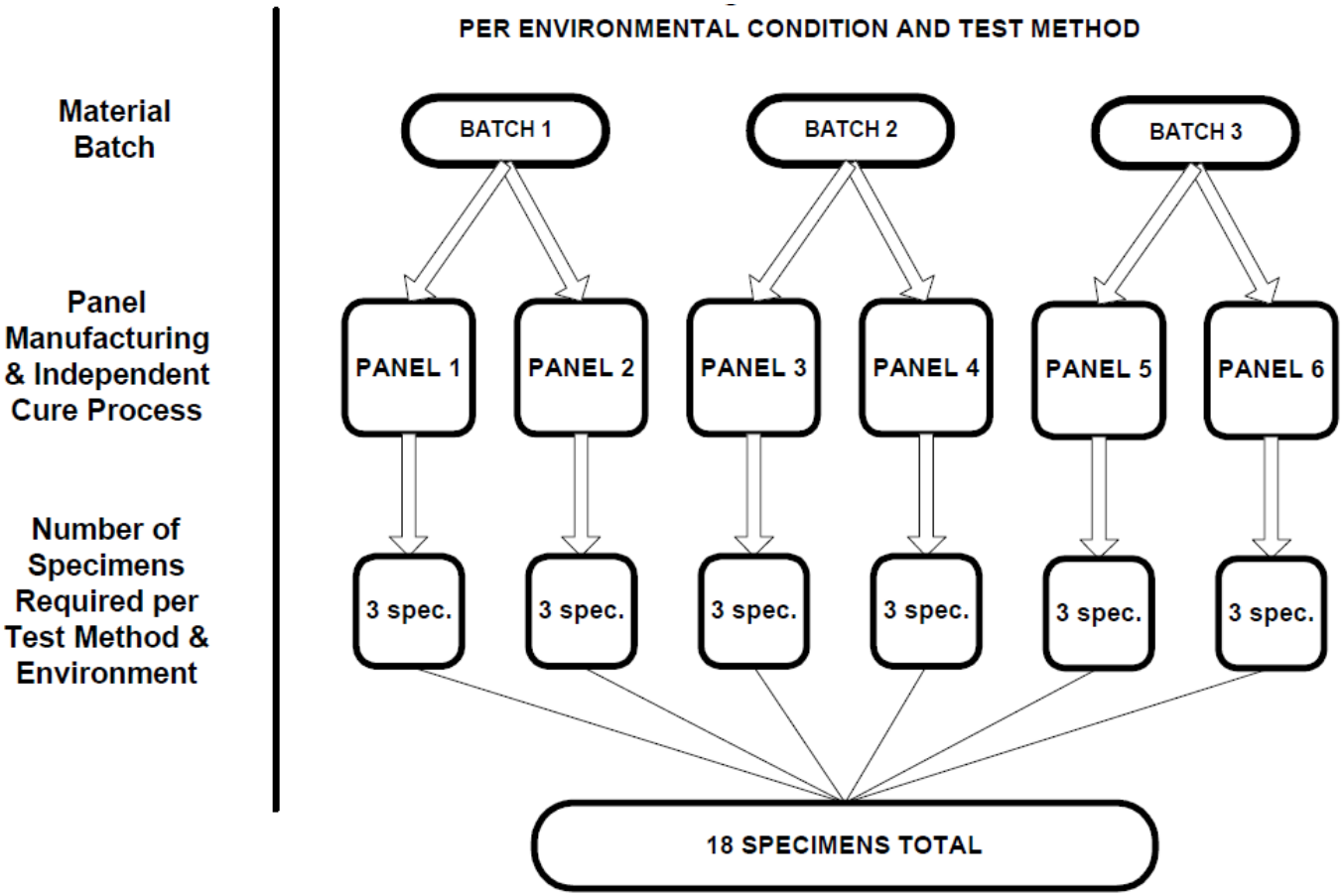
Návrhové hodnoty

Konstrukční návrhové hodnoty

- Pevnost a mód porušení pro daný konstrukční uzel bez možnosti zobecnění
  - Porušení podélníku, odtržení žebra, CAI integrálně vyztuženého panelu
  - včetně reprezentativních defektů (BVID, porezita, delaminace, ...)
- Souhrn hodnot použitých k dimenzování dílu a výpočtu míry bezpečnosti.
- Pokud se posuzuje pevnost dílu reprezentují konstrukční návrhové hodnoty minimální hodnoty, při kterých je dosaženo požadované míry spolehlivosti. Obvykle jsou vyjádřeny ve formě mezních napětí, poměrných deformací
- Při aeroelastických výpočtech a analýze nárazu ptáka se hodnoty modulů pružnosti uvažují jako průměrné.

