

# Typy spojů kompozitových materiálů v konstrukcích

Josef Křena Latecoere Czech Republic

21.11.2019

Přehled metod spojování kompozitních materiálů

# Proč je správná volba typu spojení kompozitů důležitá

- Náklady na montáž kompozitové sestavy jsou přibližně 50% ceny sestavy
- Spojování kompozitů má více úskalí než je tomu u izotropních materiálů
- Neexistuje jednoduchá volba optimálního typu spoje

# Požadované vlastnosti spoje

- Přenést požadované zatížení
- Odolnost vlivům prostředí
- Nezvyšovat hmotnost sestavy
- Nevytvářet koncentrace napětí
- Zajistit elektrickou vodivost a těsnost
- Možnost demontáže a opravy
- Spolehlivá metoda kontroly

# Základní rozdělení

## **Mechanické spojovací prvky**

Přenos zatížení v diskrétních bodech

## **Kombinované spoje**

Přenos zatížení v ploše i v diskrétních bodech

## **Plošné spoje**

Přenos zatížení v ploše

Obvykle je spoj namáhán kombinací tahového a smykového zatížení

# Mechanické spojovací prvky

## VÝHODY

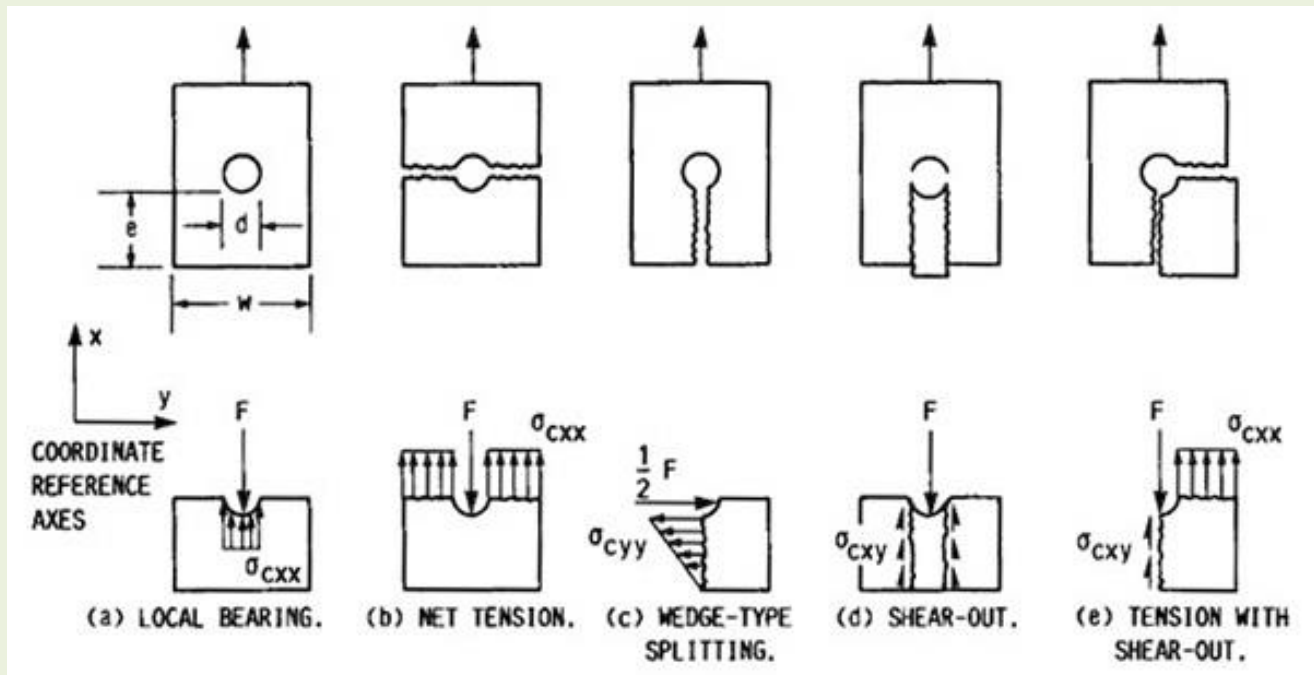
Zajištěná pevnost v tahu i smyku  
Více parametrů pro návrh spoje  
Snadná kontrola  
Možnost demontáže  
Rychlost provedení  
Nevyžadují přípravu povrchu a čistou místnost

## NEVÝHODY

Lokální zatížení okolí dříku  
Riziko elektrochemické koroze  
Díra narušuje strukturu kompozitového dílu  
Zvyšuje se hmotnost sestavy

# Mechanické spojovací prvky

Pevnost spoje - pevnost spojovacího prvku  
- pevnost kompozitu v okolí



# Mechanické spojovací prvky

Pevnost spoje - pevnost spojovacího prvku  
- pevnost kompozitu v okolí

Výřez z normy EN6115

## 3.4 Mechanical characteristics

Table 2: Mechanical characteristics

Dia. code No.	Min. double shear strength (N)			Min. tensile strength (N)			Max. fatigue load (N)		
	Steel alloy	Titanium	Inconel	Steel alloy	Titanium	Inconel	Steel alloy	Titanium	Inconel
2	-	17 760	-	-	9 660	-	-	3 170	-
3	27 250	23 900	31 500	17 100	14 150	20 820	5 330	4 670	6 490
3A	-	32 000	41 600	-	17 800	25 060	-	6 050	8 770
4	47 150	41 330	54 800	29 150	25 900	35 490	9 780	8 670	11 900
5	73 850	64 880	85 100	46 050	40 900	56 070	15 560	13 960	18 940

# Mechanické spojovací prvky

## Typy mechanických spojovacích prvků

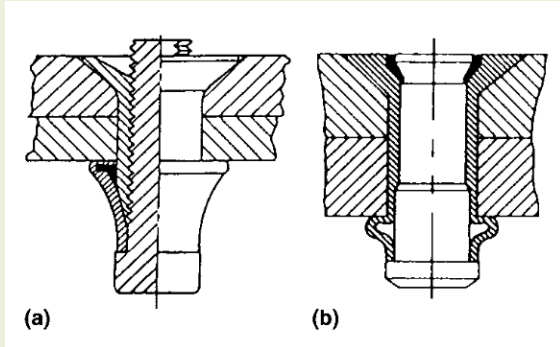
- Šrouby
- Nýty
- Speciální prvky

### Důležité parametry

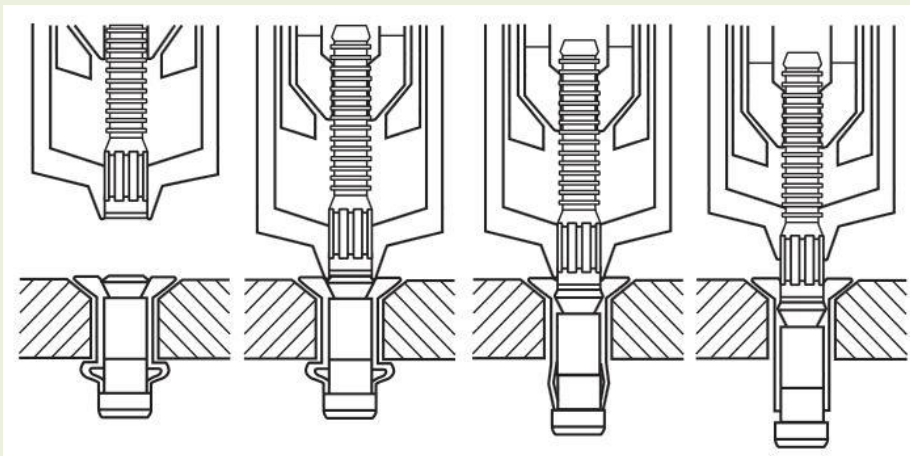
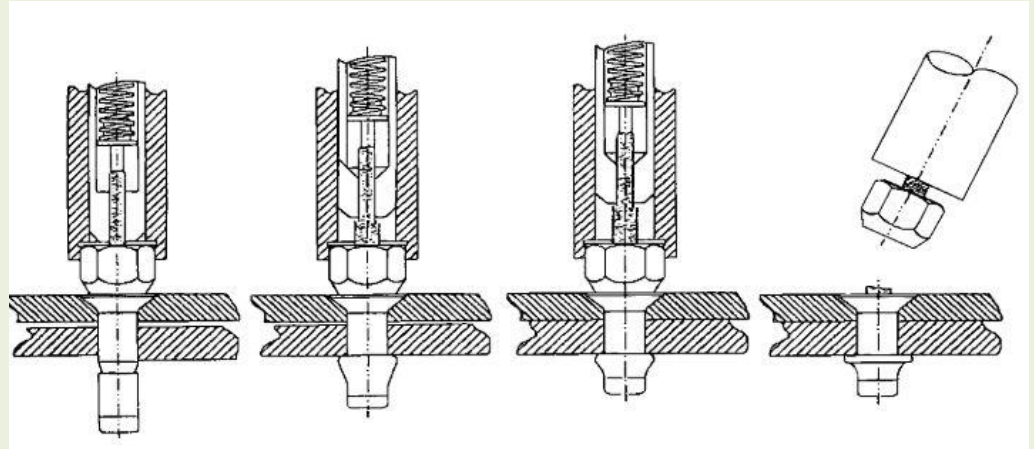
- Zajištěná síla sevření
- Rozdělení zatížení mezi hlavu a dřík
- Utěsnění otvoru proti pronikání vlhkosti