Návrhové hodnoty

Redukovaný počet vzorků pro určení B-hodnot



DOT/FAA/AR-00/47, Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems

Návrhové hodnoty

Mechanické vlastnosti vytvrzené laminy – redukovaný počet vzorků

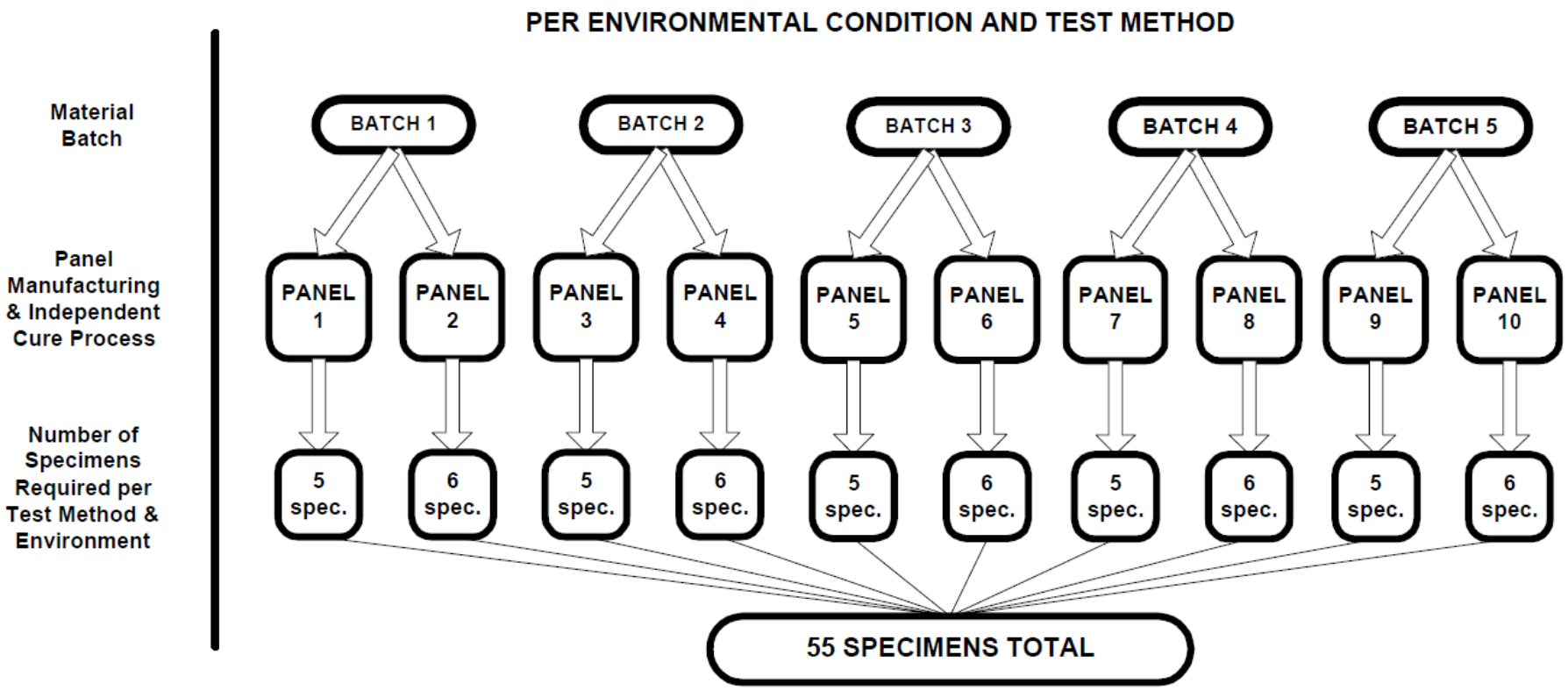
Figure No.	Test	Method Reference	No. of Specimens Per Test Condition			
			CTD[1]	RTD[2]	ETW[3]	ETD[4]
9 or 10	0° (warp) Tensile Strength	ASTM D 3039	1 x 4	3 x 4	3 x 4	1 x 4
9 or 10*	0° (warp) Tensile Modulus, Strength and Poisson's Ratio	ASTM D 3039	1 x 2	3 x 2	3 x 2	1 x 2
11	90° (fill) Tensile Strength	ASTM D 3039	1 x 4	3 x 4	3 x 4	1 x 4
11*	90° (fill) Tensile Modulus and Strength	ASTM D 3039	1 x 2	3 x 2	3 x 2	1 x 2
12	0° (warp) Compressive Strength	SACMA SRM 1	1 x 6	3 x 6	3 x 6	1 x 6
13*	0° (warp) Compressive Modulus	SACMA SRM 1	1 x 2	3 x 2	3 x 2	1 x 2
14	90° (fill) Compressive Strength	SACMA SRM 1	1 x 6	3 x 6	3 x 6	1 x 6
15*	90° (fill) Compressive Modulus	SACMA SRM 1	1 x 2	3 x 2	3 x 2	1 x 2
16	In-Plane Shear Strength	ASTM D 5379	1 x 4	3 x 4	3 x 4	1 x 4
16*	IN-PLANE SHEAR MODULUS AND STRENGTH	ASTM D 5379	1 x 2	3 x 2	3 x 2	1 x 2
17	Short-Beam Shear	ASTM D 2344	--	3 x 6	--	--