# Typy nýtů

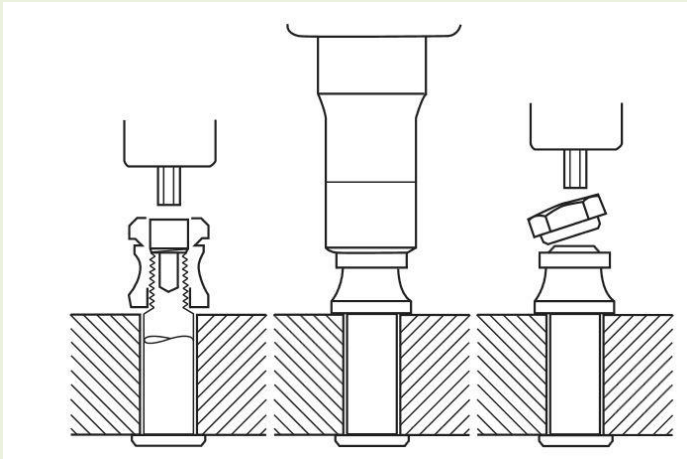


- a) typ se závitovým dříkem
- b) typ s hladkým dříkem



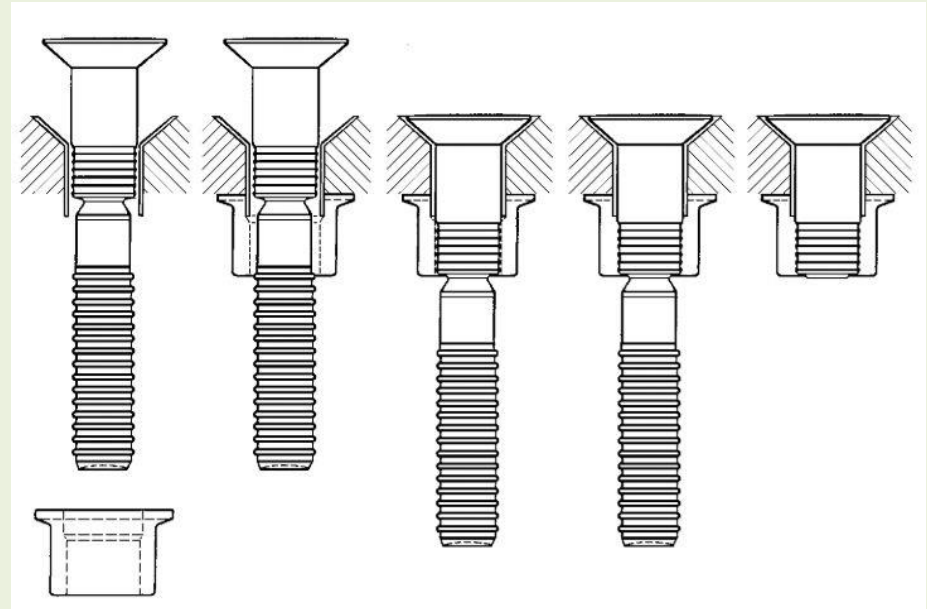
**Blind fastener**

# Typy šroubů



## Hi-Lock

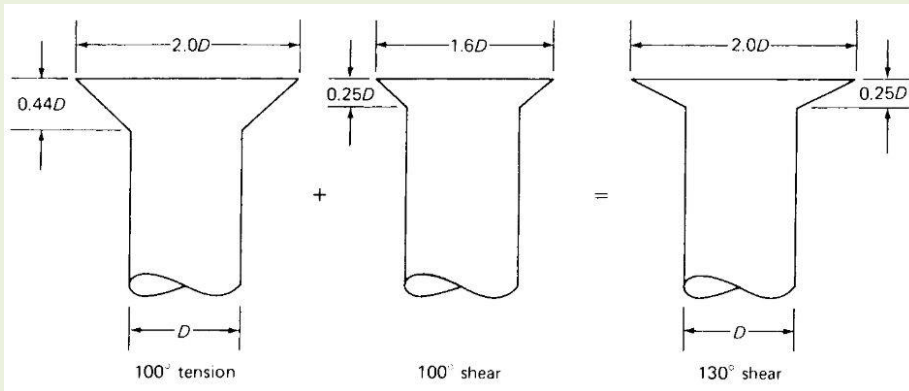
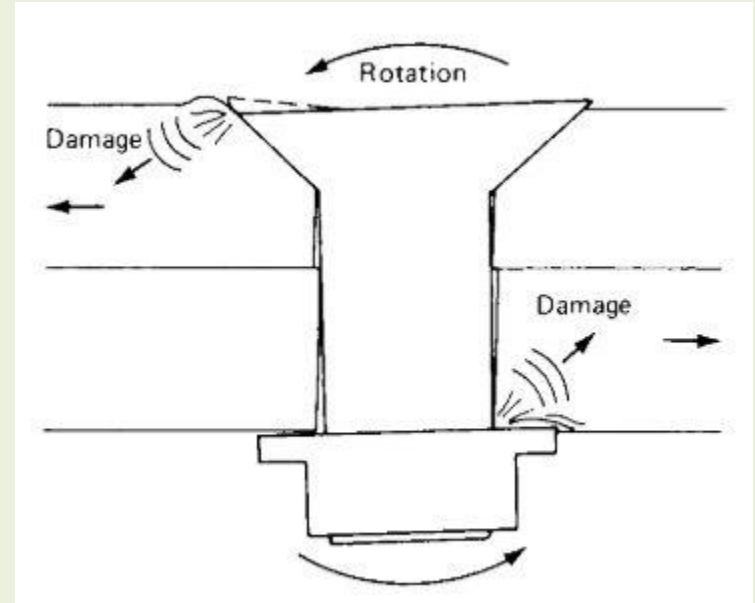
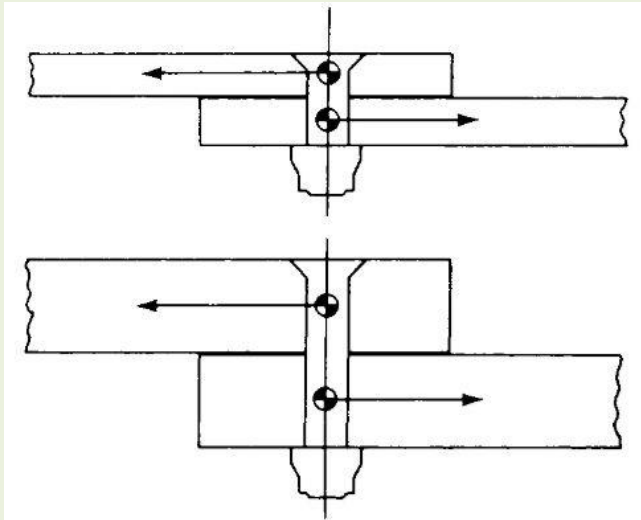
Utahovací moment  
je zajištěn pevností matice v krutu



## Lock-bolt

Svěrná síla  
je zajištěna pevností v tahu  
dříku v místě zápichu

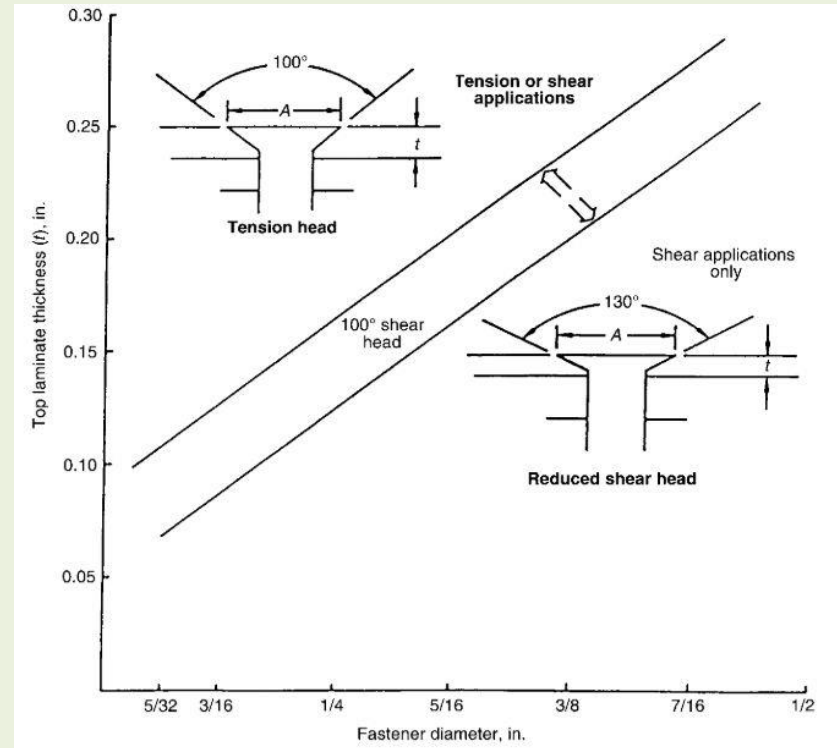
# Zatížení na rozhraní šroub - kompozit



Tvar hlavy podle typu zatížení

# Volba tvaru hlavy

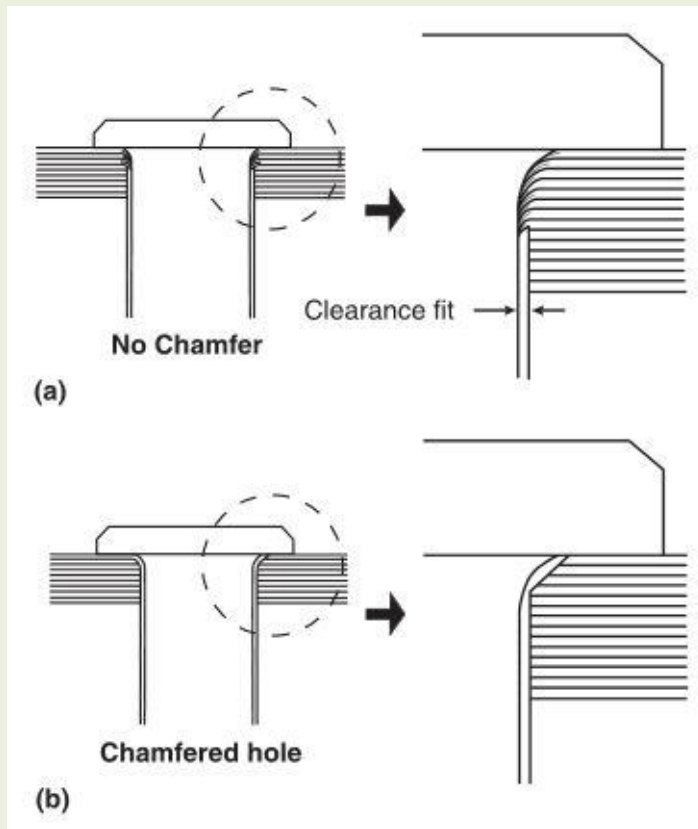
Material	Head Style	Thread Type	Tensile Strength (Ksi)	Shear Strength (Ksi)
7075-T6 Aluminum	Protruding Shear	UNJ		
7075-T6 Aluminum	100° MS20426 flush Shear	UNJ		
INCONEL® 718	100° flush crown Shear	UNJ	210	125
7075-T6 Aluminum	100° MS24694 flush Tension	UNJ		
6AL-4V Titanium	100° flush crown Shear	UNJ	160	95
6AL-4V Titanium	Protruding Shear	UNJ	160	95
6AL-4V Titanium	100° flush Shear	UNJ	160	95
Alloy Steel	Protruding Shear	UNJ	180	108
Alloy Steel	100° flush crown Shear	UNJ	180	108
INCONEL® 718	Protruding Tension	UNJ	210	125
6AL-4V Titanium	130° flush Shear	UNJ	160	95
6AL-4V Titanium	Protruding Shear	UNJ	160	95
Alloy Steel	130° flush crown Shear	UNJ	160	95



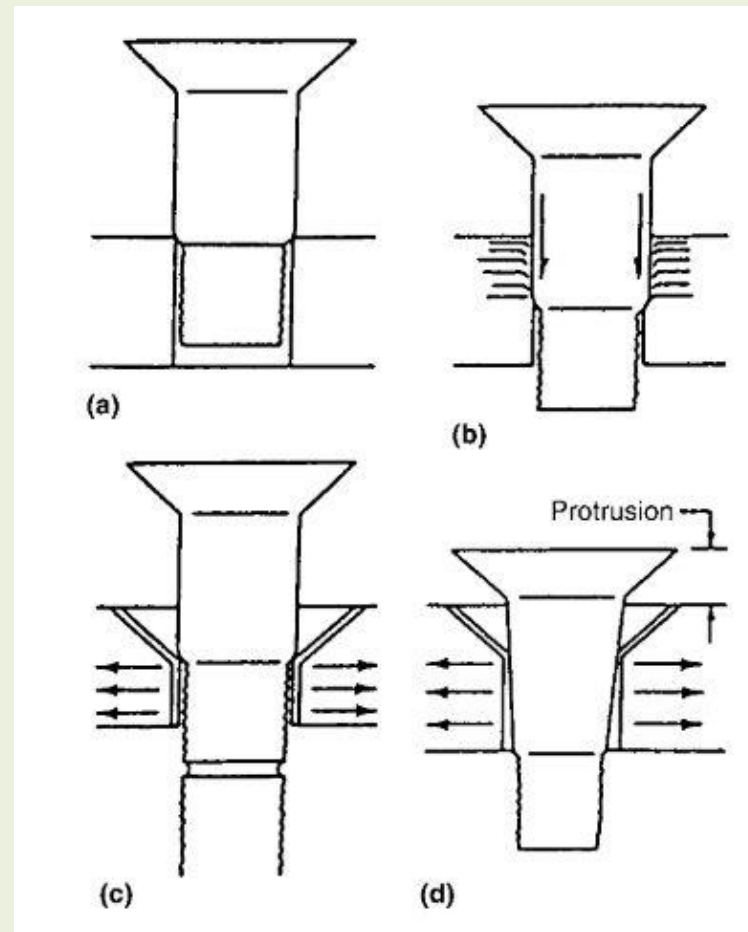
Svěrná síla zvedá únosnost.

Musí se rozložit na dostatečnou plochu vhodnou hlavou. Zamezit posunům v kontaktní rovině. Zejména v případě volné díry. Pro kompozity především nulová díra popřípadě přesah v rámci součtu tolerancí, aby nedocházelo k mikroposunům v sestavě. Kritické je obvykle napětí v otláčení.

# Usazení dříku

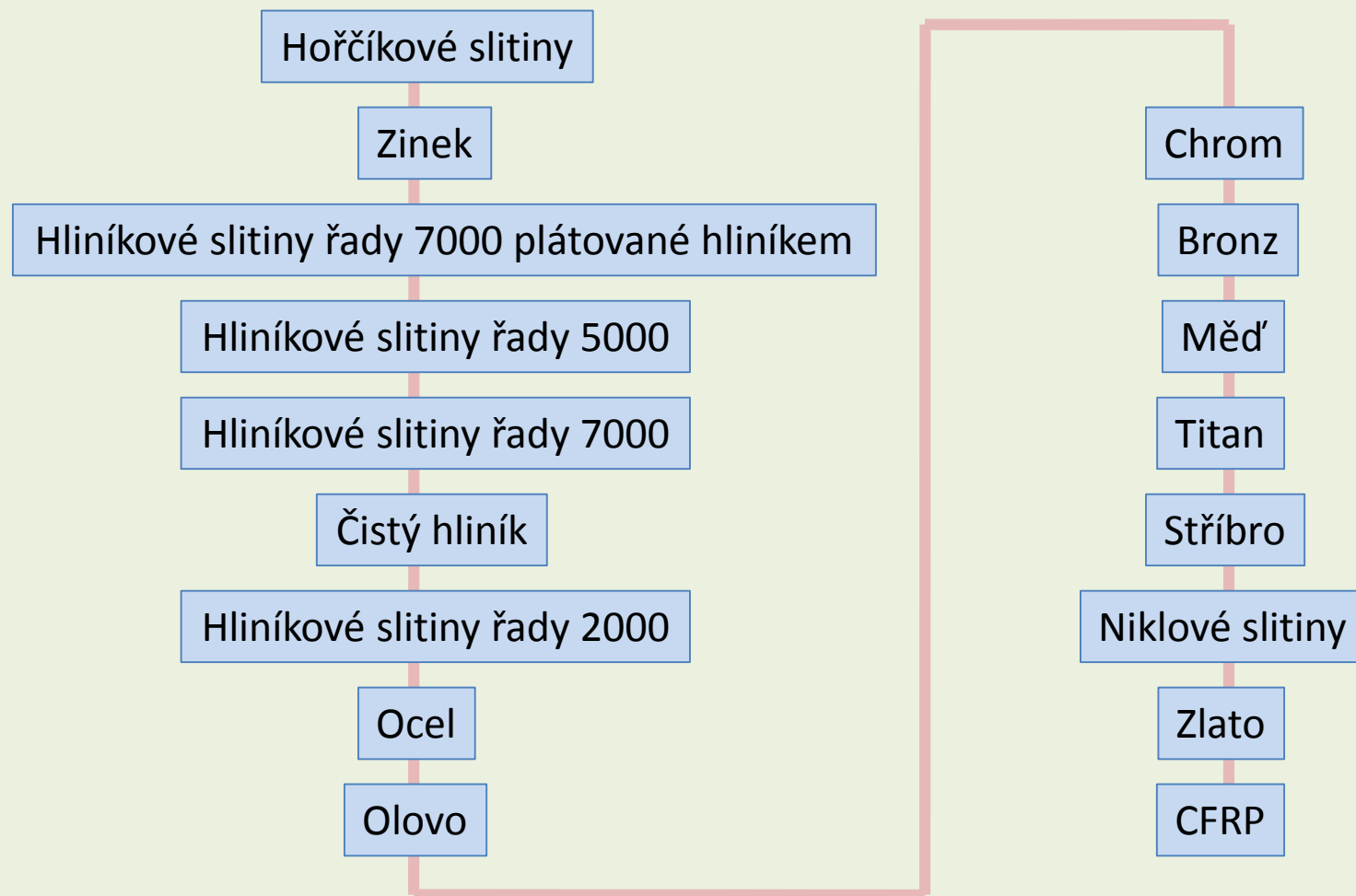


Sražení hrany otvoru



Montáž šroubu s přesahem

# Elektrochemická kompatibilita



# Kompatibilita teplotní roztažnosti

Materiál	CTE [ $10^{-6}$ K] v podélném směru	CTE [ $10^{-6}$ K] v příčném směru	E modul [GPa]
Uhlík/epoxi (0°)	0,43	29,2	140
Uhlík/epoxi (0/±45/90)	3,4	3,4	65
E sklo/epoxi (0°)	8,6	22,1	38,6
E sklo/epoxi (tkanina style 181)	9,9	12,1	20
Aramid/epoxi (0°)	-5,4	79,0	76
Aramid/epoxi (tkanina style 181)	-1,8	1,8	40
Hliníková slitina	23,4	23,4	70
Ocel	10,8	10,8	210
Titan	10,1	10,1	110
Nerezová ocel	18	18	210

# Kombinované spoje

Kombinace lepení a mechanických spojovacích prvků

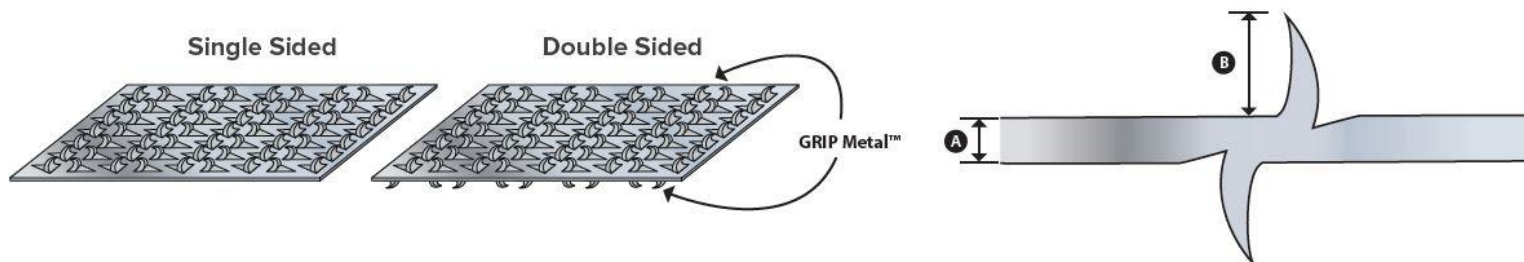
- Může zlepšit pevnost spoje a rozložení napětí ve spoji
- Může usnadnit montáž spojovacích prvků
- Může zvýšit spolehlivost spoje
- Lepidlo vymezí případné vůle v sestavě



# Kombinované spoje

**GRIP  
METAL**  
A METAL SURFACE MODIFICATION  
TECHNOLOGY

## TECHNICAL DATA SHEET



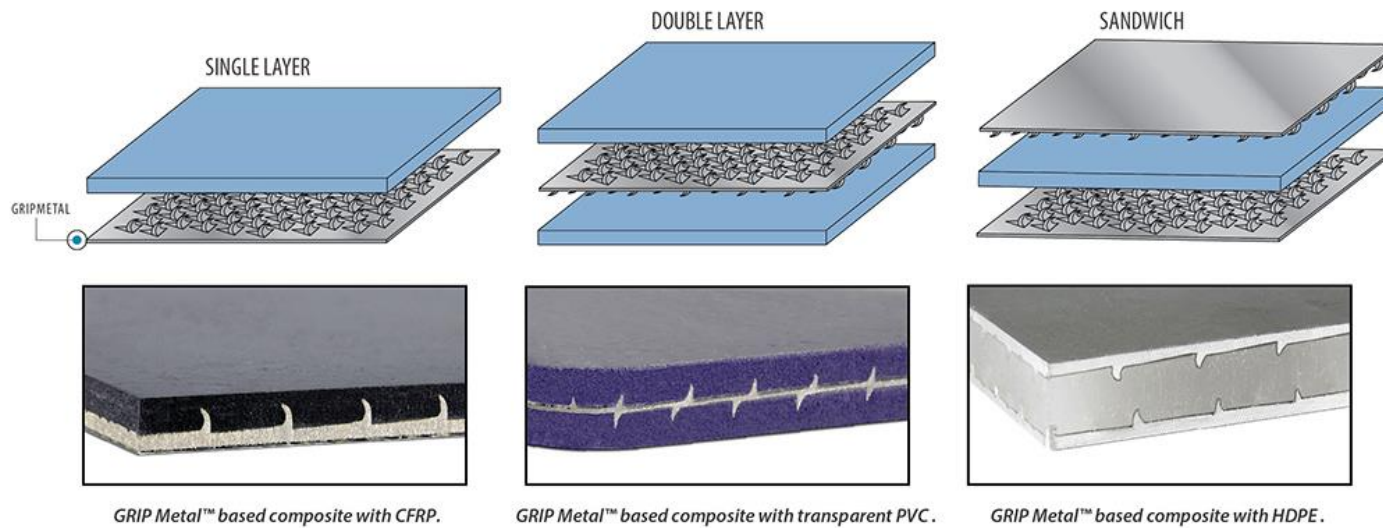
STANDARD	<sup>A</sup> MATERIAL MINIMUM THICKNESS (mm)	DENSITY (hooks /m <sup>2</sup> )	<sup>B</sup> HOOK HEIGHT (mm)	MATERIAL WIDTH (mm)
Single - sided	0.38mm	70,000	1.52mm	UP TO 483
Double - sided	0.50mm	66,000 PER SIDE	1.52mm	UP TO 483

**Dimensional Tolerance:  $\pm 0.12\text{mm}$  ( $\pm 0.005''$ )**

**Maximum Material Hardness: Rockwell 95 HRB (18 HRC)**

**Available in mini and specialty hook sizes**

# Kombinované spoje



# Kombinované spoje

## Ohřev dřívku

- infrared
- indukci

a vytvoření hlavy lisovacím nástrojem

### CFRTP Rivet Fastening Method

- Materials** Unidirectional CF/PA6 rod (UD-CF/PA6)

**Appearance**

**CT scan images**

The materials used for the rivet is unidirectional carbon fiber reinforced polyamide 6 rod. This rod has unidirectional reinforcing fiber with a fiber content of Vf=259 vol.% and a diameter of D=6 mm. Large number of voids inside the UD-CF/PA6 rod can be observed.

- Rivet fastening machine**

**Heating device**

**Process monitoring panel**

**3t servo press unit manufactured by DDK**

**Rivet fastening mold**

**Features**

- Rapid heating :30s~
- Sampling time :1ms
- Position accuracy :±0.01mm
- Can be molded with any temperature recipe
- Possible to join dissimilar materials
- Ex) CFRTP – Metal / CFRP / Plastics

This CFRTP rivet fastening machine consists of the servo press unit (Da-ichi Dentsu Ltd., DSP-3000) for press forming of CFRTP rivet head, the high frequency induction heating device (YS DENSHI Ltd., H052M frequency f=2MHz) or infrared heating device (Heraeus, DMCR250 (2-G, 250W/115V)) for heating of CFRTP, and the infrared thermography system (FLIR, A65Sc) for temperature monitoring.

- Rivet fastening process**

**(a) Heating**

**(b) Pressing**

**(c) Demolding**

Firstly, a heating device moves horizontally to the heating position. After the slide reaches the heating position the heat operation starts. Immediately, rivet heated to the specific temperature, heating device slide to return to the origin position. The CFRTP rod was heated to temperature less than the thermal degradation temperature of PA6 polymer. Secondly, rivet head shape is molded by mold attached to the servo press unit. Then, the load and moving distance of press mold are controlled appropriately by servo press.

### Result of CFRTP Rivet Fastening

- CFRTP rivet fastening behavior**

This graph shows the effects of processing time on fastening load and moving distance of upper mold. When the processing time was t=0~0.3 s, the fastening load showed P=0 kN because the upper mold and UD-CF/PA6 rivet head were not contacted. When the processing time was about t=0.8 s, the upper mold and the end of UD-CF/PA6 rod contacted. Subsequently, the fastening load increased linearly pre to P=30 kN of the set load. The rivet fastening process was completed at about t=3s.

	t=0 s	t=1 s	t=3 s
Induction heating			
Near infrared heating			

- Temperature profiles of CFRTP rivet**

**Induction heating**

**Infrared heating**

These graph shows the temperature profiles of UD-CF/PA6 rivet heated by varied heating device. In the case of using the high frequency induction heating, the heating temperature did not increase higher at over t=30 s. It was also found that the temperature difference occurred remarkably due to the shape size of the induction heating coil. In the case of using near infrared heating, the temperature was higher at the end of rivet close to the infrared heater.

- CT scan images**
- Joining strength**

**Induction heating**

**Infrared heating**

Joining Method	Tensile shear strength, $\tau$ [MPa]
Epoxy adhesive bonding	~10
A5052 rivet fastening	~75
UD-CF/PA6 rivet fastening	~220

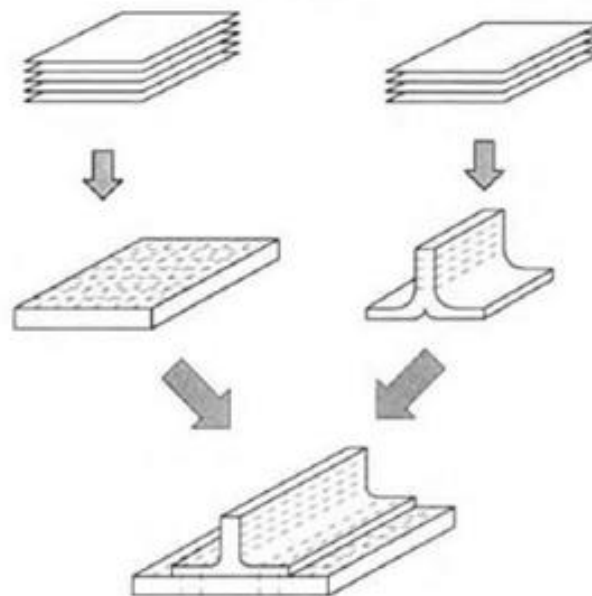
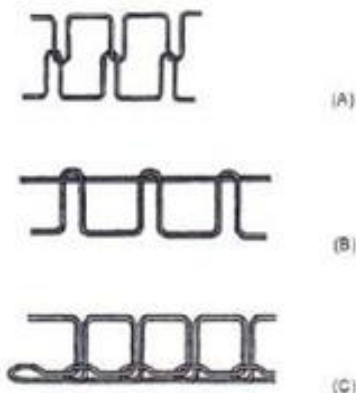
These figures show the CT images. In the case of using induction heating, a large number of voids were identified inside the rivet. In the case of using infrared heating, it was found that there were few voids inside the rivet. This graph shows comparison of single lap tensile shear strength joined by epoxy adhesive bonding, A5052 and CF/PA6 rivet fastening. In case of UD-CF/PA6 rivet specimen, the strength was increased significantly compared to other specimens because unidirectional carbon fiber was located continuously within the matrix resin. From these experimental results, it was obvious that the joining strength of CF/PA6 rivet is higher than that of the other joint methods. The high availability of CF/PA6 rivet as mechanical fastener was shown from these results.

# Kombinované spoje

Prošití vrstev pramencem výztuže

Použitelné při procesu VARTM, RTM, apod.

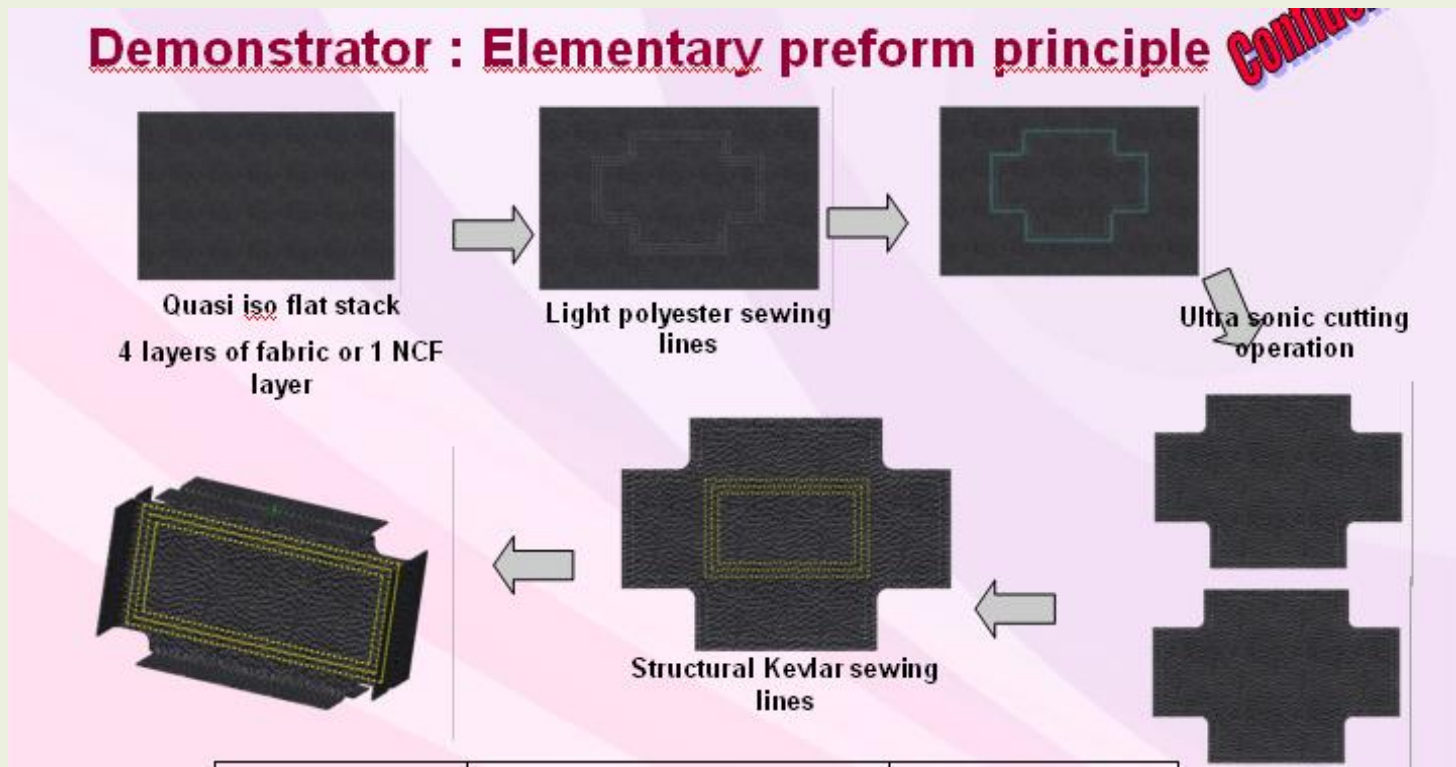
- Lock stitch
- Modified Lock stitch
- Chain stitch



Ref: Master Thesis "MIXED MODE FRACTURE TOUGHNESS OF STITCHED LAMINATED COMPOSITES" By T.Rys, Department of Aerospace Engineering, University of Florida 2004.

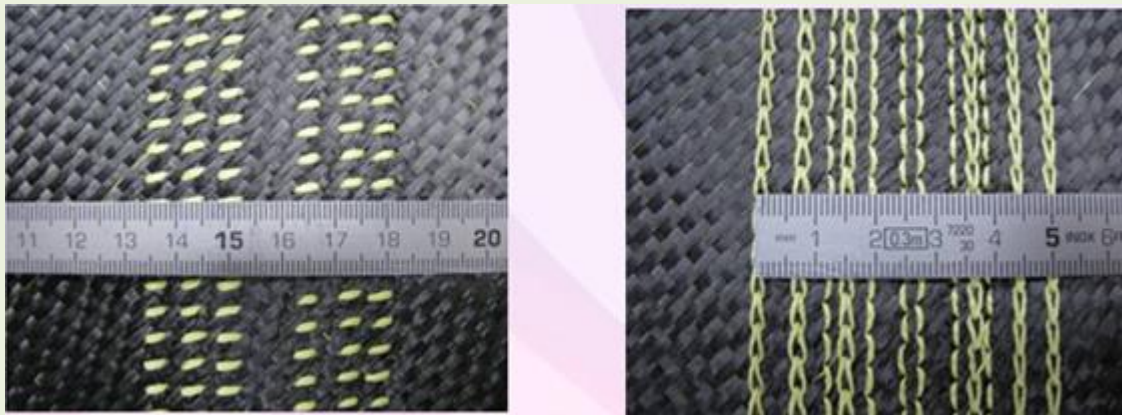
# Příklad použití prošití

Vývoj technologie PAX dveří procesem RTM v jedné operaci



# Příklad použití prošití

Vývoj technologie PAX dveří procesem RTM v jedné operaci



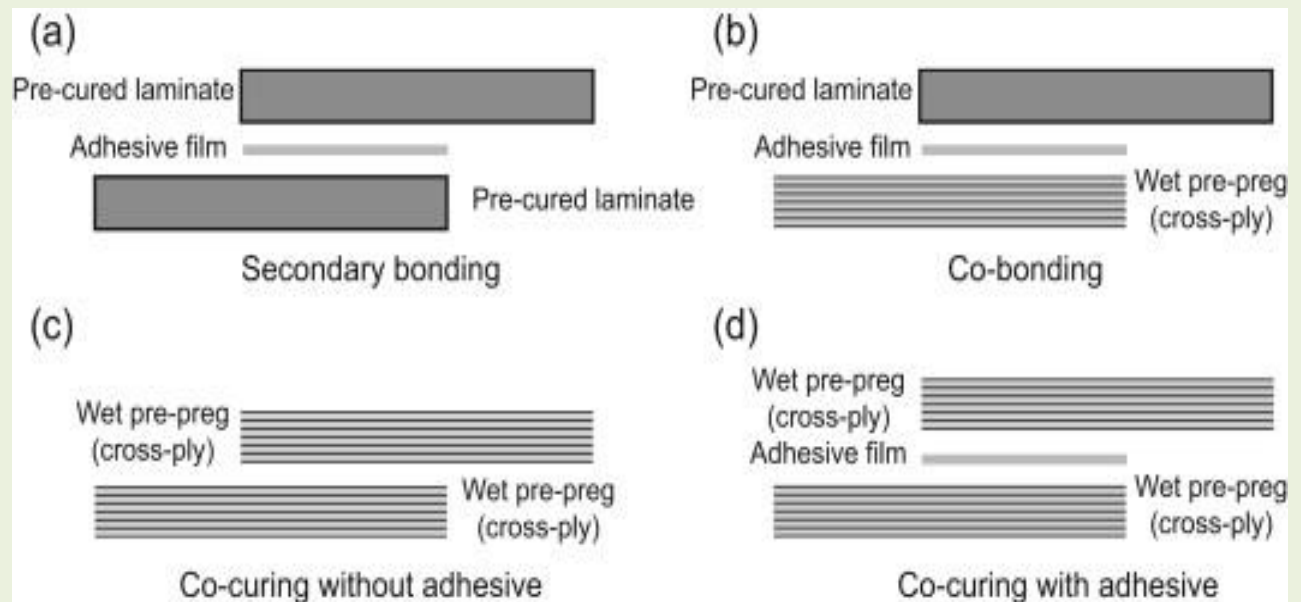
# Příklad použití prošití

Vývoj technologie PAX dveří procesem RTM v jedné operaci



# Plošné spoje

**LEPENÍ (SEKUNDÁRNÍ LEPENÍ)**  
**CO – BONDING**  
**CO – CURING**  
**CO – CONSOLIDATION**  
**SVAŘOVÁNÍ (FÚZNÍ SPOJOVÁNÍ)**  
**OVERMOLDING**



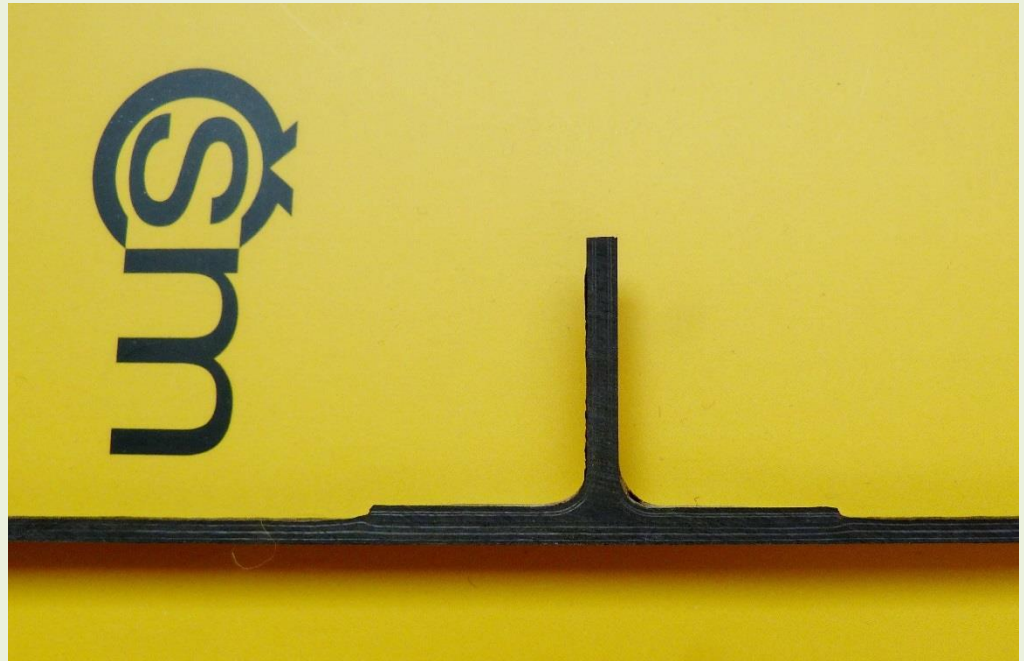


# Co-Bonding

Spojení vytvrzeného a nevytvrzeného dílu s vloženým foliovým lepidlem

## Výhody oproti sekundárnímu lepení

- Povrchová úprava se provádí jen na jednom dílu
- Je zaručena správná tloušťka lepené spáry



# Co-Curing

Spojení alespoň dvou nevytvrzených dílů bez nebo s vloženým foliovým lepidlem

Výhody oproti sekundárnímu lepení a co-bondingu

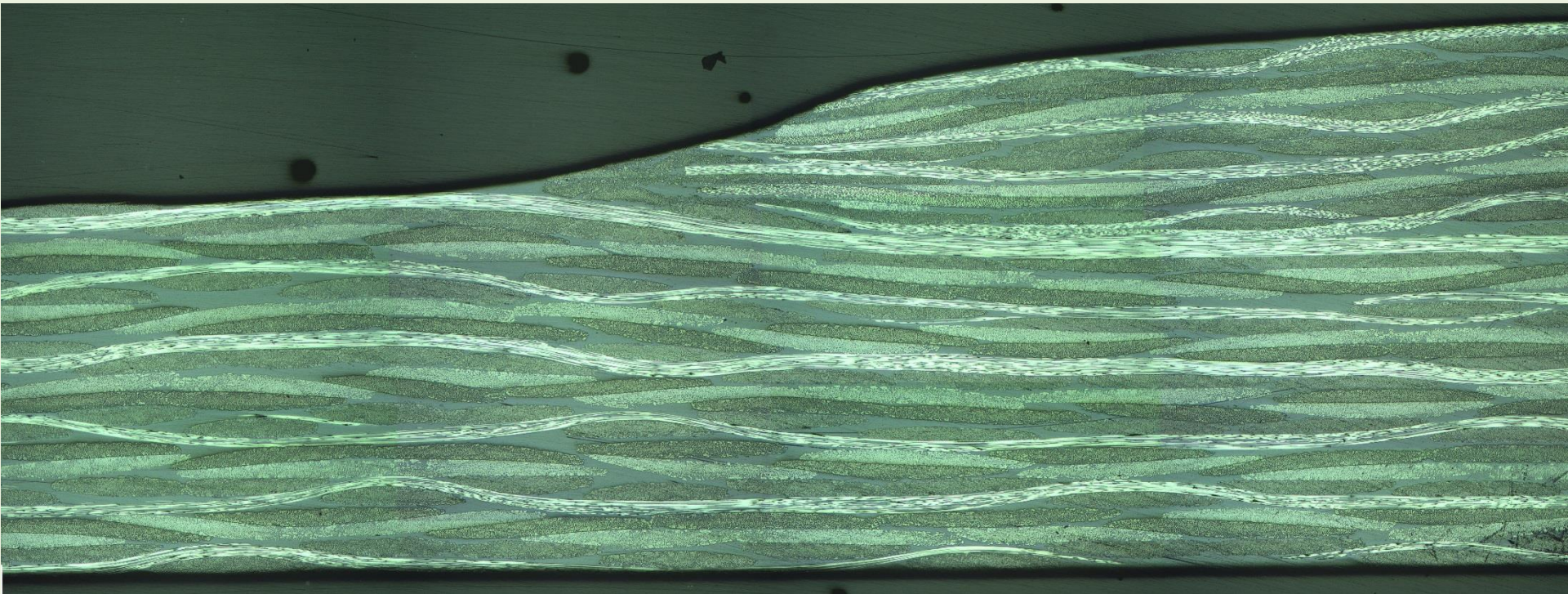
- Povrchová úprava se neprovádí
- Je zaručena správná tloušťka lepené spáry
- Struktura je homogenní bez rozhraní

Nevýhody

- Složitý přípravek

# Co-Consolidation

Spojení dvou dílů z vyztuženého termoplastu  
bez nebo s vloženou folií termoplastu

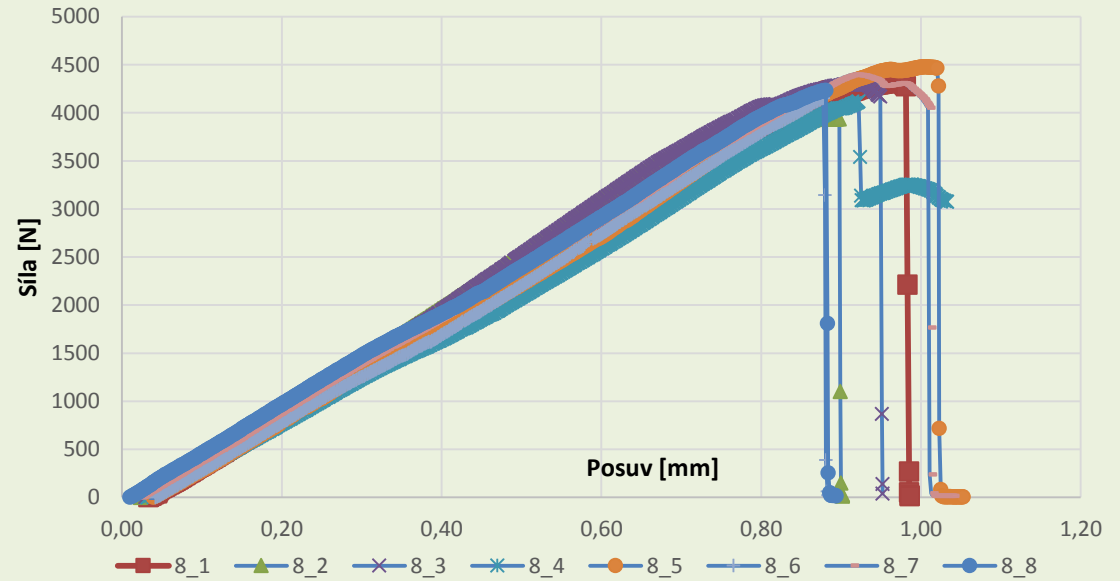


# Co-Consolidation



# Co-Consolidation

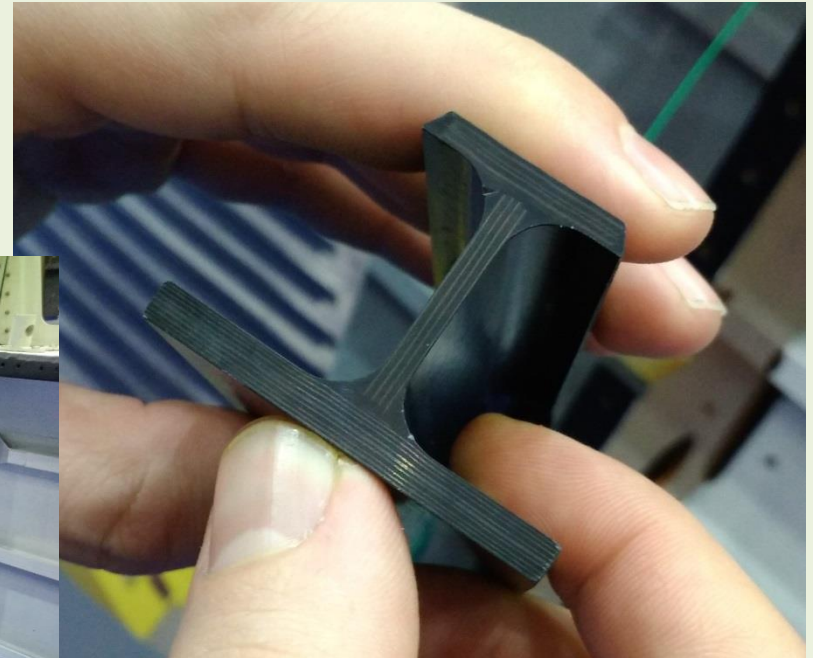
Pevnost spoje  
ve smyku



	Průměrná interlaminární smyková pevnost [MPa]	Sm. odchylka [MPa]
Co-Forming 1	22,63	0,86
Co-Forming 2	20,17	0,66
Základní deska	19,01	1,49

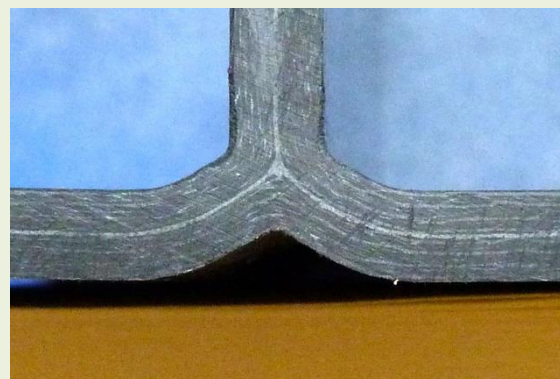
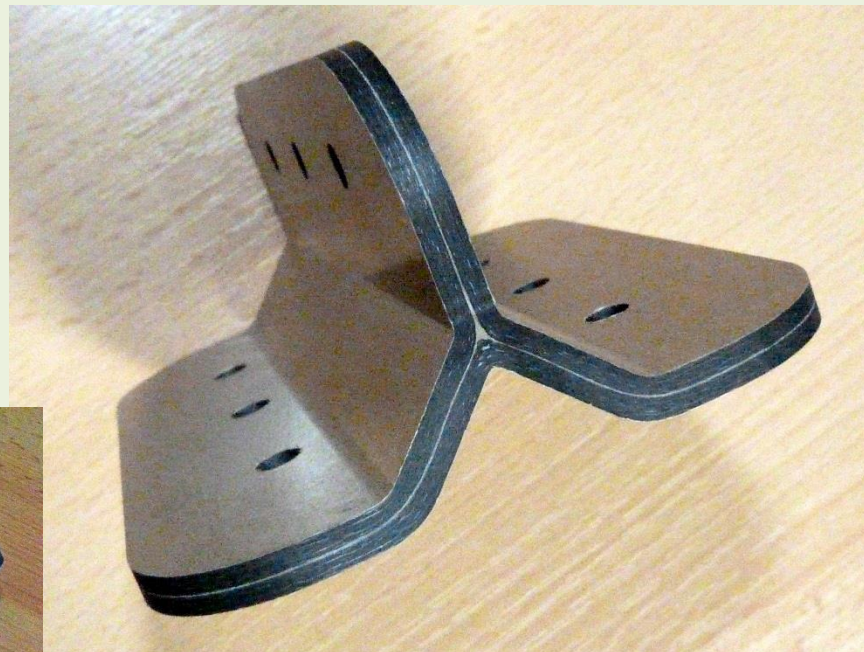
# Coforming Fokker

Projekt TAPAS



# Coforming T-profil

T-profil v jedné operaci  
Projekt TRIO



# Svařování

## **Fúzní spojování**

Dva díly z vyztuženého termoplastu jsou ohřáté v kontaktní ploše a ve stlačeném stavu je sestava ochlazená pod bod tání matrice. V kontaktní ploše může být vložena folie z termoplastu shodného s matricí.

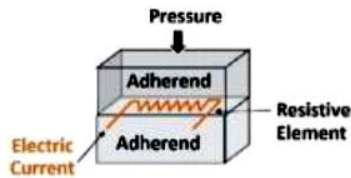
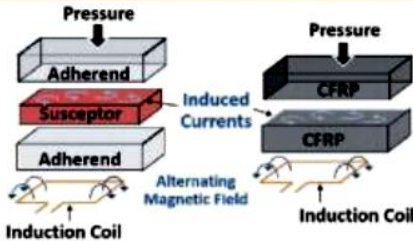
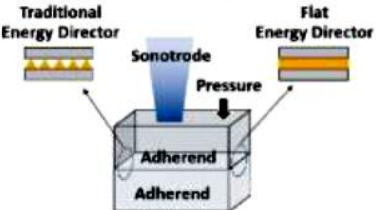
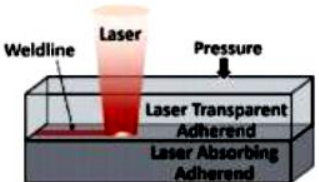
Vznikne homogenní spoj bez rozhraní.

Na povrchovou úpravu nejsou zvláštní nároky.

Menší nároky na přesnost dílů v sestavě ve srovnání s lepením.

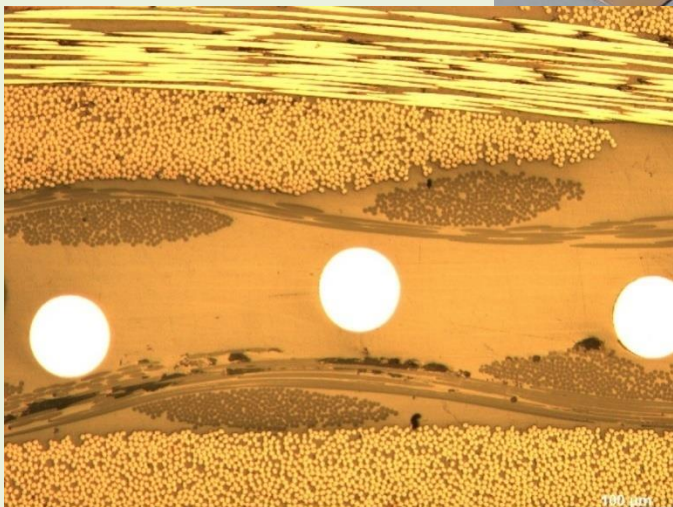


# Metody svařování

	Resistance Welding	Induction Welding	Ultrasonic Welding	Laser Welding
	 <p>Electric current passes through resistive element causes heat and melting</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Electromagnetic coil produces alternating electromagnetic fields which induce eddy currents in conductive (carbon fiber) laminate</li> <li>Eddy currents produce heat which melts the thermoplastic</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Sonotrode coupled to a transducer produces high frequency (20-40 kHz) vibration that causes frictional heat and melting at interface</li> <li>Energy director is required at interface</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Laser radiation passes through a laser transparent part (e.g., unreinforced PEEK bracket) and generates heat in a laser absorbing part which contains carbon fiber or conductive additive</li> </ul>
Pros	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heat generated only at weld interface</li> <li>Good for long welds — process time is independent of weld length</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Susceptor only required with non-conductive fiber composites (e.g., glass, aramid)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Good for spot welds</li> <li>Very fast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High speeds possible (400 mm/s)</li> </ul>
Cons	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requires a resistive element (metal or carbon fiber) which stays in the weld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Harder to focus heat at weldline</li> <li>Well-suited for carbon fabric but more challenging with unidirectional and noncrimp fabric laminates</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Continuous welding still in development</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weld seam affected by type and layout of reinforcements</li> </ul>
Thickness	No limit	< 5mm per side		Demonstrated 2.4mm
Speed	≈1 m/min DLR ZLP Augsburg	0.5 m/min KVE	4-6 m/min	24 m/min
Applications	<p>CF fabric/PPS main landing gear door for Fokker 50 turboprop aircraft GKN Fokker</p> <p>GF fabric/PPS fixed leading edge Airbus A340/A350 and A380 aircraft GKN Fokker</p> <p>CF fabric/PPS 8-section rear pressure bulkhead for Airbus A320 demonstration DLR ZLP Augsburg</p>	<p>CF fabric/PPS rudder Gulfstream G650 GKN Fokker</p> <p>CF fabric/PPS elevator Dassault Falcon 5X GKN Fokker</p> <p>CF/PEKK UD tape stringers to skin for STELIA "Arches TP" demonstration fuselage Composite Integrity</p>	<p>Injection molded CF fabric/PEI parts to CF/PEI floors for G650 GKN Fokker</p> <p>Clean Sky EcoDesign demonstrator CF/CF/PEEK hinge and CF/PEKK clips to CF/PEEK C-frames TU Delft</p> <p>CF/PPS and CF/PEKK up to 1m, robot based in progress DLR ZLP Augsburg</p>	<p>LaWocs demonstrators:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>UD glass/ PEEK L bracket to CF fabric/PEEK laminate</li> <li>Unreinforced PA 6,6 aerospace attachment pin to CF/PA 6,6 baseplate</li> <li>Glass/PEI, PPS hat-stringer stiffeners to glass/PEI, PPS skins. Element Materials, KVE, LZH, TenCate, Unitech Aerospace, et. al.</li> </ul>

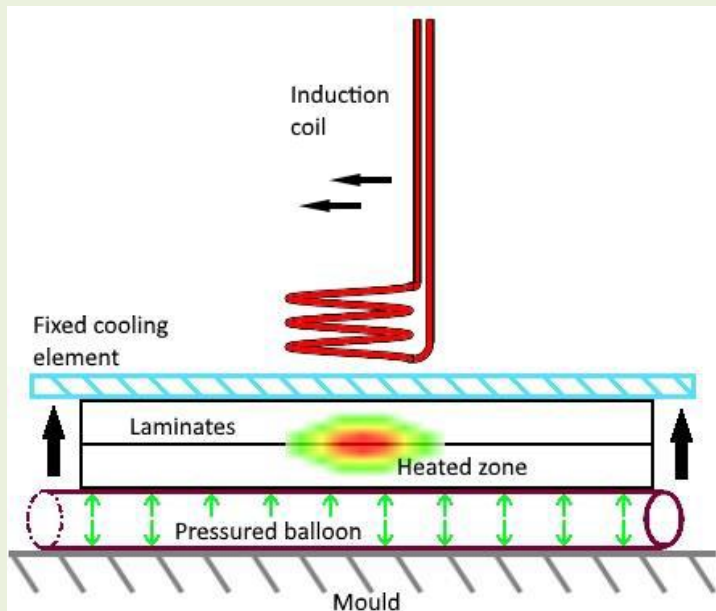
# Svařování

## Odporové svařování

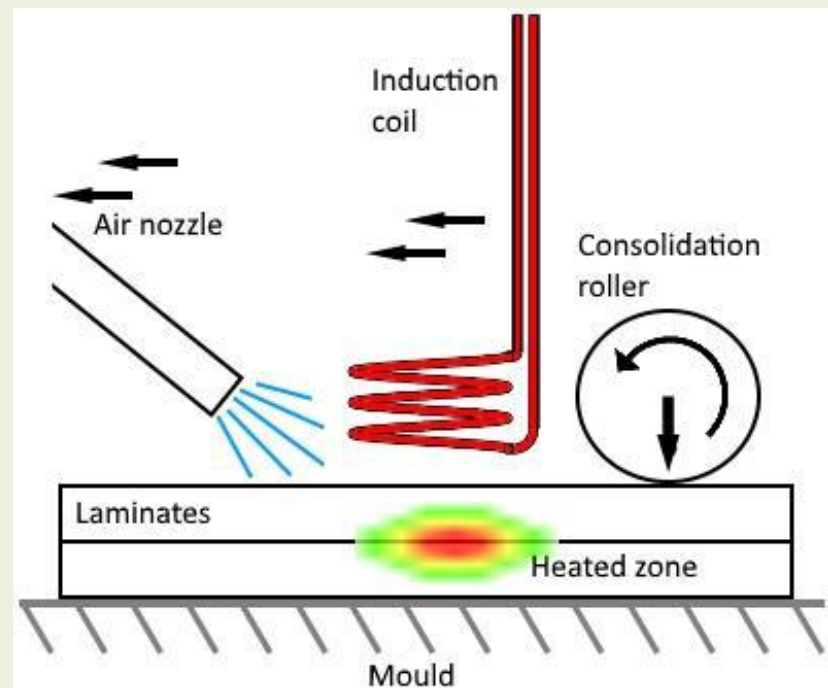


# Svařování

## Indukční svařování



Statické



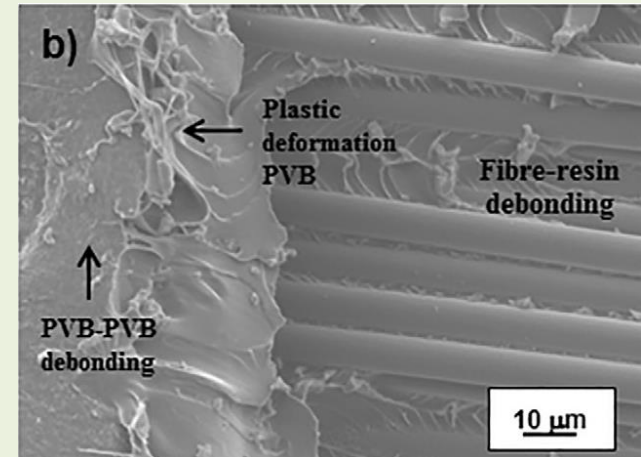
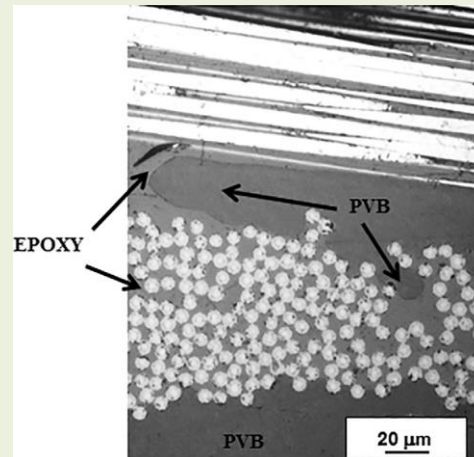
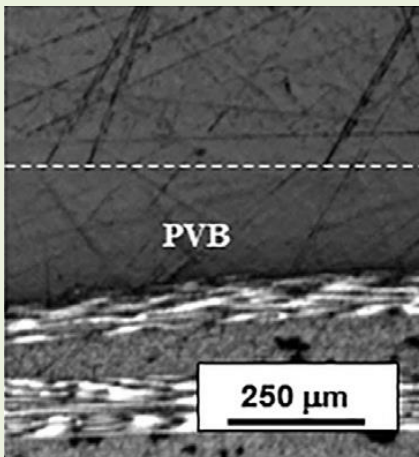
Dynamické

# Svařování termosetů

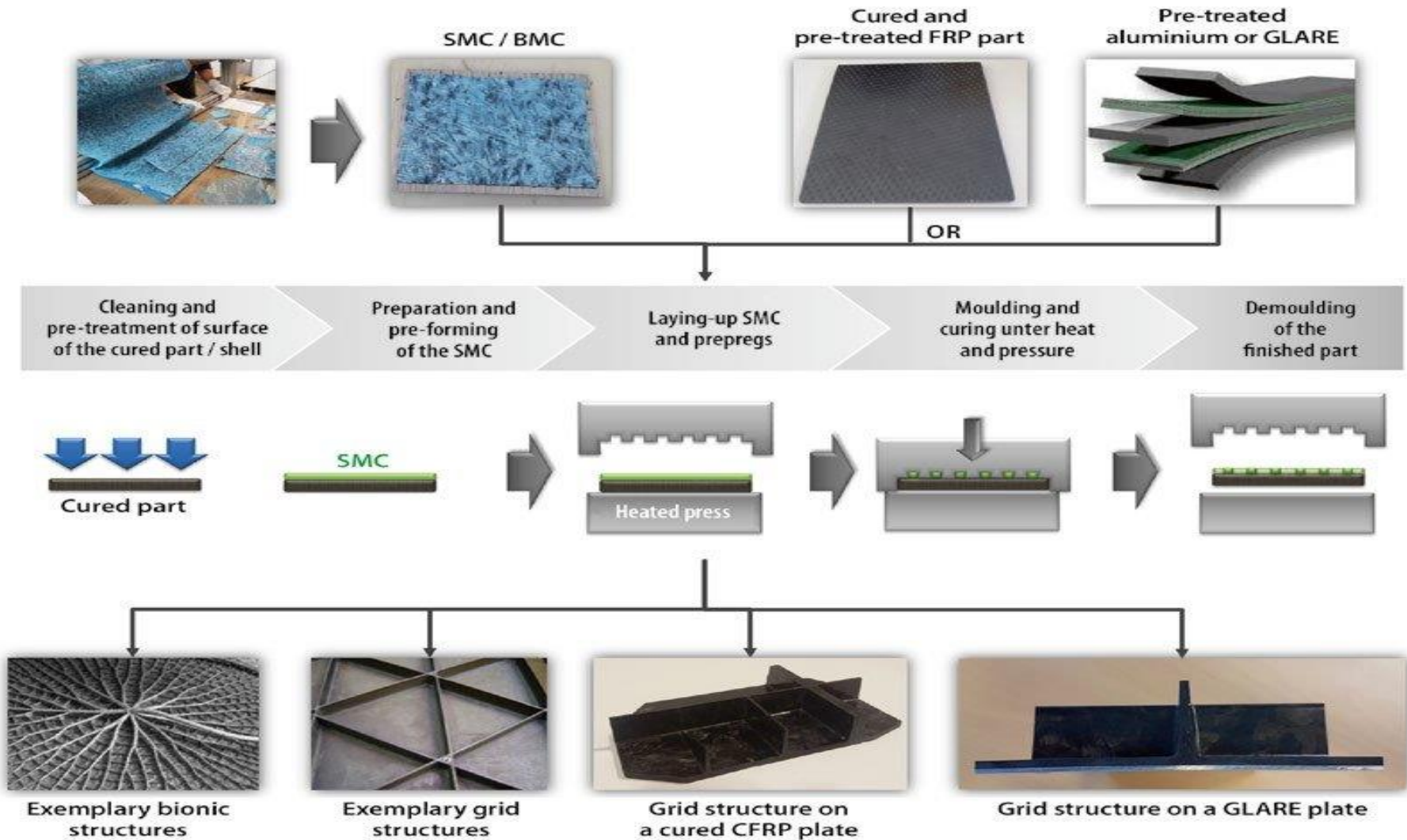
Vrstva termoplastu na povrchu termosetového kompozitu

- Termoplast s vhodnou teplotou tavení
- Spojení během vytvrzovacího cyklu termosetu (co-curing)
- Svaření vhodnou metodou

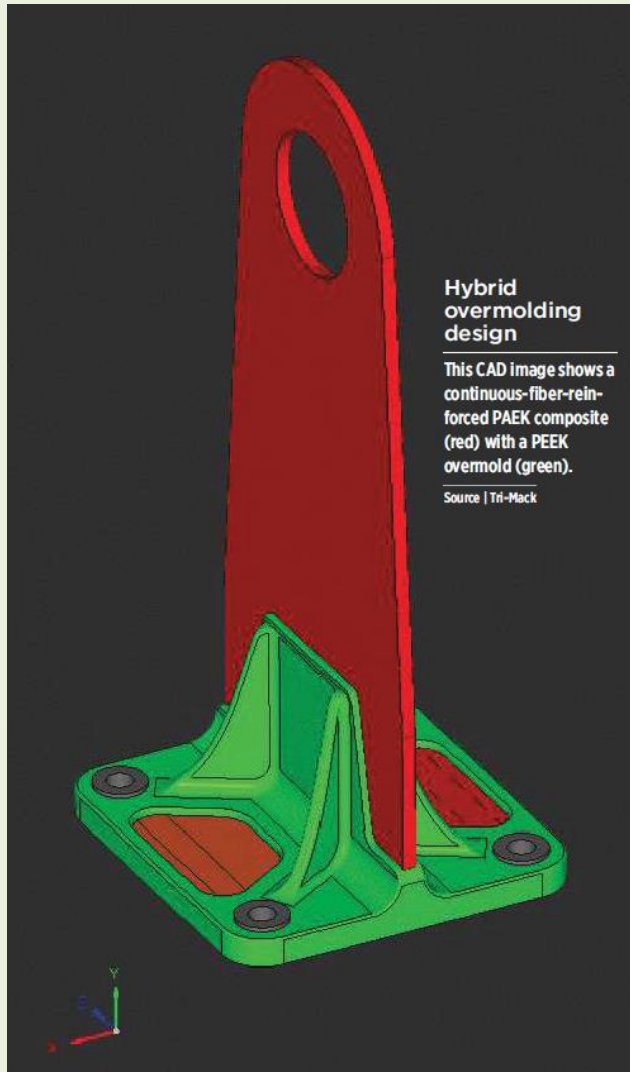
PVB (polyvinylbutyral) – semikrystalický, teplota tavení  $150 \div 170^\circ\text{C}$ .  
Spojování mechanickým zakotvením na makromechanické úrovni  
a/nebo difúzí epoxidových monomerů do termoplastu (amorfního).  
Svařování nesmí vyvolat degradaci termosetu.



# Overmolding

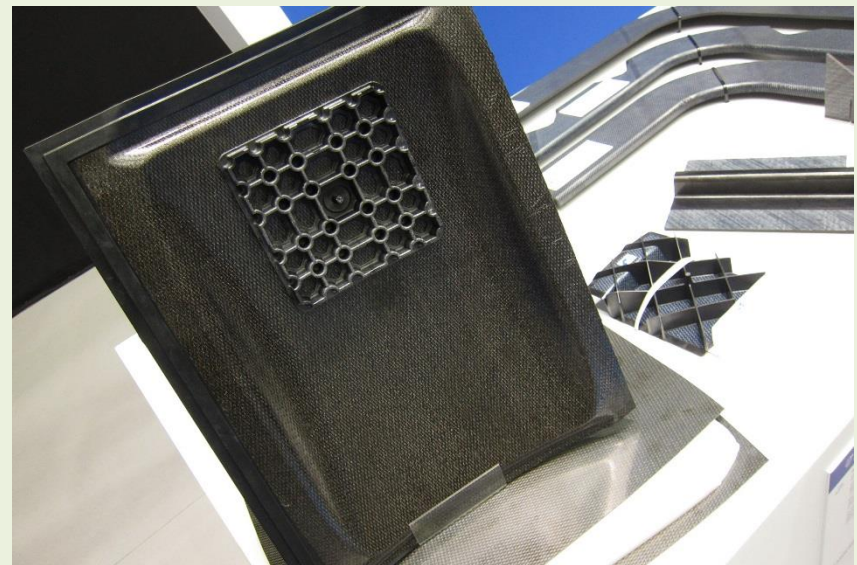


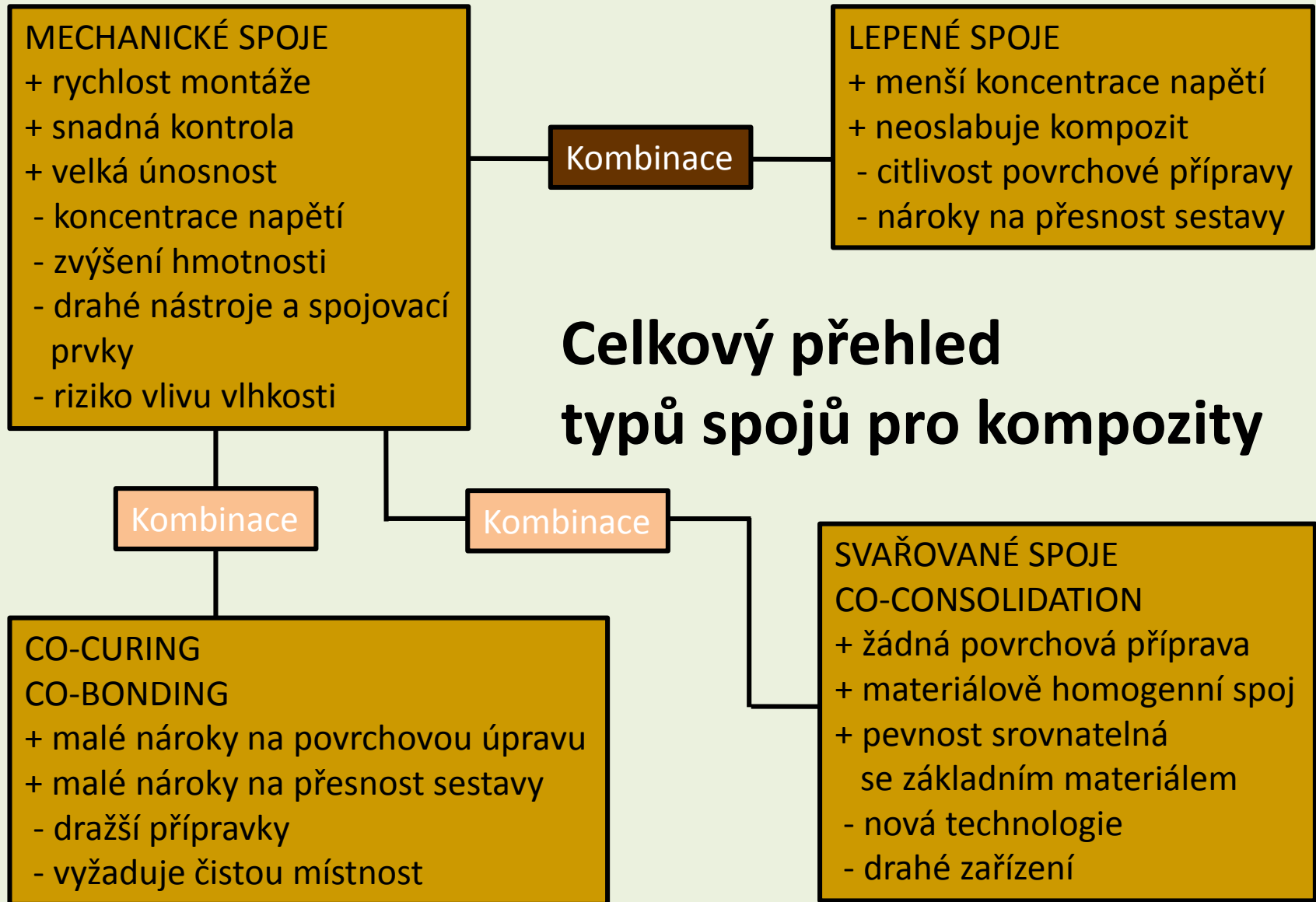
# Overmolding



Na díl z vyztuženého termoplastu se injektáží připojí injektáží další struktura z podobného materiálu

Základní díl má obvykle matrici s nižším bodem tání.





A photograph of a layered rock face, likely a geological outcrop. The rock shows distinct horizontal and vertical bedding. The colors range from dark grey to brownish-red. Several small green plants with serrated leaves are growing in the crevices and on the rock surface. The text "Děkuji za pozornost" is overlaid in the center in a yellow font with a black outline.

Děkuji za pozornost

21.11.2019 **INSPIRUJME SE PŘÍRODOU**