batch # x spec. #

DOT/FAA/AR-00/47, Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems

Návrhové hodnoty

Plný počet vzorků pro určení A-hodnot



DOT/FAA/AR-00/47, Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems

Návrhové hodnoty

Mechanické vlastnosti vytvrzené laminy – plný počet vzorků

batch # x spec. #

Figure No.	Test	Method Reference	No. of Specimens Per Test Condition			
			CTD[1]	RTD[2]	ETW[3]	ETD[4]
9 or 10	0° (warp) Tensile Strength	ASTM D 3039	1 x 7	5 x 7	5 x 7	1 x 7
9* OR 10*	0° (warp) Tensile Modulus, Strength and Poisson's Ratio	ASTM D 3039	1 x 4	5 x 4	5 x 4	1 x 4
11	90° (fill) Tensile Strength	ASTM D 3039	1 x 7	5 x 7	5 x 7	1 x 7
11*	90° (fill) Tensile Modulus and Strength	ASTM D 3039	1 x 4	5 x 4	5 x 4	1 x 4
12	0° (warp) Compressive Strength	SACMA SRM 1	1 x 11	5 x 11	5 x 11	1 x 11
13*	0° (warp) Compressive Modulus	SACMA SRM 1	1 x 4	5 x 4	5 x 4	1 x 4
14	90° (fill) Compressive Strength	SACMA SRM 1	1 x 11	5 x 11	5 x 11	1 x 11
15*	90° (fill) Compressive Modulus	SACMA SRM 1	1 x 4	5 x 4	5 x 4	1 x 4
16	In-Plane Shear Strength	ASTM D 5379	1 x 7	5 x 7	5 x 7	1 x 7
16*	In-Plane Shear Modulus and Strength	ASTM D 5379	1 x 4	5 x 4	5 x 4	1 x 4
17	Short-Beam Shear	ASTM D 2344	--	5 x 11	--	--

DOT/FAA/AR-00/47, Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems

Návrhové hodnoty

Fyzikální vlastnosti vytvrzené laminy

Physical Property	Test Procedure	No. of Replicates per Batch
Fiber Volume	ASTM D 3171[1] or D 2584[2]	See note 3
Resin Content	ASTM D 3171[1] or D 2584[2]	See note 3
Void Content	ASTM D 2734[4]	See note 3
Cured Neat Resin Density	ASTM D 792	See note 5
Glass Transition Temperature (dry[6])	SACMA RM 18	3
Glass Transition Temperature (wet[7])	SACMA RM 18	3

3. Minimálně jeden vzorek z každého panelu zkušebních těles

DOT/FAA/AR-00/47, Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems