



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LEPENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V PŘESNÝCH APLIKACÍCH

BONDING OF COMPOSITE MATERIALS IN PRECISE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Schubert

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Kupčák

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Vojtěch Schubert**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radim Kupčák**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Lepení kompozitních materiálů v přesných aplikacích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedna z oblastí strojírenství, kde zatím kompozitní materiály nenacházejí rozsáhlé využití jsou přesné aplikace, jako třeba průmyslová nebo sportovní optika. To je mimo jiné způsobeno nedostatečnou přesností většiny technologií pro výrobu kompozitů. Problematikou s tím úzce spojenou je lepení kompozitů, čímž se bude autor zabývat.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše problematiky výroby kompozitů a lepení.
Volba materiálů a návrh vzorků pro experiment.
Provedení experimentu pevnosti lepeného spoje.
Zhodnocení jednotlivých lepidel a tloušťky lepicí spáry.

Seznam doporučené literatury:

CAMPBELL, F. C. ASM INTERNATIONAL. Structural Composite Materials. Materials Park: A S M International, 2010. ISBN 9781615030378.

BOGOLJUBOV, N. N. Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1995. 433 s.

MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997. 1249 s. ISBN 0-8247-9304-8.

EBNESAJJAD, S. F. EBNESAJJAD. Surface treatment of materials for adhesion bonding. Norwich, NY, U.S.A.: William Andrew Pub., c2006. ISBN 08-155-1523-5.

TROUGHTON, M. Handbook of plastics joining: a practical guide. 2nd ed. Cambridge, UK:

TWI/The Welding Institute, c2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na problematiku lepení kompozitních materiálů. V souvislosti s tímto tématem byla zvláště zpracována rešerše výroby kompozitů a technologie lepení. Cílem praktické části bylo zjištění optimální tloušťky spáry při lepení kompozitních materiálů. Je zde proveden test pevnosti jednoduše přeplátovaného spoje pro různé série tloušťek spár. Součástí bakalářské práce je i návrh a výroba vzorků pro experiment pomocí mokrého kladení.

Klíčová slova

kompozity, lepidla, lepený spoj, epoxidy, vytvrzování, přípravek

ABSTRACT

This work is focused on the bonding of composite materials. Related research dealing with technology of production and bonding of these materials was additionally conducted. Practical part of this thesis was set to find out what the optimal bond line thickness was for the bonding of the composites. Thus, the strength of single-lap joints (SLJ) in series of various bond line thicknesses was therein tested. A model of samples (and design of their production by wet lay-up) for the experiment is also provided in this thesis.

Key words

composites, adhesives, bonded joint, epoxides, curing, jig

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHUBERT, Vojtěch. *Lepení kompozitních materiálů v přesných aplikacích* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132274>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Radim Kupčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Lepení kompozitních materiálů v přesných aplikacích* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21.05.2021

Datum

Vojtěch Schubert

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Radimu Kupčákovi za všechno pro mne obětovaný čas a za velmi vstřícný přístup při vedení téhle práce. Moc si vážím každé rady a připomínky.

Děkuji také panu Ing. Janu Zouharovi, PhD. a Ing. Jiřímu Jandovi za odbornou asistenci v průběhu experimentu. Bez nich by tahle práce nemohla vzniknout.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	9
1.1 Historie kompozitních materiálů	9
1.2 Synergismus kompozitních materiálů	10
1.3 Klasifikace kompozitních materiálů	11
1.4 Složení kompozitních materiálů	11
1.4.1 Laminování	12
1.5 Mechanika kompozitních materiálů	13
1.5.1 Anizotropie	13
1.5.2 Hookův zákon	14
1.5.3 Building-block approach	15
1.5.4 Souhrn	16
2 TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ	17
2.1 Výztužná vlákna	17
2.1.1 Skelná vlákna	19
2.1.2 Borová vlákna	20
2.1.3 Uhlíková vlákna	21
2.1.4 Aramidová vlákna	22
2.1.5 Polyetylenová vlákna	23
2.1.6 Keramická vlákna	23
2.2 Polymerní matrice	24
2.2.1 Termosetické matrice	26
2.2.2 Termoplastické matrice	28
2.3 Výroba kompozitů	30
2.3.1 Mokrý kladení	30
2.3.2 Vstřikování	31
2.3.3 Infuze	31
2.3.4 Navíjení	32
2.3.5 Pultruze	32

3	TECHNOLOGIE LEPENÍ	33
3.1	Teorie lepení	33
3.2	Lepidla	34
3.2.1	Volba lepidla	34
3.3	Zásady pro návrh lepeného spoje	35
3.4	Povrchová úprava	36
3.5	Proces lepení	37
3.6	Lepení kompozitů	37
3.7	Komparace spojovacích technologií	38
4	VLIV TLOUŠŤKY LEPENÉ SPÁRY NA PEVNOST SPOJE	39
4.1	Volba lepidla pro experiment	39
4.2	Návrh vzorku pro experiment	39
4.3	Výroba vzorku pro experiment	40
4.4	Konstrukce přípravku na lepení	43
4.5	Povrchová úprava vzorků	44
4.6	Lepení vzorků	44
4.7	Zkoušky pevnosti	46
4.8	Výstupní data zkoušek	47
4.9	Vyhodnocení experimentu	48
4.9.1	Skupina A (Lepidlo DP110)	48
4.9.2	Skupina B (Lepidlo DP125)	49
4.10	Výsledek experimentu	50
5	DISKUZE	51
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
	SEZNAM PŘÍLOH	59

ÚVOD

Technický vývoj lidské společnosti významným způsobem závisí na konstrukčních materiálech a na jejich zpracování. Tento fakt lze již označovat za truismus, nicméně je pravdou, že jakákoliv dynamická éra hospodářství je charakteristická konkrétním technologickým objevem. Důkazem jsou broušené nástroje a keramika v období neolitické revoluce, ocel v éře průmyslové revoluce, nebo konstrukční slitiny hliníku a jiných kovů po konci druhé světové války.

V současnosti se přirozeně vyskytují stále vyšší nároky na výkonnost a energetickou efektivitu konstrukcí, avšak tradiční inženýrské materiály již tyto předpoklady přestávají splňovat. A tak v oblasti materiálového a technologického inženýrství postupně vzniklo nové paradigma a úsilí o rozvoj jiných materiálů. Zvláště specifický pokrok zaznamenaly v posledních letech kompozitní materiály, které lze dnes nalézt například v kosmickém, leteckém, dopravním nebo sportovním průmyslu.

S rozvojem kompozitních materiálů úzce souvisí technologie výroby a technologie jejich spojování. Tato práce přímo pojednává o obou tématech a uvádí je do souvislostí. Zajímavá je spojitost mezi kompozity s polymerní matricí a lepidly, nikoli jen z hlediska paralelního vývoje technologií, ale i struktury a materiálových vlastností.

Přestože jsou lepené spoje mnohdy jedinou možností pro spojení kompozitů, tak toto téma stále obsahuje určité záležitosti, které nejsou zcela objasněny. Takovou otázkou je například tloušťka lepené spáry, jejíž změna musí intuitivně ovlivňovat pevnost spoje.

Cílem této práce tedy zůstává objasnění problematiky lepení kompozitů, aby byla uskutečnitelná aplikovatelnost v oblasti přesných konstrukcí. Pro tyto intence bude realizován experiment zkoušky pevnosti lepených kompozitních vzorků (Obr. 1).



Obr. 1: Testované vzorky.

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

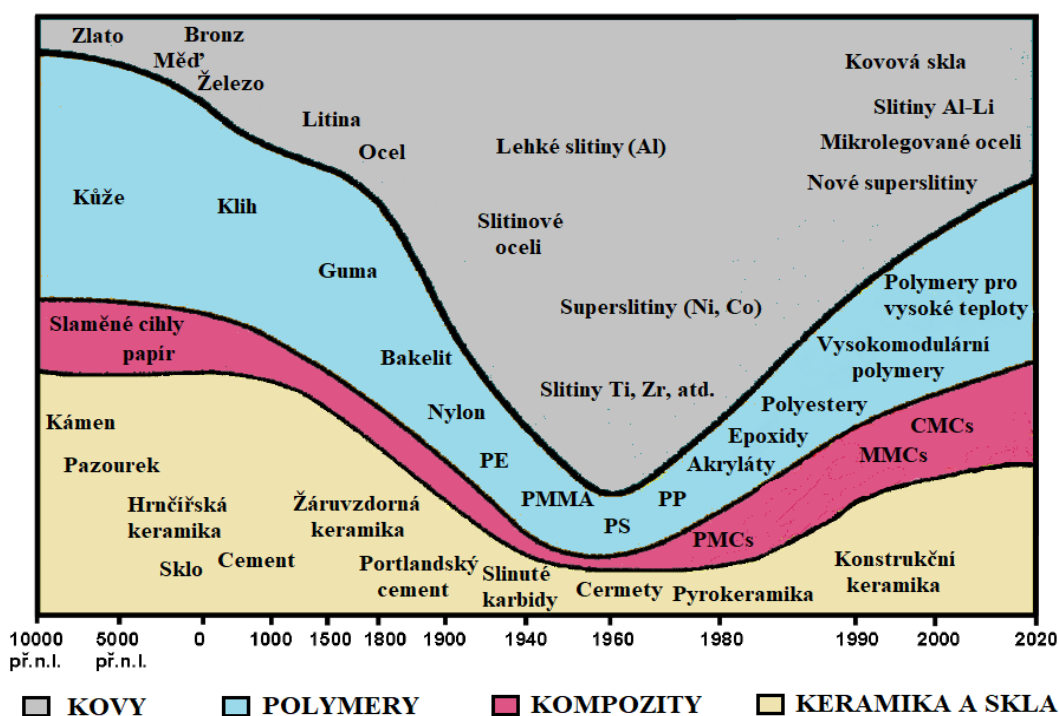
Kompozity (z angl. *composite* = složený, kombinovaný) jsou vždy vícefázové materiály s významným zastoupením každé z fází a obvykle s vizuálně rozlišitelným rozhraním. Jednotlivé složky jsou vůči sobě odlišné chemickým složením a strukturou, mají tedy rozdílné fyzikální i mechanické vlastnosti, avšak na okolní prostředí působí koordinovaně. [1]

V kompozitu bývá účelově jedna spjitá fáze, jež je nazývána maticí. Další fáze jsou vůči objemu materiálu nespojitě a disponují obvykle lepšími mechanickými vlastnostmi než matrice. Tyto disperzní fáze jsou označovány jako výztuž. [1, 2]

1.1 Historie kompozitních materiálů

Koncept kompozitních materiálů není z historického hlediska nový. V samotné přírodě lze nalézt mnoho organismů nebo biologických systémů, které již po miliony let uplatňují kompozitní materiály hlavně pro jejich pevnosti a nízkou hmotnost. Kupříkladu těla všech vyšších obratlovců se skládají z kompozitu krátkých vláken kolagenu umístěných v minerální matici – v hydroxylapatitu. Tento materiál (kosti) je velmi výhodným právě ve vztahu vysoké pevnosti k malé hustotě, což má například pro kostru ptáků zásadní význam. Dalším přírodním kompozitem jsou lastury nebo dřevo, které je tvořeno z vláken celulózy uložených v ligninové matici. [3]

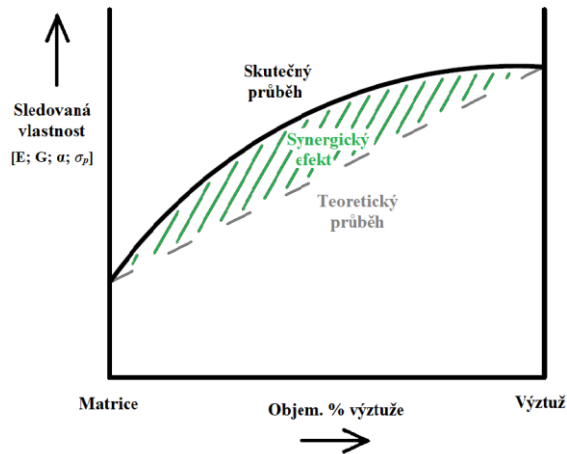
V návaznosti na tyto přirozeně se vyskytující kompozitní materiály existuje celá řada inženýrských materiálů, které jsou z obecného hlediska také kompozity, a jež se již několik desetiletí nebo století využívají. Do této skupiny materiálů typicky patří třeba saze smíšené s pryží, skelná vlákna v pryskyřici a portlandský cement nebo asfalt smíchaný s pískem. Nicméně za počátek koordinovaného výzkumu a rozvoje úsilí v oblasti kompozitních materiálů lze spolehlivě označit až polovinu 60. let minulého století (Obr. 2). Impulsem byly stále zvyšující se požadavky na celkovou výkonnost materiálů, pohaněné dynamickým rozvojem leteckého, energetického a stavebního průmyslu. [3]



Obr. 2: Vývoj relativního významu konstrukčních materiálů [1].

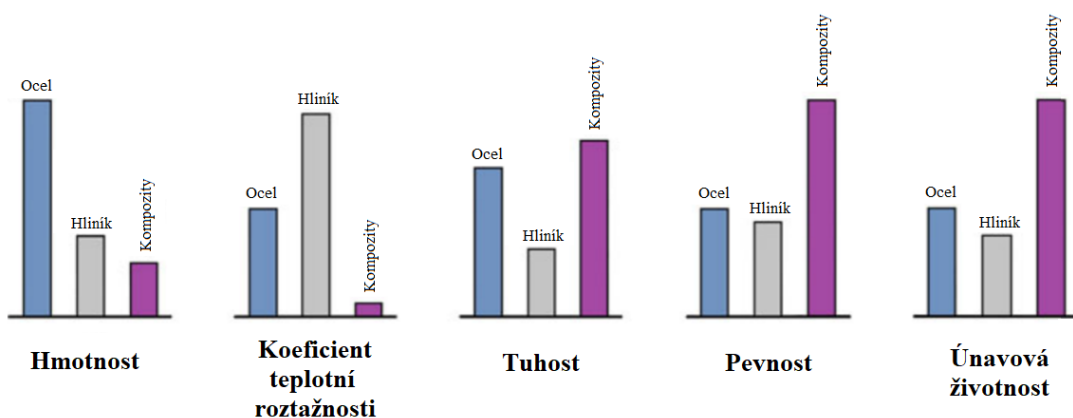
1.2 Synergismus kompozitních materiálů

Hlavní podstata využití kompozitních materiálů je v tzv. synergismu, tedy ve schopnosti sloučení vlastností od jednotlivých složek materiálu. Výsledek synergismu závisí převážně na technologii výroby kompozitu a na relativním množství, geometrii i vzájemné soudržnosti fází. Tím, že je možné ovlivnit tyto faktory, tak lze docílit vlastností materiálu, které nejsou určeny pouhou sumací hodnot od jednotlivých složek, ale reálně dosahují vyšších parametrů (Obr. 3). [1, 2]



Obr. 3: Synergické chování složek kompozitu [2].

Z praktického hlediska lze optimalizovat výběr a uspořádanost komponent tak, aby výsledný kompozit disponoval kombinací vhodných fyzikálních a mechanických vlastností. Tohle je ve skutečnosti mnohem významnější fakt, než se na první pohled může zdát. Vyplývá z něj vysoká variabilita při navrhování součástí, což je jedna z největších výhod kompozitů. Obr. 4 zobrazuje (pouze ilustračně) srovnání kompozitních materiálů s konvenčními, monolitickými materiály, jako je hliník nebo ocel. Použitím náležitých kompozitních materiálů lze potenciálně zvýšit jak pevnost a tuhost konstrukce, tak i odolnost vůči únavě se současnou redukcí hmotnosti nebo teplotní roztažnosti. [3]



Obr. 4: Srovnání kompozitních a konvenčních, monolitických materiálů [3].

1.3 Klasifikace kompozitních materiálů

Kompozity můžeme rozlišit na základě mnoha hledisek. Nejčastější klasifikace vychází z použití různých materiálů matric, nebo druhů či tvarů výztuží [1].

Klasifikace podle druhu matrice:

- kompozity s kovovou matricí (MMCs),
- kompozity s polymerní matricí (PMCs),
- kompozity s keramickou matricí (CMCs).

Klasifikace podle druhu výztužné fáze:

- kompozity s kovovou výztuží,
- kompozity se skleněnou výztuží,
- kompozity s keramickou výztuží,
- kompozity s polymerní výztuží,
- kompozity s výztuží na bázi krystalického uhlíku,
- kompozity s výztuží na bázi organického materiálu.

Klasifikace podle geometrie výztužné fáze:

- kompozity s vyztužujícími částicemi,
- kompozity s vyztužujícími vlákny,
- kompozity vrstvené (sendvičové).

1.4 Složení kompozitních materiálů

Při inženýrské syntéze lze teoreticky využít jakékoliv kombinace matric a disperzních fází z klasifikačních skupin uvedených v Kapitole 1.3. Zde je ale třeba podotknout, že změna typu matrice nebo výztuže se u kompozitů projeví na odlišné technologii výroby i na fyzice materiálu. Studie o kompozitních materiálech tak značně nabývá na rozsáhlosti a různorodosti. Proto se táto práce primárně věnuje vláknovým kompozitům s polymerní matricí.

Avšak z obecného hlediska platí, že matrice tvoří výplň kompozitního materiálu, udržuje výztuž ve správné poloze a orientaci, chrání ji proti vnějšímu poškození a korozi. Matrice má také vliv na tvarovou stálost součásti, je skrze ni přenášeno zatížení na výztuž a může výrazně ovlivnit únavové vlastnosti, houževnatost i plasticitu. [1, 4]

Hlavní význam výztuže je v zajištění mechanických vlastností kompozitu, především se jedná o pevnost v tahu, tvrdost a tuhost. Během namáhání chceme, aby se napětí koncentrovalo právě do výztuže. Jinými slovy se chce docílit synergie mezi matricí a výztuží [4]. Z tohoto důvodu platí nutné podmínky pro vyztužení kompozitu, definované jako [5]:

$$\sigma_{p_{výztuže}} > \sigma_{p_{matrice}} \quad (1)$$

$$E_{výztuže} > E_{matrice} \quad (2)$$

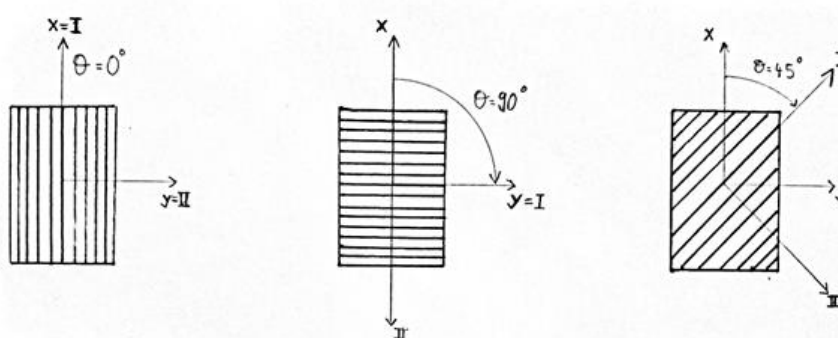
$$\varepsilon_{výztuže} < \varepsilon_{matrice} \quad (3)$$

tedy musí platit, že výztuž má vyšší mez pevnosti (Rov. 1), větší Youngův modul pružnosti v tahu (Rov. 2) a menší poměrné prodloužení než matrice (Rov. 3).

1.4.1 Laminování

Struktura vláknových kompozitů je obvykle tvořena rovnoběžnými vrstvami, jejichž přibližná tloušťka je v řádu desetin milimetrů. Při výrobě jsou tyto vrstvy na sebe kladeny pod různou orientací z důvodu nejvýhodnějšího uspořádání vláken, tak aby kompozit dosahoval nejvyšších hodnot tuhosti a pevnosti ve směru zatížení (Kap. 1.5.1). [4, 6]

Pro lamináty platí konvence značení vrstev vycházející z orientace (Θ) obecné souřadnice (x) vůči ose vláken (I) (obr.5). Vrstvy jsou označovány čísly podle velikosti úhlu Θ . Základní řada vrstev se skládá z $0, 90, \pm 45$. Samotné značení struktury je provedeno v závorkách, kde popisujeme orientaci každé vrstvy. Například kompozit $(0/90/90/0)$ tvoří čtyři vrstvy – pro horní a dolní vrstvu platí $\Theta = 0^\circ$ a pro prostřední dvě vrstvy platí $\Theta = 90^\circ$. Protože je snaha většinu kompozitů vyrábět symetricky, můžeme značení zjednodušit pomocí roviny symetrie, která se nachází uprostřed tloušťky kompozitu a je rovnoběžná se všemi vrstvami. Pak bude zápis stejného kompozitu vypadat následovně: $(0/90)_s$. [4, 7]



Obr. 5: Definice orientace vrstev laminátu.

Kdyby všechny vrstvy byly umístěny jen v jednom směru, vznikne struktura, jež je nazývána lamina. Toto uspořádání je výhodné pouze pro součásti namáhané na tah a tlak. Reálné zatížení je ale téměř vždy kombinovaného a víceosého charakteru. Proto se v praxi lze spíše setkat s lamináty, které jsou složeny z vrstev různého uspořádání. Pro základní predikci mechanického chování byla zformována tzv. klasická teorie laminátů, jež vychází ze tří faktorů [7, 8]:

- Faktor symetrie – vyjadřuje uspořádání vrstev vůči rovině symetrie. Asymetrický laminát má tendenci se po výrobě zakřivit z důvodu odlišné teplotní roztažnosti jednotlivých vrstev.
- Faktor vyváženosti – vychází z odpovídajícího si počtu plusových a minusových vrstev 45 . Při tahovém napětí vznikají v nevyváženém laminátu smyková napětí, a tedy i úhlová přetvoření.
- Faktor pořadí – z hlediska deformací a mechanické odezvy rovněž záleží na pořadí vrstev v laminátu. Kompozit se bude deformovat odlišně, když vrstvy na povrchu vyměníme za vrstvy s jinou orientací ve středu laminátu.

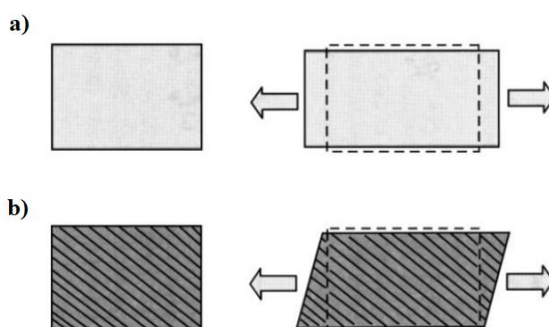
Avšak přesný popis deformace vícevrstvého laminátu je analytickými metodami téměř nemožný. Proto tam, kde je to potřebné, například v kosmickém nebo leteckém průmyslu, byly vytvořeny počítačové softwary pro numerické řešení [6].

1.5 Mechanika kompozitních materiálů

V inženýrství je podstatné znát mechanickou povahu materiálu a umět jej analyzovat, zvláště pak v přesných aplikacích. Chování kompozitních materiálů je nicméně v mnoha ohledech rozdílné od chování běžných, homogenních materiálů. Tato kapitola tedy shrnuje základní charakteristiky, odlišnosti, přednosti i nevýhody kompozitů.

1.5.1 Anizotropie

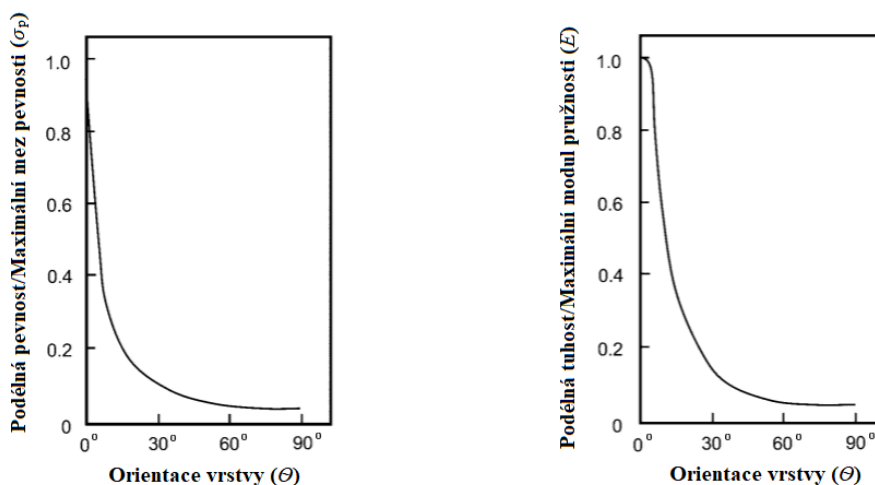
Železné slitiny, polymery i jiné tradiční konstrukční materiály jsou izotropního charakteru. Pro takové materiály platí, že jejich mechanické vlastnosti nezávisí na směru nebo poloze evaluace. Například ocel má ve všech směrech materiálu stejné hodnoty pevnosti, tuhosti, tvrdosti nebo tepelné vodivosti. Avšak kompozity se kvůli přítomnosti nespojitých a orientovaných výztuží chovají odlišně, anizotropně, jejich vlastnosti jsou funkce polohy a směru [6].



Obr. 6: Porovnání deformací: a) izotropního a b) anizotropního materiálu [9].

Tuto odlišnost můžeme typicky demonstrovat při tahových zkouškách (Obr. 6). Zatímco izotropní materiál se pod působím normálového napětí deformuje pouze v normálové prodloužení, tak deformace anizotropního materiálu je podstatně složitější. Dílčí směry kompozitu se deformují rozdílně a jednoosá napjatost může způsobit úhlové přetvoření (zkos) i osové natočení (zkroucení). [6, 7]

Taktéž je patrné, že výsledek zatěžování laminy závisí na směru napětí, kdy nejvyšších hodnot pevností se dosahuje při zatížení rovnoběžném se směrem výztuže – čili směr největšího modulu pružnosti, a naopak nejnižších pevností ve směru kolmém na vlákna. V závislosti na úhlu θ se výrazně tedy mění jak pevnost, tak i tuhost laminy (Obr. 7).



Obr. 7: Vliv úhlu θ na pevnost a tuhost laminy [9].

1.5.2 Hookův zákon

Při vnějším silovém a momentovém působení a za předpokladu lineárně elastických deformací lze charakterizovat chování materiálu pomocí Hookova zákona. Pro trojrozměrné, anizotropické těleso má obecný Hookův zákon maticový tvar:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 = \sigma_x \\ \sigma_2 = \sigma_y \\ \sigma_3 = \sigma_z \\ \sigma_4 = \tau_{yz} \\ \sigma_5 = \tau_{xz} \\ \sigma_6 = \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 = \varepsilon_x \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_y \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_z \\ \varepsilon_4 = \gamma_{yz} \\ \varepsilon_5 = \gamma_{xz} \\ \varepsilon_6 = \gamma_{xy} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Popřípadě složený tvar:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

kde σ představuje sloupcovou matici 6 nezávislých složek tenzoru napětí, ε zastupuje sloupcovou matici 6 nezávislých složek tenzoru malých deformací a C je tzv. matice tuhostí, obsahující 36 materiálových konstant. Hodnoty těchto konstant se zjišťují buď experimentálně, nebo je lze získat pomocí 21 nezávislých pružnostních charakteristik. [10, 11]

Z tohoto důvodu je modelování přetvoření plně anizotropního materiálu značně komplikované. Kdežto na výpočet tuhostí izotropního materiálu jsou zcela postačující 2 pružnostní charakteristiky: Youngův modul E a Poissonovo číslo μ . [6, 7]

Složitost se projeví již ve dvourozměrné problematice. Pro popis tenké vrstvy kompozitu jsou potřebné celkem 4 pružnostní charakteristiky: dva moduly pružnosti v tahu – jeden ve směru rovnoběžném s vlákny E_1 , druhý v kolmém směru E_2 , dále jedno Poissonovo číslo hlavní μ_{12} a jeden modul pružnosti ve smyku G_1 . Vedlejší Poissonovo číslo μ_{21} je závislé na čtyřech předchozích konstantách a lze ho získat ze vztahu [6]:

$$\frac{\mu_{21}}{E_2} = \frac{\mu_{12}}{E_1}, \quad (6)$$

poté lze vyjádřit Hookův zákon v maticové podobě jako:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & \frac{E_2\mu_{12}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & 0 \\ \frac{E_1\mu_{21}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Částečné zjednodušení problematiky Hookova zákona pro kompozitní materiály je možné skrze dosažení určité symetrie v tělese, například pro trojrozměrný anizotropní materiál s jednou rovinou symetrie dojde k zjednodušení matice C (z Rov. 5) na 9 nezávislých pružnostních charakteristik: zůstávají nezávislé tři moduly pružnosti v tahu E_1, E_2, E_3 , tři moduly pružnosti ve smyku G_{12}, G_{23}, G_{31} a tři Poissonova čísla $\mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{13}$. [11]

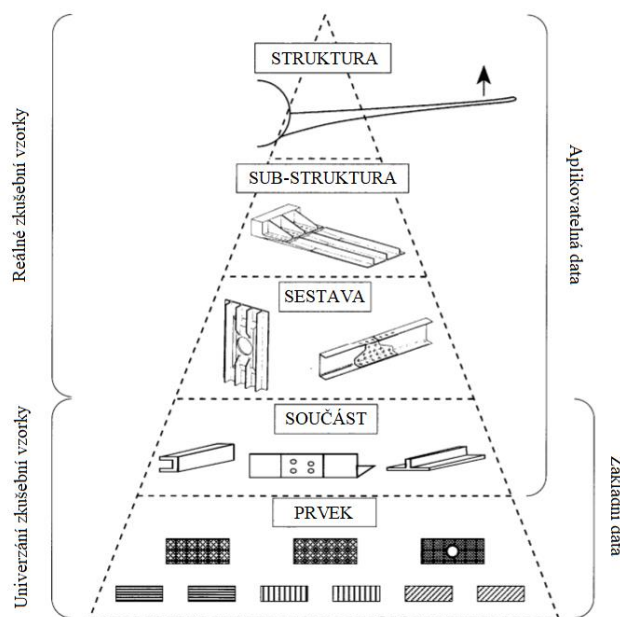
Deformace samozřejmě ovlivňují včetně silového působení i vlivy prostředí, primárně změny teplot a kvůli vlastnostem matic také atmosférická vlhkost. Poté tenzor malých deformací ε lze pro obecný Hookův zákon vektorově definovat jako [4]:

$$\varepsilon = S \cdot \sigma + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta m, \quad (8)$$

kde S je inverzní matice tuhostí ($S = C^{-1}$), α a β zastupují sloupcové matice 3 normálových složek tenzoru koeficientů teplotních roztažností a tenzoru prodloužení vlivem vlhkosti, ΔT je skalár určující změnu teploty a Δm je taktéž skalár stanovující množství absorbované vlhkosti.

1.5.3 Building-block approach

Inženýrská syntéza kompozitních součástí je tedy v souvislosti s výše uvedenými okolnostmi výrazně náročnější. Pro konstrukční kovy existuje mnoho odborných publikací zobrazující mechanické chování při široké škále předpokladů a podmínek. Na kompozitní materiály nic podobného efektivně aplikovat nelze, a tak je nevyhnutelné získat určitá data pomocí experimentů nebo zkoušek k podpoře analytických a numerických metod. Například pro MKP je principiální znát určité vstupní parametry, ovšem výstupná data je také nutné nějak zhodnotit. Návrh kompozitního dílu pro přesné aplikace se tedy bez experimentálních metod neobejde. Z tohoto důvodu se v praxi často využívá proces experimentů, tzv. *building-block approach* (Obr. 8). [12]



Obr. 8: Pyramida testovacího procesu kompozitů [12].

Testovací proces probíhá v blocích, získaná data z každého bloku je třeba analyzovat, vycházet z nich při konstrukční syntéze a teprve po vyrobení komplexnějšího prvku následuje další blok. Začíná se testováním na mikro úrovni, tedy zjišťováním vlastností vláken a maticí, dále se postupuje přes laminy, lamináty až se dosáhne komplexnějších struktur a výsledných konstrukcí. Každý testovaný článek samozřejmě musí být reprezentativní z hlediska materiálu a způsobu namáhání, vzhledem ke skutečné konstrukci. [12]

1.5.4 Souhrn

Ačkoli kompozity mají vlivem anizotropie některé konstrukční nevýhody a technologické komplikace, tak na druhou stranu mohou poskytovat hodnotná pozitiva. Souhrnně se jedná o tyto výhody [4, 7]:

- Větší variabilita – při optimalizaci bezpečnosti vůči mezním stavům izotropního materiálu je možné měnit pouze geometrii, materiál nebo zatěžování součásti. V anizotropním laminátu lze navíc upravovat směr a orientaci vláken, důsledkem čehož kompozity mají velký potenciál v efektivitě využití materiálu.
- Vysoká měrná tuhost a pevnost (vztažené na hustotu materiálu) – což úzce souvisí s předchozím bodem. Ve výsledku lze dosáhnout významného snížení hmotnosti a menší spotřeby paliv v dopravních aplikacích.
- Násobně větší únavová pevnost a životnost – neboť při únavovém porušení vláken nedochází k šíření trhliny. Napětí z porušeného vlákna se distribuuje přes matici na okolní vlákna. Jediný reálný způsob únavového selhání je z důsledku šíření trhlin v matici.
- Odolnost vůči korozi – díky čemuž se výrazně redukuje tzv. sekundární výdaje. Uvádí se, že náklady způsobené korozi celkové činní 3 až 3,5 procenta celosvětového HDP [38].
- Nízká teplotní roztažnost – koeficient teplotní roztažnosti pro podélný směr vláken je téměř vždy o 1 až 2 řády nižší než u konstrukčních kovů. Ovšem znovu se jedná o anizotropní záležitost, v příčném směru je tato charakteristika obvykle horší.
- Snížení nákladů a času montáže – jednotlivé komponenty sestav se mohou formovat ve větší celky již během výroby kompozitu. Na rozdíl od hliníkových nebo ocelových konstrukcí, kde se kvůli riziku šíření únavových trhlin vyrábí vícero menších dílů. Pro kompozity to znamená zredukování spojovacího materiálu a délky montážních procesů.

Kvůli celistvost interpretace kompozitů se přísluší sumarizovat i jejich negativa, jež by neměla být opomenuta. Hlavními nevýhodami kompozitů jsou [4, 7]:

- Vysoká cena – týkající se současně materiálu i technologie výroby.
- Nízká vrubová houževnatost – která pramení z křehkého chování kompozitů. S touto problematikou souvisí inkompatibilita šroubových a nýtových spojů v kompozitech.
- Složitost bezpečnostních kontrol a oprav – což vychází z vlastního mechanismu porušování kompozitu, kdy nejčastěji dochází k tzv. delaminaci (porušením vlivem trhliny v matici), která vede k oddělení vrstev laminátu. Tento defekt je velmi obtížně zjištělný a opravitelný.
- Citlivost matic na vlivy prostředí – především se jedná o teplotní závislosti vlastností polymerních struktur. Většina plastů také absorbuje určité množství atmosférické vlhkosti, což může vést ke zvýšení objemu a hmotnosti.

Vyplývá tedy, že kompozity jsou jako každý jiný inženýrský materiál, mají své silné a slabé stránky. Volba materiálu tak stále závisí na kontextu vlastností a cenové relace. Kompozity však přináší mimořádnou různorodost v oblasti konstruování a mohou poskytnout nové možnosti z hlediska průmyslové evoluce.

2 TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ

Výrobní postupy kompozitů se řadí mezi progresivní a moderní technologické metody, o kterých je zatím vydáno relativně málo odborných publikací a jejichž přesné postupy jsou často utajovány v rámci firemního tajemství nebo vlastnictví. Obdobně jako při výrobě hutních materiálů a polotovarů je i výroba složek kompozitů záležitostí specializovaných podniků. Vyskytují se tedy samostatné závody jak na výrobu maticí, výztužných vláken, tak i na jejich zkomponování.

2.1 Výztužná vlákna

Ačkoliv typ a kvalita výztuže vymezuje finální vlastnosti kompozitu, tak samotná vlákna mnohdy nelze využít jako homogenní konstrukční materiál, protože obvykle dosahují velmi nízkých pevností v tlaku, tudíž neudrží pevný tvar. Z technologického hlediska je efektivita vláken, jako výztuže kompozitního materiálu, určena třemi faktory. [13]

Malý průměr vláken

Čím menší je poměr průměru vlákna vůči velikosti krystalografického zrna vlákna, tím se zmenšuje pravděpodobnost výskytu materiálových vad (především povrchových defektů). Z toho faktu vyplývá, že množství vláken vykazuje řádově vyšší pevnost než množství ucelené hmoty o stejném objemu. [2, 4]

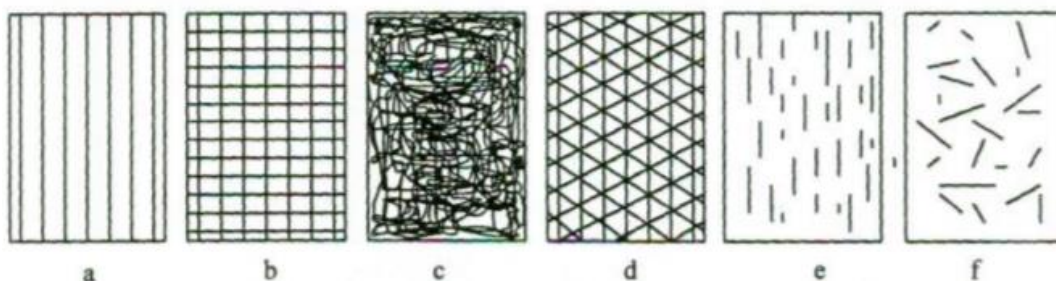
Vysoký aspektivní (štíhlostní) poměr vláken

Poměr délky k průměru vlákna (l/d) je podstatný z hlediska interference vláken s maticí. Vyšší aspektivní poměr umožňuje lépe převést namáhání z matrice na vlákna na společném rozhraní pomocí smykového napětí. Samozřejmě rovněž závisí na vlastnostech matrice, především na viskozitě během výroby kompozitu a na pevnosti vazebných sil s vlákny. [7]

Flexibilita (ohybnost) vláken

Tento parametr je funkcí Youngova modulu pružnosti a rozměru příčného průřezu vlákna. Udává, pod jakým úhlem ohybu se vlákno zlomí. Flexibilita vláken je důležitá z technologické relace, neboť usnadňuje a dovoluje více variant výroby kompozitního materiálu. [3]

Vlákna se vyskytují buď v kontinuální formě (dlouhá vlákna), nebo diskontinuální formě (krátká vlákna). Kompozity s diskontinuálními vlákny jsou obecně levnější, ale zato dosahují menších pevností i tuhostí. Pro technologické účely se kontinuální vlákna používají v uskupeních o vysokém počtu jednotlivých vláken, například v pramencích, pletencích nebo ve tkaninách. Vhodná architektura tkanin může výrazně urychlit výrobu kompozitů a nemusí se jednat jen o zvětšení tloušťky vrstvy, ale i o předem definovanou orientaci vláken (Obr. 9). [7]



Obr. 9: Příklady uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [14].

V současnosti existuje široké množství druhů vláken pro vyztužení polymerních matric. Jednotlivě se od sebe liší technologií výroby, mechanickými vlastnostmi, hustotou i cenou (Tab. 1). Přímou na základě těchto parametrů jsou vybírány vhodné druhy vláken pro konstrukce. Mezi komerčně nejdůležitější patří vlákna skelná, uhlíková (grafit, karbon), aramidová (kevlar) nebo borová [7].

Tab. 1: Vlastnosti výtuzných vláken [7, 9, 15].

Typ vlákna	Průměr vlákna d [μm]	Hustota ρ [kg/m^3]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Poissonova konstanta μ [-]	Mez pevnosti σ_p [MPa]	Mezní poměrné prodloužení ε_{max} [%]	koeficient teplotní roztažnosti α [$1/^\circ\text{C}$] (podélný směr)	koeficient tepelné vodivosti λ [W/mK]	Měrná tepelná kapacita c [J/kgK]	Maximální provozní teplota T_{max} [$^\circ\text{C}$]	Cena* [Kč/kg]
S-glass	10	2 500	86	0,2	3 200	4	$3 \cdot 10^{-6}$	1	800	700	300
E-glass	16	2 600	75	0,25	2 500	3,5	$5 \cdot 10^{-6}$	1	800	700	50
Kevlar 49	12	1 450	130	0,4	2 900	2,3	$-2 \cdot 10^{-6}$	0,03	1 400	-	600
HS-karbon	7	1 750	280	0,3	3 200	1,3	$0,2 \cdot 10^{-6}$	200 (20 $^\circ\text{C}$) 60 (800 $^\circ\text{C}$)	800	>1 500	1 000
HM-grafit	6,5	1 800	650	0,35	2 500	0,6	$0,8 \cdot 10^{-6}$	200 (20 $^\circ\text{C}$) 60 (800 $^\circ\text{C}$)	800	>1 500	1 500
B	100	2 600	400	-	3 400	0,8	$4 \cdot 10^{-6}$	-	-	500	-
Al₂O₃	20	3 700	380	-	1 400	0,4	-	50 (20 $^\circ\text{C}$) 7 (800 $^\circ\text{C}$)	900	>1 000	-
SiC	14	2 550	200	-	2 800	1,3	$5 \cdot 10^{-6}$	-	-	1300	-
PE	18	960	100	-	3 000	-	-	-	-	150	550

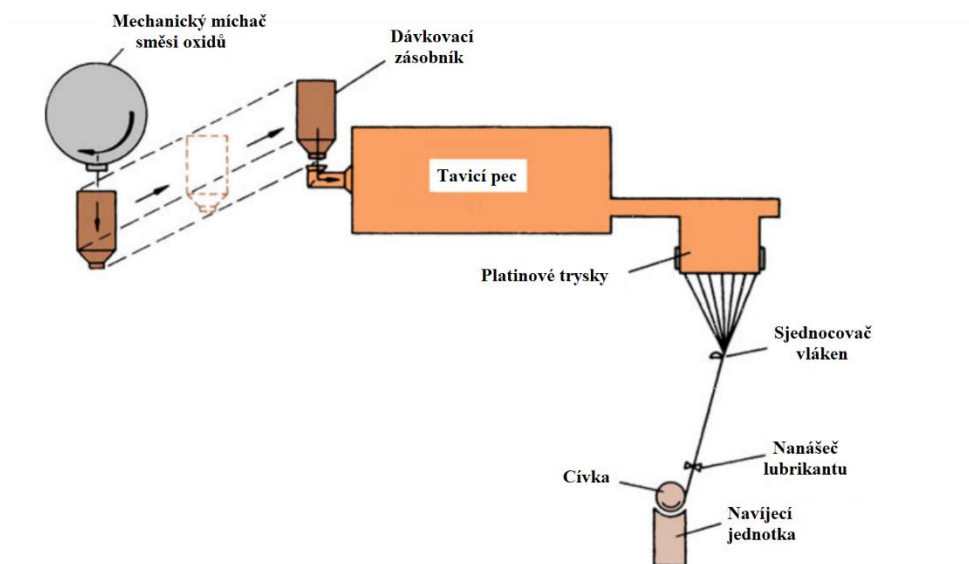
* Ceny jsou pouze orientační, jsou závislé na nákupním množství a na formě vláken.

Tato podkapitola se dále věnuje technologiím výroby vybraných vláken, charakteristice jejich kvalit a druhům aplikací. Existuje mnoho způsobů umělého zvláknování, pro výchozí přehled se nejčastěji jedná o následující metody [16]:

- Mokrý zvláknování – prekurzor je rozpuštěn, zvlákněn a poté vytvrzen v chemické lázni.
- Suchý zvláknování – obdoba předchozí metody, vytvrzuje se pomocí horkého vzduchu.
- Tavné zvláknování – výchozí suroviny jsou roztaveny, taženy přes trysky a ochlazeny.
- Gelové zvláknování – tažení roztoku polymerů za zvýšených teplot a zchlazení vodou.
- Sol-gel technologie – transformace koloidního roztoku na gel, který je dále zvlákněn.
- CVD technologie vláken – chemická depozice z plynné fáze na vláknový substrát.
- Elektrostatické zvláknování – vznik nanovláken tryskáním zkapalněných polymerů.
- Dloužení vláken – natahování a změna orientace pevného (již vláknitého) prekurzoru.

2.1.1 Skelná vlákna

Výroba skelných vláken začíná tavbou směsi SiO_2 a minoritních oxidů vápníku, sodíku, boru, nebo hliníku (Obr. 10). Tavení probíhá v plynových pecích při teplotách okolo 1 400 °C. Skelná tavenina vytéká působením gravitace skrze platinové trysky, pomocí jejichž otvorů se formují vlákna. Bezprostředně poté musí následovat chlazení vodou k dosažení amorfnní struktury. Nyní jsou vlákna zachycena a kontinuálně tažena pomocí cívek, jejichž úhlová rychlost určuje konečný průměr vláken. Vzniklá vlákna jsou velice křehká a náchylná k abrazivnímu opotřebení, proto musí být povrch před dalšími operacemi ošetřen tenkou vrstvou lubrikantu nebo škrobu. Po ošetření může začít navíjení a spojování vláken do větších svazků – pramenců či pletenců. Dokončením těchto operací se stává vrstva lubrikantu nepotřebnou, ba dokonce nežádoucí, neboť by způsobovala špatnou interakci mezi maticí a vlákny, a proto se povlak odstraňuje tepelným působením nebo pomocí ředidel. Z důvodu zlepšení stejných adhezivních sil lze poté nanést tenký film vazebného činidla, jež se po chemické stránce skládá z hydroxidu křemíku a organické funkční skupiny kompatibilní s polymerní maticí. Následuje už jen sušení a upravení vláken do finální formy – buď se sprádají ve tkaniny a rohože, nebo se nasekají do diskontinuální formy. Výroba končí zabalováním, kdy se kontinuální vlákna namotávají na kartonové tubusy a diskontinuální vlákna se kladou do polypropylenových obalů. Tyto finální fáze výroby jsou shodné pro většinu typů výztužných vláken. [7, 17]



Obr. 10: Schématické zobrazení výroby skelných vláken [3].

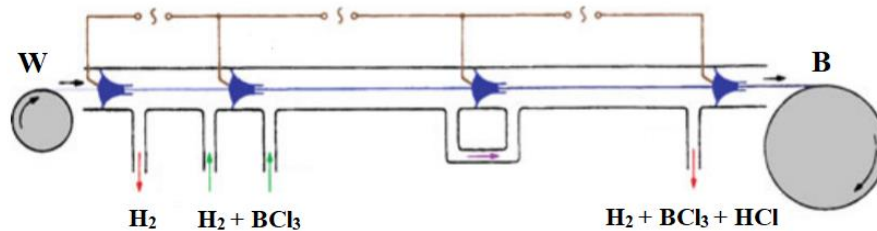
Vlastnosti skelných vláken [7, 13]:

- nízká cena,
- vysoká pevnost,
- dobrá rázová houževnatost,
- odolnost vůči chemikáliím,
- relativně nízké moduly pružnosti,
- podprůměrná únavová životnost.

V závislosti na chemickém složení se skelná vlákna vyskytují v různých modifikacích, z nichž nejběžnější je vlákno *E-glass* (dobré elektrické vlastnosti) nebo *S-glass* (vysoký obsah křemíku, dobrá pevnost). Skelné kompozity (GRP) našly široké využití například ve stavebním a chemickém průmyslu pro elektrické a tepelné obklady, izolace nebo nádoby. S GRP se také lze setkat jako s materiálem pro méně namáhané součásti vlaků, automobilů, či letadel. [3, 7]

2.1.2 Borová vlákna

Borová vlákna vznikají na základě CVD technologie. Zjednodušeně se nanáší povlak boru na wolframový (popřípadě uhlíkový) vláknový substrát, označovaný jako jádro. Průměr jádra je 10–12 μm a během procesu se zvýší na desetiny milimetru. CVD boru může probíhat dvěma způsoby, buď na bázi tepelného rozkladu hydridu boru, nebo redukcí halogenidu boru. První metoda je levnější, využívá uhlíkové jádro a borová vlákna díky tomu mají i menší hmotnost. V praxi je ale méně využívána pro nerovnoměrnost ve struktuře a nižší pevnost. Druhá metoda povlakování probíhá v tyčových reaktorech při teplotách okolo 1 000 $^{\circ}\text{C}$ (Obr. 11). Wolframové vlákno je kontinuálně vedeno pomocí kladek do reakční komory, kam je zároveň přivedena plynná směs vodíku a halogenidu boru. K vláknům je přiložen zdroj střídavého napětí a vzniká elektrický oblouk. Reakce začíná při zahřátí wolframu odporovým teplem, poté se povrch substrátu sytí borem. Výsledný průměr borových vláken je určen dobou reakce, tedy rychlosti navíjení kladek. Struktura je zase ovlivněna reakční teplotou. Důvodem ekonomické náročnosti výroby je spotřeba elektrické energie, vysoká cena halogenidů boru a nízká rychlost produkce, neboť v jednom reaktoru vzniká jen jedno vlákno. Nicméně struktura takto vzniklých vláken je význačně stejnoměrná a dosahuje dobrých mechanických vlastností. [3, 18]



Obr. 11: Schématické zobrazení výroby borových vláken [3].

Vlastnosti borových vláken [3] [13] [18]:

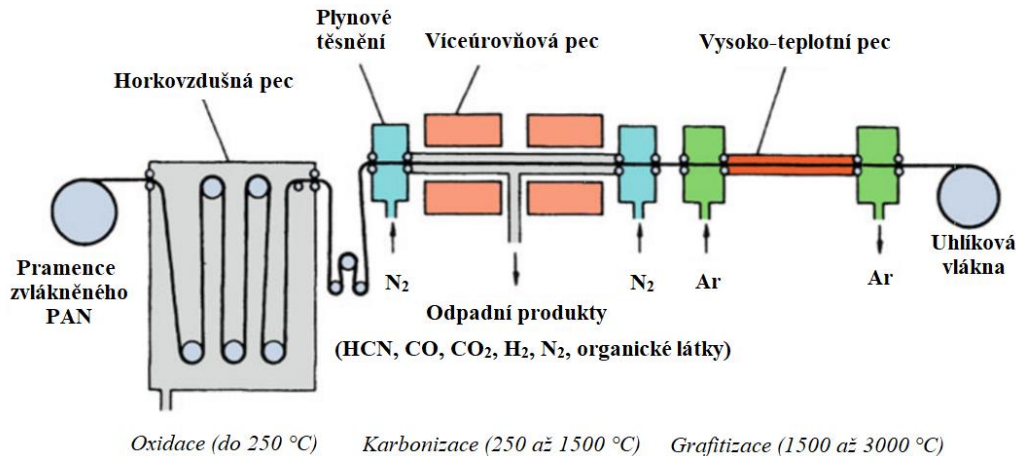
- vynikající pevnost,
- vysoká tuhost,
- vykazují pevnost i v tlaku,
- velmi vysoká cena,
- poměrně velký průměr vlákna,
- velká hustota,
- křehkost.

Vlákna jsou natolik křehká, že je nelze tkát. Z faktorů ovlivňujících efektivitu výztuže (uvedených dříve v této kapitole) vyplývá, že borová vlákna mají relativně nízkou účinnost výztužení. Uplatnění vláken proto závisí na přesnosti výroby, neboť výsledná pevnost je velmi ovlivněna množstvím strukturních poruch, což je zároveň jeden z důvodů vysoké ceny. A tak borová vlákna našla své specifické využití například v armádním letectví, nebo jako materiál golfových holí, tenisových raket a rámu bicyklů. Samostatnou oblastí je použití borových vláken na hybridní výztuže, kupříkladu komerční produkt *HY-BOR*[®] je téměř nedílnou součástí leteckých konstrukcí. [3, 18]

2.1.3 Uhlíková vlákna

Strukturu uhlíkových vláken tvoří krystalický uhlík a podle jeho obsahu se vlákna dělí na karbonová (okolo 95 procent uhlíku) nebo grafitová (více než 99 procent uhlíku). Alotropická modifikace uhlíku je grafit – atomy zaujímají hexagonálních uspořádání ve vrstvách. Výsledná tuhost vláken je dána silou kovalentních vazeb, jež působí mezi atomy v rovinách a silně též závisí na sousledném uspořádání vrstev. Prekurzorem při výrobě bývá nejčastěji *polyakrylonitril* (PAN), dále pak dehty (*pitches*), například *polyvinylalkohol* (PVA) nebo *polyimidy* (PI). Tyto látky mají velmi nízké tuhosti z důvodu neuspořádanosti rovin uhlíkových atomů. Základ výroby tedy spočívá ve zvláknění prekurzorů a v jejich tažení za zvýšených teplot. Vzniká tak struktura odpovídající vysokým hodnotám mechanických vlastností. [3, 7]

Výroba uhlíkových vláken se dle výchozího materiálu dělí buď na *PAN proces* nebo *Pitch proces*. Podstata Pitch procesu se příliš neliší, výsledná vlákna dosahují vyšších tuhostí, ale zato menších pevností. Při běžnějším PAN procesu (Obr. 12) dochází ke zvláknění prekurzoru pomocí rozpouštědel, poté se vlákna natahují a oxidačně stabilizují při teplotách do 250 °C. Po stabilizaci následuje karbonizace, během níž se vlákna pozvolně ohřívají v inertní atmosféře dusíku na teploty 1 000 až 1 500 °C. V průběhu tohoto děje se smršťuje průměr vláken, výrazně klesá hmotnost a zvyšuje se podíl uhlíku, neboť degradací polymerních řetězců zanikají vazby s vázanými molekulami. Nově vzniklá grafitická struktura obsahuje velmi jemná krystalografická zrna a je charakteristická významnou mírou pevnosti. K dosažení vyšší tuhosti může výroba pokračovat grafitizací, tedy zahřáním na teploty do 3 000 °C. Tuhost se zvyšuje díky změnám v uspořádání hexagonálních soustav uhlíku, které se, kvůli teplotě a tahovému napětí od navíjecích cívek, orientují do směru kolmého na osu vláken. Nicméně důsledkem vysokých teplot grafitizace hrubnou zrna, což má za následek snížení pevnosti. [7, 17]



Obr. 12: Schématické zobrazení výroby uhlíkových vláken (PAN proces) [3].

V závislosti na délce tepelného zpracování a velikosti teplot se uhlíková vlákna klasifikují na vysokopevnostní karbon (*HS-karbon*), intermediálně tuhý karbon (*IM-karbon*), vysoce tuhý grafit (*HM-grafit*) nebo ultra tuhý grafit (*UM-grafit*). Je faktem, že pro výrobu grafitových vláken je efektivnější Pitch proces, neboť při něm tuhost vláken s teplotou grafitizace neustále roste. Naopak u PAN procesu tuhost dosáhne svého maxima a poté při rostoucí teplotě klesá. Pro všechny typy vláken následuje po tepelném zpracování dvojitá úprava povrchu. Nejprve probíhá elektrolytická oxidace, dojde tak k navázání funkčních skupin podporujících adhezi s polymerní maticí, poté se aplikuje tenká vrstva pryskyřice na ochranu proti mechanické abrazi. Nakonec se vlákna formují do finální podoby a zabalují, obdobně jako u skelných vláken. [7, 17]

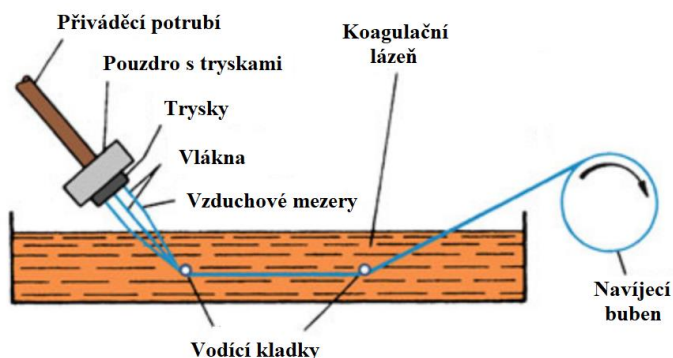
Vlastnosti uhlíkových vláken [3, 7]:

- vysoká pevnost,
- vynikající tuhost,
- mimořádné únavové vlastnosti,
- nízká hustota,
- teplotní a korozní odolnost,
- dobrá adheze k matricím,
- nízká pevnost v tlaku,
- vysoká cena,
- křehkost,
- nízké mezní prodloužení.

V dnešní době jsou uhlíková vlákna nejvyužívanějším typem vláken pro výkonnostní konstrukce. Uhlíkové kompozity již delší dobu plní funkce v leteckém a kosmickém průmyslu, například jako materiál pro trupy a křídla letadel nebo na pláště raketoplánů. Avšak díky stále nižší ceně je nalezneme třeba i ve sportovním odvětví (golfové hole, luky, rybářské pruty, lyže), v medicíně (kloubní implantáty) nebo energetice (lopatky větrných elektráren, turbín, kompresorů). [3, 7]

2.1.4 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou komerčně známa spíše pod názvem kevlar. Základem výroby je reakce *parafenyldiaminu* s *tereftaloyl-chloridem* v organickém rozpouštědlu. Kondenzací vzniká aramid, který je dále stlačován a natahován. Poté následují další chemické reakce s kyselinou sírovou. Nyní má polymer strukturu částečně orientovaného kapalného krystalu. Výroba pokračuje zahřáním aramidu na 100 °C a protlačováním skrze trysky (Obr. 13). Vznikají tak vlákna, která po okysličení a při ponoření do koagulační lázně tvrdnou a mají již stejnoměrnou orientaci. Nakonec probíhá opláchnutí kyseliny sírové v ředidle, sušení a spřádání. [3, 7]



Obr. 13: Schématické zobrazení výroby aramidových vláken [3].

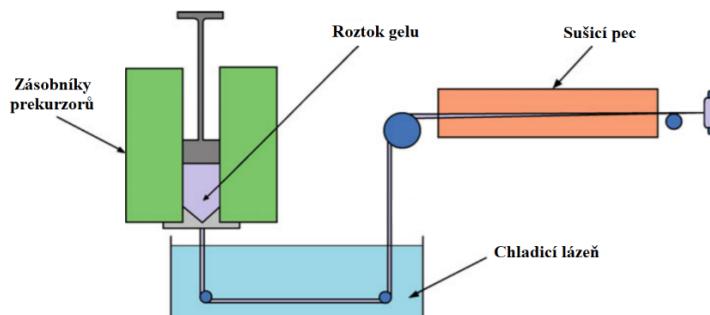
Vlastnosti aramidových vláken [7, 17]:

- vysoká tvrdost,
- absorpce kinetické energie,
- dobrá flexibilita,
- tepelná stabilita,
- průměrná pevnost,
- nízká tuhost,
- slabá adheze k matricím.

Pro aramidová vlákna doposud nebyla vynalezena vhodná povrchová úprava, tudíž hlavní nevýhodou zůstává slabá adheze k matricím. Jako další nevýhody se často uvádějí degradace UV zářením a tendence absorbovat vlhkost, nicméně vlhkost významné změny v mechanických vlastnostech nezpůsobuje a před UV zářením mohou být vlákna efektivně chráněna matricí. Protože aramidová vlákna nejsou křehká a jsou dobře ohebná, můžou být tkána pro výztužná vlákna neobvyklým způsobem, například zkroucením, stočením nebo pletením. Nejvýznamněji se využívají na výztuž balistických ochranných, ale i pro aplikace typu tlakových nádob, lan, částí raket nebo sportovního náčiní. [7, 17]

2.1.5 Polyetylenová vlákna

Polyetylenová vlákna vznikají zvlákněním gelu (vysoce viskózní kapaliny), který je chemicky identický polyetylenu využívanému ve spotřebním nebo potravinářském průmyslu. Proces se velmi podobá výrobě aramidových vláken. Gel je za zvýšených teplot rozpouštěn v ředidle (Obr. 14), poté dochází ke stlačení a kontinuálnímu tažení přes množství trysek, následované chlazením a navíjením. Struktura takhle vzniklých vláken se výrazně liší od běžně využívaného polyetylenu, neboť má orientovanou krystalickou strukturu. [7, 17]



Obr. 14: Schématické zobrazení výroby polyetylenových vláken [3].

Vlastnosti polyetylenových vláken [7]:

- vysoká pevnost,
- velmi nízká hustota,
- odolnost vůči mechanické abrazi,
- chemická stálost,
- podprůměrná tuhost,
- nízká teplota skelného přechodu.

Polyetylenová vlákna jsou známa pod obchodními názvy *Dyneema*[®] nebo *Spectra*[®], z nichž se v širokém rozmezí vyrábí lana a kabely, ale i neprůstřelné vesty, ochranné helmy a karoserie automobilů [19].

2.1.6 Keramická vlákna

Existují tři technologie výroby keramických vláken: CVD křemíkem, pyrolýza polymerů nebo sol-gel metoda. Poslední dvě zmíněné jsou poměrně nové technologie, při kterých se dosahuje keramické struktury z organicko-metalických polymerů. Avšak u všech metod lze najít určitou analogii k technologiím, které už zde byly diskutovány. Sol-gel je přeměna koloidní suspenze (sol) oxidů kovů na gel, jež je následovně zvlákněn a teplotně vytvrzen do polykrystalické, keramické struktury [20]. Touto metodou se vyrábí například vlákna oxidu hliníku pod obchodním názvem *Nextel*[™]. Pyrolýza polymerů se velmi podobá technologii výroby uhlíkových vláken, ale polymerní řetězce obsahují navíc křemík, dusík, nebo bor. Výsledným produktem jsou pak keramická vlákna o chemickém složení SiC, Si₃N₄, B₄C, či BN. Komerčně nejdůležitějším produktem pyrolýzy polymerů je *Nicalon*. Třetí metoda, CVD křemíkem, je analogická k výrobě borových vláken. Na uhlíková jádra se při vysoké teplotě (1 300 °C) nanáší povlak křemíku za vzniku silikon-karbonových vláken. [3, 17]

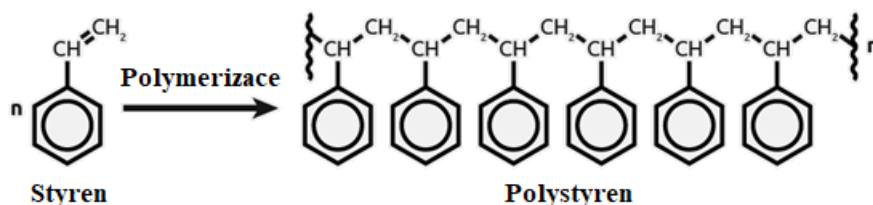
Vlastnosti keramických vláken [3]:

- vysoká pevnost a tuhost,
- žáruvzdornost a žárupevnost,
- odolnost vůči vlivům prostředí,
- velmi vysoká cena.

Aplikace keramických vláken získávají v posledních dekádách stále větší pozornost. Nalézají uplatnění například jako materiál pro komponenty letadlových motorů (spalovací turbíny, kompresory, výfukové trysky), dále jako součásti automobilů, plynových turbín, výměníků tepla, filtry horkých plynů a v neposlední řadě i jako těsnění nebo izolace [17].

2.2 Polymerní matrice

Strukturu polymerů tvoří organické sloučeniny vznikající na bázi chemických reakcí, výrazně se tak liší podstatou a komplexností od struktur kovových nebo keramických materiálů. Prekurzorem bývají roztoky nenasycených uhlovodíků či jiných organických látek o velmi nízké viskozitě a malé molekulární hmotnosti. Při výrobě stručně dochází ke spojování molekul (monomerů) do makromolekulárních řetězců (polymerů). Kompetentním příkladem polymerace může být reakce styrenu (Obr. 15), kde číslo n je tzv. stupeň polymerace a udává kolik monomerů je v makromolekule polymeru. Na základě vzniklé struktury lze polymery klasifikovat na *termosety* (Kap. 2.2.1) nebo *termoplasty* (Kap. 2.2.2). [3, 15]



Obr. 15: Strukturální schéma polymerační reakce [21].

Jelikož každá vlastnost materiálu vychází z mikrostruktury, tak i mechanické chování polymerů je určeno rozměry, složením a vazebnou interakcí makromolekul. Zvláště specifická se jeví senzitivita polymerů na změny teplot, což je důsledek malé disociační energie vazeb, které drží pohromadě makromolekuly. Ke konkrétním zvláštnostem patří například teplota skelného přechodu, silně teplotně závislý modul pružnosti nebo creepové chování. [3, 22]

Teplota skelného přechodu

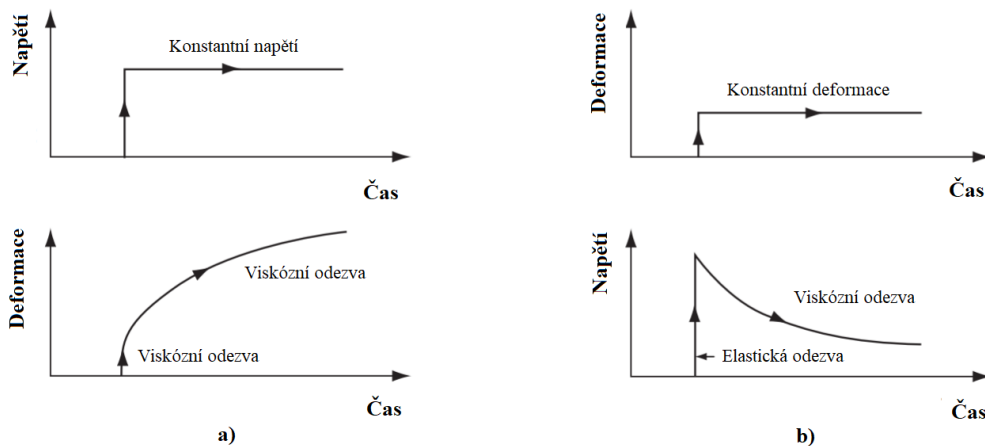
V závislosti na teplotě se polymery vyskytují v různých fázových stavech. Kromě teploty tání (T_m), tak jak je známá u kovů, existuje u polymerů v pevném skupenství navíc teplota skelného přechodu (T_g), v jejímž průběhu se také výrazně mění mechanické vlastnosti materiálu. Typicky platí, že $T_g = 0,5$ až $0,75 T_m$ a při vyšším stupni polymerace hodnoty vzrůstají. Tyto dvě teploty zároveň určují fyzikální stavy. Polymer je při teplotách pod T_g ve sklovitém stavu, mezi teplotami T_g a T_m je v kaučukovitém stavu a při teplotách nad T_m je ve stavu viskoplastickém (zdali struktura umožňuje kapalné skupenství). [23, 24]

Deformační chování

Rovněž napětově-deformační charakteristika je silně závislá na teplotách. Ve sklovitém stavu se polymery deformují jako křehký materiál, v kaučukovitém stavu se chovají viskoelasticky a po teplotě varu je lze charakterizovat jako vysoce viskózní kapaliny. Modul pružnosti s rostoucí teplotou klesá a při překročení T_g se může skokově snížit až na pětinou hodnotu. Taktéž je nutné poznamenat, že v případě plastických deformací, pro krystalické polymery platí stejné mechanismy jako pro kovy, tedy skluz dislokací nebo dvojčatění. [3]

Creep a relaxace napětí

I když jsou polymery ve sklovitém stavu, stále vykazují určité viskoelastické chování, které se projeví při creepovém nebo relaxačním testu (Obr. 16). Během zkoušky creepu je vzorek namáhán konstantním napětím, polymery se prodlužují s určitou časovou prodlevou a deformace jsou dále funkcí času. Při testu relaxace je naopak dosaženo konstantních deformací za současného, časově proměnného napětí. Oba testy se provádí pro různé konstantní teploty. U viskoelastických materiálů můžeme pozorovat nejprve elastickou deformační odezvu, následovanou viskózní odezvou. Z obecného hlediska platí, že termosety vykazují menší creep nebo relaxaci napětí než termoplasty a se zvyšující se provozní teplotou mají tyto charakteristiky výrazně vyšší vliv na funkčnost součástí. [15]



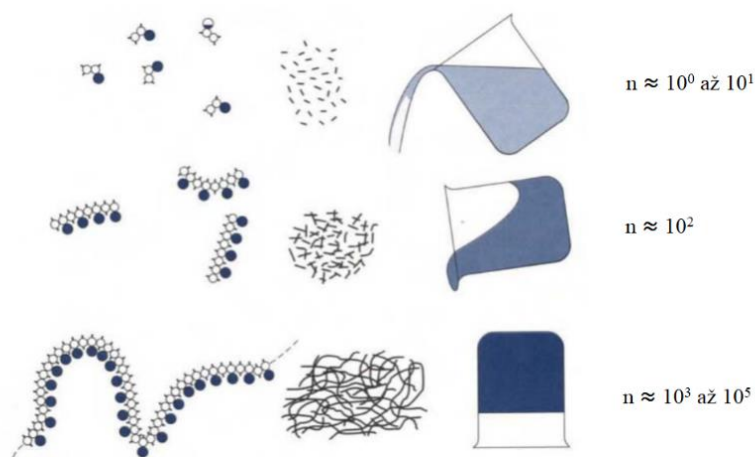
Obr. 16: a) Creepové chování a b) relaxace napětí polymerů [15].

Viskozita

Celková vnitřní pohyblivost molekul je charakterizována pomocí makroskopické vlastnosti materiálu známé jako viskozita (η) udávána v Pa·s. Čím nižší hodnota viskozity, tím snadněji se materiál deformuje, nebo teče při smykovém napětí. Pro polymerní materiály je široce využívané aproximační vyjádření viskozity pomocí *Williams-Landel-Ferryho* rovnice [24]:

$$\eta = \eta_0 \exp\left[-\frac{17,4(T - T_g)}{51,6 + (T - T_g)}\right] \quad (9)$$

Kde $\eta_0 = 10^{12}$ Pa·s, T je teplota polymeru v kelvinech a T_g teplota skelného přechodu taktéž uvedená v kelvinech. Je nutné podotknout, že viskozita polymeru je skrze T_g taktéž závislá na stupni polymerace (obr. 17) [22].



Obr. 17: Závislost viskozity na stupni polymerace [24].

Maximální provozní teplota

Z výše uvedených charakteristik vyplývá, že selekce polymerních matric je podřízena především teplotami. V praxi také musí být dosažen určitý koeficient bezpečnosti provozní teploty vůči teplotě T_g , neboť pro využití většiny polymerních matric se předpokládá sklovitý stav (neplatí pro některé termoplasty, které se využívají i v kaučukovitém stavu). V souvislosti s touto záležitostí jsou níže uvedeny (Tab. 2) maximální provozní teploty (T_{max}) a T_g pro různé druhy využívaných polymerů [15].

Tab. 2: Maximální provozní teploty pro vybrané polymerní matrice [15].

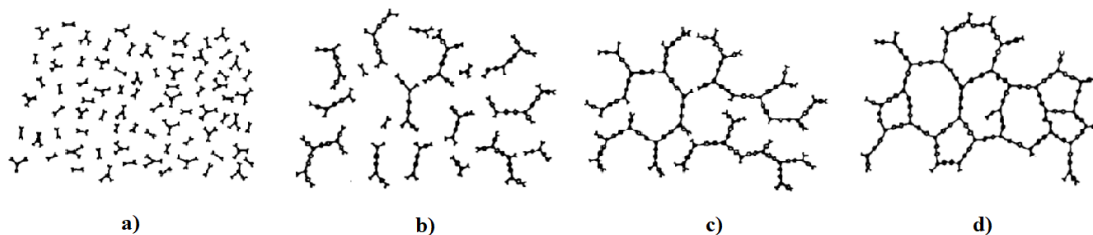
	Polymer	Teplota skelného přechodu T_g [°C]	Maximální provozní teplota T_{max} [°C]
Termosety	Epoxid DGEBA	180	125
	Epoxid TGDDM	240–260	190
	BMI (Bismaleimid)	230–290	232
	PMR-15	340	316
	ACTP (Acetylen-terminated polyimid)	320	280
Termoplasty	PEEK (Polyetheretherketon)	143	250
	PPS (Polyfenylensulfid)	85	240
	PSU (Polysulfon)	185	160
	PEI (Polyetherimid)	217	267
	PAI (Polyamid-imid)	280	230
	Polyimid K-III	250	225
	Polyimid LARC-TPI	265	300

Ačkoliv potenciál využití polymerních matric výrazně limitují teplotní podmínky, tak stále patří mezi nejvyužívanější typy matric vláknových kompozitů. Jejich výhodou je nízká hustota, cena nebo odolnost vůči anorganickým rozpouštědlům a procesním kapalinám. Matrice při přesných a vysoce-výkonnostních aplikacích musí navíc splňovat mimořádné požadavky na [15]:

- vysoký modul pružnosti v tahu, který ovlivňuje výslednou pevnost kompozitu,
- vysokou mez pevnosti, jež zamezuje vznik trhlin v kompozitu,
- vysokou lomovou houževnatost, která zabraňuje delaminaci a šíření trhlin.

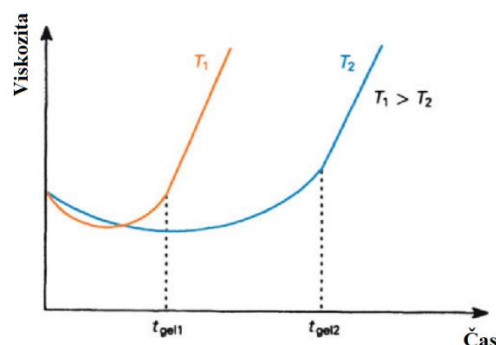
2.2.1 Termosetické matrice

Termosety vznikají při sérii chemických reakcí, při tzv. vytvrzování (Obr. 18). Nejprve dochází k syntéze monomerů z roztoku organických látek a vazebných činidel. Vzniklé sloučeniny se působením vhodného iniciátoru (teploty, tlaku, vzduchu, nebo elektromagnetického záření) stávají vůči sobě reaktivní a jsou schopny se slučovat. Poté následují polyadiční nebo polykondenzační reakce pro řetězení a prostorové spojení makromolekul. Vzniká tak trojrozměrná zesítená struktura, jež z makroskopického hlediska nabývá na viskozitě a tuhosti se současným úbytkem objemu. Výsledné množství vazeb a hustota struktury je určena relativním zastoupením vazebných činidel v roztoku prekurzorů. Vytvrzování termosetů je ireversibilní, po ztuhnutí jsou tepelně stabilním materiálem, u něhož nelze dosáhnout teploty tavení, ale předchází ji tepelný rozklad (za přítomnosti kyslíku shoří). S tímto faktem také souvisí problematika nerecyklovatelnosti. [3, 15]



Obr. 18: Fáze vytvrzování termosetu: a) roztok prekurzorů, b) vznik monomerů, c) řetězení polymerů (gelace), d) zesítení struktury [7].

Důležitým faktorem z hlediska výroby kompozitů je nízká viskozita matrice během spojování výztužných fází. Důvodem je správné prosycení a docílení synergického efektu. Z tohoto pohledu jsou termosetické matrice efektivní, neboť z počátku vytvrzování poklesne jejich viskozita (Obr. 19). Tato anomálie je způsobena exotermickou povahou vytvrzujících reakcí, kdy vliv tepelné energie na viskozitu převažuje nad zvětšující se stupněm polymerace. Doba, při níž viskozita začne prudce růst se označuje jako doba gelace (t_{gel}). Celkový čas vytvrzování (t_{cure}) je určen okamžikem, kdy dojde k zreagování veškerého obsahu vazebného činidla. Rychlost vytvrzování se s rostoucí teplotou zvyšuje, a naopak při zchlazení je možné chemické reakce termosetu zastavit, což je i podstata uskladnění kompozitních polotovarů před výrobou součástí. [3, 5]



Obr. 19: Závislost viskozity na čase při vytvrzování pro dvě rozdílné teploty [3].

Použití termosetů je obecně výhodné z hlediska tepelné stability, odolnosti vůči chemikáliím a dobré interakce s vlákny. Mezi negativa se řadí nízké mezní prodloužení, které způsobuje náchylnost k delaminaci při rázovém zatížení. Nevýhodou je také již zmíněná nerecyklovatelnost nebo skladovací podmínky prekurzorů, jež jsou reaktivní i za standardní teploty a tlaku, tudíž musí být uloženy ve chladicích zařízeních. Termosety jsou často označovány jako syntetické pryskyřice a v závislosti na složení prekurzoru je můžeme dělit na polyester, vinylester, epoxidy, bismaleimidy, polyimidy nebo fenoly. Jejich přibližné hodnoty mechanických vlastností a cen jsou zobrazeny v následující tabulce (Tab. 3). [7]

Tab. 3: Vlastnosti termosetických matric [9, 15].

Druh matrice	Hustota ρ [kg/m ³]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Poissonova konstanta μ [-]	Mez pevnosti σ_p [MPa]	Smrštění objemu při vytvrzování δV [%]	Mezní poměrné prodloužení ϵ_{max} [%]	koeficient teplotní roztažnosti α [1/°C]	koeficient tepelné vodivosti λ [W/mK]	Měrná tepelná kapacita c [J/kgK]	Cena [Kč/kg]
Polyester	1 200	4	0,4	80	6–12	2,5	$8 \cdot 10^{-5}$	0,2	1 400	200–300
Vinylester	1 150	3,3	0,4	75	5–10	4	$5 \cdot 10^{-5}$	0,2	1 300	250–400
Epoxid	1 200	4,5	0,4	130	1–5	3	$11 \cdot 10^{-5}$	0,2	1 000	400–800
Polyimid	1 400	4–19	0,35	70	-	1	$8 \cdot 10^{-5}$	0,2	1 000	600–1 000
Fenol	1 300	3	0,4	70	-	2,5	$1 \cdot 10^{-5}$	0,3	1 000	-

Polyesterové a vinylesterové pryskyřice

Vytvrzují se reakcí polyesteru, styrenu a iniciátoru na bázi peroxidů. Jejich výhodou je nízká viskozita, rychlost vytvrzení a cena. Během výroby nicméně dochází k velkému smrštění objemu, což může vést k výskytu zbytkového napětí ve struktuře. Polyestery a vinylestery se v kompozitech vyskytují nejčastěji se skelnými vlákny a používají se na součásti automobilů nebo lodí. [3, 7]

Epoxidové pryskyřice

Výchozí látkou epoxidových pryskyřic bývá především *diglycidylether bisfenolu A* (DGEBA) a vazebné činidlo *diethylenetriamin* (DETA). Epoxidy jsou dražší než polyestery, ale pevnější, lépe se vážou k vláknům a během vytvrzování se méně smršťují. V současnosti zastávají dominantní funkci matric v oblasti výkonnostních aplikací do provozních teplot 130 °C, používají se například v leteckém i kosmickém průmyslu. Pro vyšší teplotní meze se vyskytují epoxidy na bázi *tetraglycidylodiaminodifenylmethanu* (TGDDM) a vazebného činidla *diaminodifenylsulfonu* (DDS). [7, 15]

Bismaleimidové pryskyřice

Bismaleimidy jsou nehořlavé matrice poskytující dobré mechanické vlastnosti do 230 °C. Tyto pryskyřice byly primárně vyvinuty na aplikace, pro které epoxidy již nesplňují teplotní limity. Používají se taktéž v kosmickém průmyslu a civilním nebo armádním letectví. [25]

Polyimidové pryskyřice

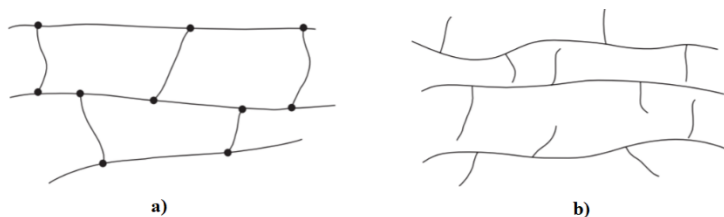
Polyimidové pryskyřice patří k tepelně nejodolnějšímu typu polymerních matric. Komerčně nejdůležitějšími polyimidy jsou ACTP, nebo například PRM-15, který si zachovává své mechanické vlastnosti i při 300 °C. Z důvodu náročnosti a délky výroby je nevýhodou polyimidů vysoká cena. Během posledních 30 let byly tyto syntetické látky předmětem výzkumu především agentury NASA pro posílení programu vývoje civilního letectví. [7]

Fenolové pryskyřice

Fenolové pryskyřice vznikají polykondenzací fenolu a formaldehydu. Zásadou nízké hořlavosti a nepatrné produkce spalin při hoření se fenolové pryskyřice využívají převážně na interiéry letadel a díky vynikající odolnosti vůči abrazi se navíc hodí i jako materiál tepelných štítů kosmických těles. [7, 26]

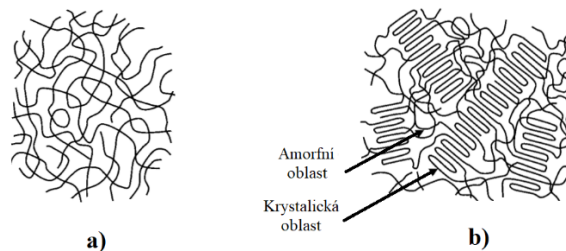
2.2.2 Termoplastické matrice

Technologický proces výroby termoplastů je jednoduchý, základem je chlazení roztavených prekurzorů. Obdobně jako u termosetů dochází k polymeraci, nicméně makromolekuly vytváří pouze lineární uskupení bez prostorového zesílení (Obr. 20). Polymerní řetězce jsou vůči sobě upevněny jen pomocí tzv. sekundárních kovalentních vazeb, tedy pomocí van der Waalových sil nebo vodíkových vazeb. Vzniklý termoplast je tepelně nestabilní, neboť při zahřívání tyto mezimolekulární interakce zanikají. Makromolekuly se poté mohou v rámci struktury přemístit a po ochlazení zaujmout novou konfiguraci. Termoplasty tudíž lze opakovaně tepelně zpracovávat (*thermoforming*) a recyklovat, avšak jejich vlastnosti v závislosti na čase tepelného působení postupně degradují. [3, 7]



Obr. 20: Konfigurace vazeb makromolekul: a) termosetů, b) termoplastů [15].

Struktury termoplastů a termosetů se liší rovněž z hlediska rozměrů a uspořádání makromolekul. Lineární řetězce termoplastů jsou delší a mají všeobecně vyšší molekulární hmotnost, důsledkem čehož dosahují výrazně vyšších mezních prodloužení a jsou schopny absorbovat více kinetické energie. Uspořádání makromolekul závisí na technologiích výroby, primárně na rychlosti vytvrzení nebo ochlazení. Na rozdíl od pravidelné struktury termosetů se v termoplastech vyskytuje určitý podíl amorfních a krystalických oblastí (Obr. 21). Poté se hovoří o tzv. stupni krystalinity. V praxi se konkrétně u termoplastických maticí dosahuje 30 až 90 procent krystalinity. Stupeň krystalinity je důležitý z hlediska odolnosti vůči rozpouštědlům a tuhosti, které se s rostoucím množstvím krystalů zvyšují, avšak na úkor tvrdosti. [3, 15]



Obr. 21: Porovnání: a) amorfní a b) semikrystalické struktury termoplastů [7].

Hlavní mechanickou předností termoplastů je lomová houževnatost, odolnost vůči mikrotrhlinám a delaminaci kompozitního materiálu. Mezi další výhody patří [15]:

- neomezená délka skladování při pokojové teplotě,
- kratší výrobní proces a jednoduchá manipulace,
- termoforming a recyklovatelnost,
- opravitelnost součástí.

Kvůli těmto důvodům byly investovány již stovky milionů dolarů pro zrychlení vývoje a nahrazení termosetů. Avšak navzdory snahám a investicím se termoplasty podařilo zastoupit jen malou část komerční produkce vláknových kompozitů, neboť svými vlastnostmi stále nemohou konkurovat například epoxidovým pryskyřicím (Tab. 4). [7]

Tab. 4: Vlastnosti termoplastických matic [9, 15].

Druh matrice	Hustota ρ [kg/m ³]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Poissonova konstanta μ [-]	Mez pevnosti σ_p [MPa]	Smrštění objemu při vytvrzování δV [%]	Mezní poměrné prodloužení ϵ_{max} [%]	koeficient teplotní roztažnosti α [1/°C]	koeficient tepelné vodivosti λ [W/mK]	Měrná tepelná kapacita c [J/kgK]	Cena [Kč/kg]
PEEK	1 300	4	0,4	80	0,5–1,5	50	$5 \cdot 10^{-5}$	0,3	1 340	200–300
PP	900	1,2	0,4	30	1–3	20–400	$9 \cdot 10^{-5}$	0,2	1 300	100–250
PPS	1 300	4	0,4	65	0,6–1,4	100	$5 \cdot 10^{-5}$	0,3	1 200	-
PA	1 100	2	0,35	70	-	70–200	$8 \cdot 10^{-5}$	0,25	1 000	300–500
PES	1 350	3	-	85	-	60	$6 \cdot 10^{-5}$	-	-	1 000–1 200
PEI	1 250	3,5	-	105	-	60	$6 \cdot 10^{-5}$	0,2	-	800–1 000

2.3 Výroba kompozitů

Termosetické kompozity vznikají mechanickým mísením matrice s výztuží následované zpevněním skrze vytvrzující reakce. Z obecného hlediska se tedy výroba skládá ze tří etap: laminování, sycení a vytvrzování. Tyto procesy na sebe většinou přímo navazují, všechny tři etapy také obvykle probíhají ve stejné tvarovací formě. Zvláštností jsou tzv. *prepregy*, což jsou plátka smíšeného, ale plně nevytvrzeného kompozitu, která jsou skladována a až s odstupem času vytvrzena ve formách jiným výrobcem. Samotné vytvrzování kompozitu je otázka hlavně matic (Kap. 2.2.1). Vytvrzení může probíhat za pokojové teploty a za atmosférického tlaku, při podtlaku vakua nebo v autoklávu. [3, 4]

V praxi se vyskytuje několik desítek metod výrob kompozitů. Kritéria pro výběr vhodné technologie záleží na rychlosti produkce, ceně, kvalitě prosycení a velikosti nebo tvaru kompozitní součásti. Jednotlivé metody jsou více či méně vhodné právě z hlediska těchto kritérií. [36]

Nejběžnější metody výroby kompozitů jsou:

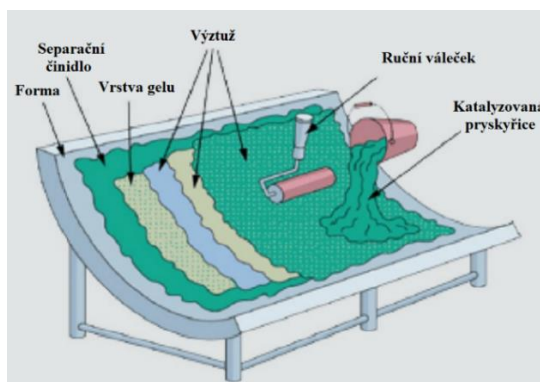
- mokré kladení,
- vstříkávání,
- infuze,
- navíjení,
- pultruze.

Mísení termoplastické matrice s výztuží je výrazně náročnější kvůli vysoké viskozitě prekurzorů. Nicméně některé metody se komerčně prosazují, jedná se vždy o termoplastické prepregy. Jejich výhodou je časově neomezená skladovatelnost bez speciálních požadavků. Výroba kompozitů pak probíhá při aplikaci tepla a tlaku. [15]

Pro všechny vláknové kompozity je aplikováno pravidlo, že vlákna mohou tvořit maximálně 70 procent objemu kompozitu, neboť při vyšším procentu je již přítomno malé množství matrice pro odpovídající podporu výztuže [7].

2.3.1 Mokrý kladení

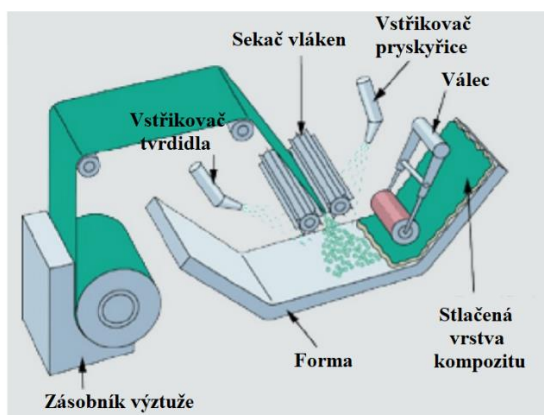
Mokrý kladení je jednoduchá a široce rozšířená metoda v celé řadě průmyslových odvětví. Nejdříve se na povrch formy aplikuje separační činidlo, na které se obvykle nanáší ještě vrstva gelu, tzv. *gelcoat*, který obsahuje pigmenty a plniva pro ochranu nebo dekorativní vzhled povrchu součásti. Poté již dochází k laminování, nanesení pryskyřice a rozprostření pomocí ručního válečku nebo štětce (Obr. 22). Prosycení vláken je v tomto případě nedokonalé a nerovnoměrné, často se také tvoří vzduchové bubliny. Výhodou je nízká ekonomická náročnost technologie a možnost produkce součástí komplexních tvarů. [4]



Obr. 22: Ilustrace mokrého kladení [17].

2.3.2 Vstřikování

Při vstřikování se do otevřené formy nanáší směs nasekaných vláken, pryskyřice a tvrdidla pomocí vstřikovací pistole (Obr. 23). Kontinuální dávkování pistole matricí je zajištěno přívodními hadicemi, nebo napojením zásobníků. Výztuž je obvykle přiváděna do pistole ve formě dlouhých vláken a v ní pomocí zabudovaného sekáčku zkrácena. Po nanesení vrstev musí být kompozit stlačen válcem, obdobně jako u mokrého kladení. Vstřikování je velmi rychlá metoda výroby kompozitů, která umožňuje automatizaci, avšak kvůli diskontinuálním vláknům se skrze ni dosahuje nízkých pevností a kvality prosycení, která je srovnatelná s produkty mokrého kladení. [15]

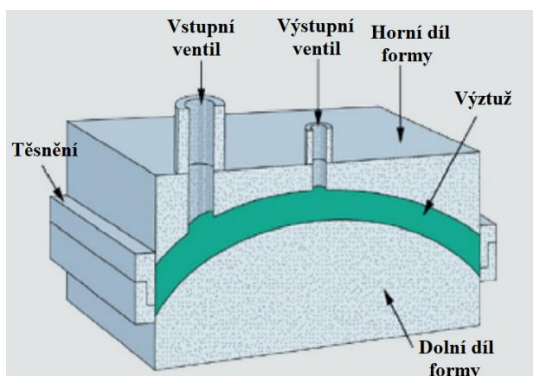


Obr. 23: Ilustrace vstřikování [17].

2.3.3 Infuze

Podstatou infuze je proudění pryskyřice přes výztuž v uzavřené a utěsněné formě. Proudění je vyvoláno buď přetlakem (RTM), nebo vakuem (VARTM). Při infuzi se obecně dosahuje vynikajícího prosycení a dobrých mechanických vlastností kompozitu. [3]

Povrch formy je potřeba nejprve ošetřit separátorem a nalaminovat na něj suchou výztuž. Pro RTM se využívá dvoudílná forma s kompresorem (Obr. 24), po utěsnění formy dochází k proudění pryskyřice pomocí přetlaku 2,5–6 atm. Prosycení je rovnoměrné, pryskyřice proudí od vstupního ventilu k výstupnímu a vytlačuje před sebou vzduchové bubliny. Na výstupní ventil je připojena nádoba pro zachycení přebytečné pryskyřice. Infuze je ukončena vytlačení všech vzduchových bublin, kdy z výstupního ventilu proudí pouze pryskyřice. [3, 4]

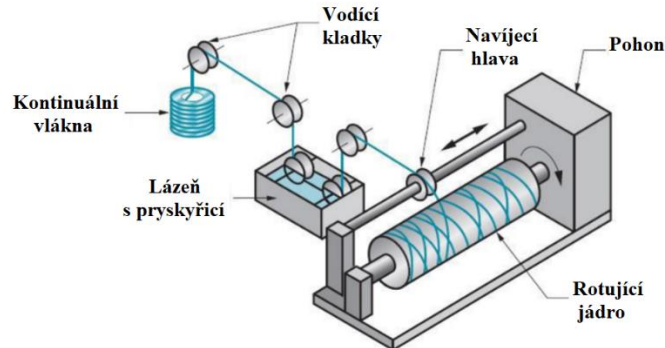


Obr. 24: Ilustrace infuze [17].

Odlišnost metody VARTM je v použití jednodílné formy přikryté vakuovým pytlkem, ze kterého je odsán vzduch pomocí vzduchového čerpadla. Po vytvoření vakua je otevřen ventil napojený na zásobník s pryskyřicí a dochází k sycení výztuže skrze nasávání pryskyřice. Opět je nutné zajistit na výstupním ventilu zachycovač přebytečné pryskyřice. [17]

2.3.4 Navíjení

Metoda navíjení slouží k výrobě rotačně symetrických součástí. Navíjejí se například hřídele, golfové hole, tlakové nádoby, kryty raket a motorů. Princip je založen na vedení pramence vláken přes lázeň s pryskyřicí a na navíjení rotujícím jádrem (Obr. 25). Orientace vláken je určena příčným pohybem navíjecí hlavy. [17]

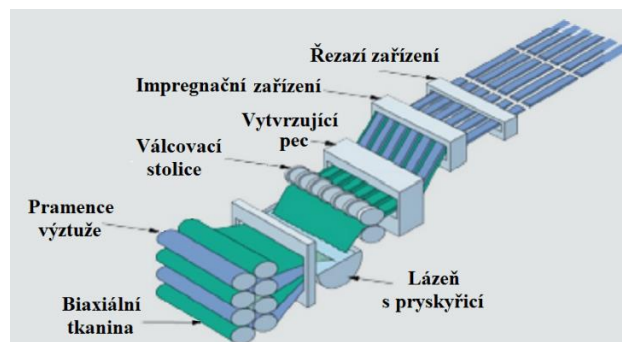


Obr. 25: Ilustrace navíjení [37].

Výhodou této technologie je hlavně přesnost, opakovatelnost a rychlost produkce, obvykle lze navíjet 45–180 kg/h. Navíc téměř neplatí rozměrová omezení, navíjením se například zhotovují součásti o průměru 25 mm až 6 m, což samozřejmě závisí na rozměru jádra. [7]

2.3.5 Pultruze

Technologie pultruze je primárně určena pro výrobu kompozitních profilů. Využívá se výztuž ve formě kontinuálních vláken smíšených s biaxiálními tkaninami, které ve struktuře zajišťují příčnou pevnost. Nejprve je výztuž máčena a prosycena pryskyřicí, poté následuje válcování na profilových válcovacích stolicích, sušení, impregnace povrchu, a nakonec řezání požadovaných délek profilů (Obr. 26). [3]



Obr. 26: Ilustrace navíjení [17].

I když největší výhodou pultruze je ekonomická efektivita, musí být nejprve překonány náklady na zahájení procesu, které jsou značně vysoké. Pultruze je proto využívána především ve velkosériové výrobě pro produkci profilů o stejném příčném průřezu. [7]

3 TECHNOLOGIE LEPENÍ

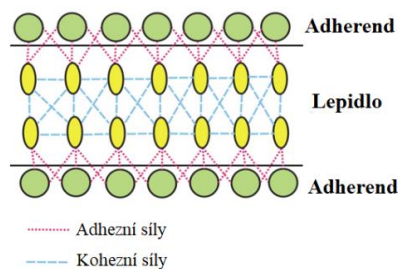
Lepení je nejuniverzálnější spojovací technologie, která umožňuje spojení součástí z plastů, kovů, keramiky, dřeva a kompozitů. Nové generace lepidel nabízejí vhodnou alternativu pro spojení konstrukcí tam, kde jsou mechanické nebo svarové spoje nevhodné. Princip lepení spočívá v aplikování lepidel (*adheziv*) na povrch lepených součástí (*adherendů*) [6]. Z technologického hlediska kvalita lepeného spoje závisí na čtyř faktorech [27]:

- návrh vhodné konstrukce lepené spáry,
- správná úprava povrchu adherendu,
- nízká viskozita lepidla při aplikaci,
- schopnost lepidla vytvrzujících reakcí.

Řešení těchto problémů je mnohdy neintuitivní, a tak adhezivní inženýrství vyžaduje jisté znalosti z oblasti chemie, vědy o materiálech, mechaniky nebo konstruování [28]. Základní názvosloví a definice technologie lepení lze nalézt v normě ČSN EN 923 [29].

3.1 Teorie lepení

Podstatu lepení je nutné hledat na molekulární úrovni, jelikož pevnost lepeného spoje je založena na kombinaci tzv. kohezních a adhezních interakcí (Obr. 27). Koheze je silové působení mezi molekulami lepidla navzájem a je tvořena chemickými vazbami. Oproti tomu adheze vzniká důsledkem mechanismů na rozhraní lepidla a adherendu, konkrétně se jedná o fyzikální děje jako adsorpce, difúze nebo elektrostatická přilnavost. [30]



Obr. 27: Molekulární interakce v lepeném spoji [31].

Koheze neboli vnitřní pevnost lepidla vychází z míry vytvrzení lepidla [30]. Protože převážná většina konstrukčních lepidel je založena na bázi syntetických polymerů, podstata reakcí je totožná jako u polymerních matric (Kap. 2.2): termosetická lepidla se vytvrzují zesílením struktury, termoplastická lepidla se vytvrzují fyzikálně-chemickým procesem chlazení roztaveného polymeru.

Sílu adheze ovlivňuje dobrá smáčivost lepidel a velikost lepené plochy. Smáčivost lepidla je schopnost prosytit povrch adherendů. Během lepení musí být povrchové napětí adherendů vyšší než kohezní síly, které se naopak snaží molekuly lepidla uspořádat do tvarů s minimálním povrchem. Při špatném prosycení zůstávají v lepeném spoji molekuly kyslíku, jež negativně ovlivňují pevnost. Tento problém lze vyřešit buď úpravou povrchu (zvýšením povrchové energie adherendů), nebo snížením kohezních sil (použitím lepidla s nižší viskozitou). [30]

Dalším faktorem síly adheze zůstává velikost lepené plochy, ta je závislá i na drsnosti povrchu. Obecně platí, že při vyšších hodnotách střední aritmetické úchytky profilu (R_a) je adheze pevnější. Nicméně tato zásada má určité limity. Uvádí se, že některá lepidla s vysokou počáteční viskozitou nemusí správně prosytit povrch s drsností nad R_a 6,3 μm . [28]

3.2 Lepidla

Lepidla jsou nekovové látky schopné spojovat materiál a lze je dále klasifikovat na základě chemického složení, fyzické formy, způsobu vytvrzování nebo funkce. V závislosti na těchto charakteristikách se na trhu vyskytuje široký sortiment lepidel. [30]

Klasifikace podle chemického složení:

- přírodní polymery (škroby, dextry, proteiny, přírodní kaučuky),
- syntetické polymery (epoxidy, akryly, polyuretany),
- anorganická lepidla (silikony, silikáty).

Klasifikace podle fyzické formy:

- tekutá lepidla (pasty, roztoky, pěny, filmy),
- pevná lepidla (tyčinky, tablety, fólie),
- lepicí pásky (transferové, pěnové).

Klasifikace podle způsobu vytvrzování:

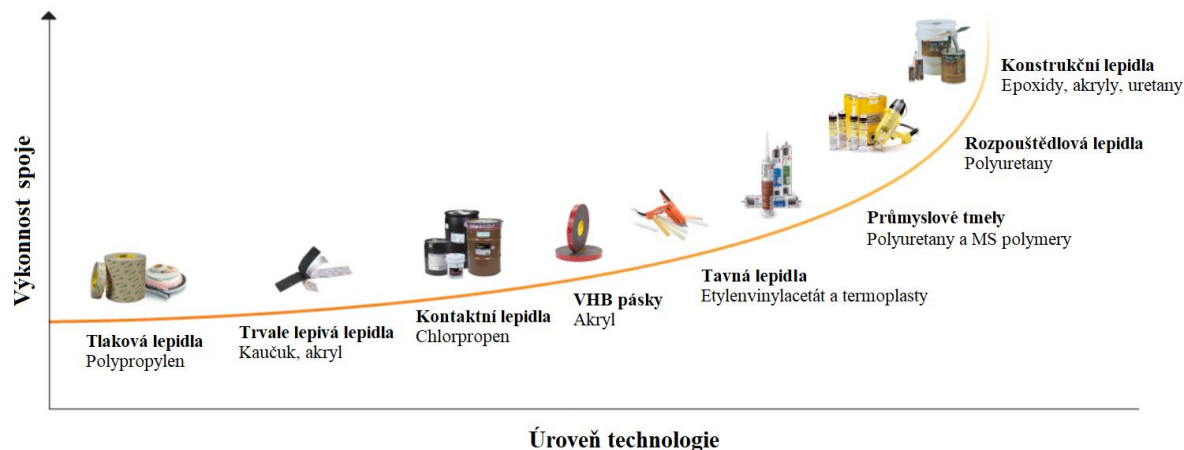
- reaktivní/dvousložková lepidla (chemickou reakcí),
- fyzikálně tuhnutí lepidla (vlivem tepla, záření, nebo vlhkosti),
- kontaktní lepidla (vsáknutím a odpařením rozpouštědel),
- tlaková lepidla (stlačením lepidla na adherend),
- anaerobní lepidla (vytvrzením bez přístupu kyslíku),
- tavná lepidla (ztuhnutím taveniny).

Klasifikace podle funkce:

- konstrukční lepidla (vysoká pevnost do teploty T_g),
- těsnící tmely (vyplnění spár, izolace, těsnění proti nečistotám nebo úniku kapalin),
- vodivá lepidla (zábrana akumulace elektrického náboje a vedení elektrického proudu).

3.2.1 Volba lepidla

Výběr vhodného průmyslového lepidla lze uskutečnit na základě pravidla ASPEC (*Assembly, Substrate, Process, End use, Cost*). Volba lepidla je tak založena na funkci spoje, druhu podkladu, technologických podmínkách, konečném využití a na ceně [28]. Pravidlo konečného využití konkrétně pro konstrukční lepidla znamená vysokou únosnost spoje nebo tvarovou stálost v závislosti na teplotách a vlhkosti. Z tohoto pohledu jsou nejvýkonnější epoxidy a jiné syntetické polymery (Obr. 28) [27]. Níže jsou pak zobrazeny poměrné srovnání charakteristik nejdůležitějších konstrukčních lepidel (Tab. 5).



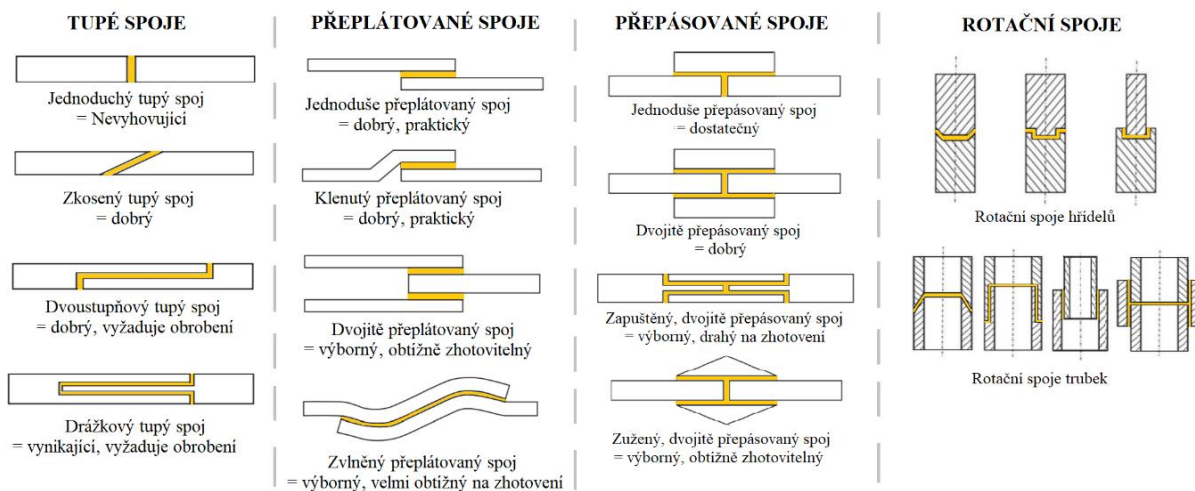
Obr. 28: Relativní porovnání pevností odlišných technologií lepení [28].

Tab. 5: Srovnání vlastností konstrukčních lepidel [28].

Vlastnost spoje	Epoxidy	Akryly	Uretany
Pevnost při lepení kovů	vynikající	slabá až vysoká	průměrná
Pevnost při lepení plastů	průměrná	vynikající	průměrná
Pevnost při lepení kompozitů	vynikající	vysoká	vysoká
Pevnost v odlupování	slabá až dobrá	slabá až dobrá	dobrá
Rázová houževnatost	špatná až dobrá	průměrná	dobrá
Ohebnost	špatná až dobrá	špatná až dobrá	vynikající
Teplotní odolnost	vynikající	průměrná	průměrná
Odolnost vůči rozpouštědlům	vynikající	průměrná	vysoká

3.3 Zásady pro návrh lepeného spoje

V ideálním případě by měl být lepený spoj namáhán pouze smykovým napětím. Normálová napětí jsou nežádoucí, neboť při nich adheze a koheze nespolečně působí. Například při ohybu dochází ke koncentraci napětí v místě hraniční čáry, obvykle na okraji spoje. Poté nastává tzv. odlupování, kdy pevnost spoje závisí pouze na síle koheze [6]. Existují proto příručky a obecné zásady pro návrh tvaru spoje, aby se nepřijatelnému způsobu namáhání předcházelo (Obr. 29).



Obr. 29: Konstrukční řešení lepených spojů [27].

Včetně této zásady se přirozeně vyskytují i další pravidla, která zajišťují správnou funkčnost a spolehlivost spoje [6]:

- konstrukce spojů by měla umožňovat kontrolu a zjistitelnost závad,
- lepené plochy by měly být co největší pro dosažení mezního stavu po předchozích náznacích porušení,
- zvýšení bezpečnosti spoje je možné docílit přenesením zatížení na více stykových ploch,
- při spojování dvou materiálů s výrazně odlišnými koeficienty teplotní roztažnosti nesmí docházet k velkým změnám provozních teplot,
- v průběhu vytvrzování je nutné zajistit pevný tvar navržené spáry pomocí forem nebo přípravků,
- lepená spára by měla mít správnou tloušťku.

Ačkoliv poslední zásada má na pevnost spoje zásadní vliv, jedná se doposud o kontroverzní a nevyřešené téma.

3.4 Povrchová úprava

Úprava povrchu adherendu je zásadním technologickým krokem lepení, bez kterého by i ta nejvýkonnější lepidla neplnila svoji funkci. Hlavními prioritami tohoto procesu jsou [32]:

- odstranění, nebo zabránění vzniku vrstvy oxidů a nečistot na povrchu adherendu,
- maximalizace molekulárních interakcí na rozhraní adherendu a adheziva,
- optimalizace pevnosti spoje a zvýšení jeho trvanlivosti,
- vytvoření vhodné povrchové mikrostruktury adherendu.

Jednotlivé technologie se liší v závislosti na různorodosti materiálů a na druhu kontaminace povrchu. Některá doporučení jsou obsažena v normách ISO 4588 (pro kovy) a ISO 13895 (pro plasty), avšak kvalitní informace vydávají i samotní výrobci lepidel. Metody úpravy povrchů lze obecně klasifikovat na: čištění, mechanickou úpravu, modifikaci, ošetření elektrickým výbojem a další technologie. V praxi se často využívá kombinace dílčích metod, které na sebe musí bezprostředně navazovat a měly by také těsně předcházet samotné lepení. [32]

Čištění

Aplikace čisticích rozpouštědel je obvykle první příprava povrchu k lepení, neboť s výrobou plastů souvisí nátěry chemických činidel, které usnadňují vytažení výrobků z forem. Na povrch kovů zase snadno ulpívá prach a olejové nečistoty. Přítomnost obou druhů kontaminací zmenšuje velikost lepených ploch a omezuje adhezi. K čištění povrchů lze využít levnější detergenty, nebo účinnější alkálie, které se aplikují po zahřátí a fungují na principu odpaření nečistot. [32]

Mechanické úprava

Při mechanickém ošetření povrchu je cílem buď odstranění nečistot, nebo zvýšení drsnosti. K těmto účelům se používá otryskávání a broušení, po nichž musí následovat odstranění uvolněných částic pomocí proudu filtrovaného kyslíku nebo dalšího procesu čištění. [32]

Modifikace

Do této kategorie úprav patří chemická ošetření povrchu, která vedou k modifikaci adhezních sil skrze zvýšení chemické reaktivity adherendu. U plastů se může jednat o leptání sodíkem, jodem, nebo nejčastěji chlorem. Jinou modifikací plastů je termální ošetření horkým vzduchem (500 °C). Při těchto metodách dochází k oxidaci a ke vzniku reaktivních skupin kompatibilních s funkčními skupiny lepidel. Další možnost představují primery, což jsou chemické nátěry poskytující „chemický most“ mezi adherendem a lepidlem. Primery je možné aplikovat i na kovy. [30]

Ošetření elektrickým výbojem

Jedná se o moderní povrchové úpravy plastových adherendů, ošetřuje se buď pomocí tzv. koróny, nebo plazmy. Při koróně dochází k ionizaci vzduchu mezi dvěma elektrodami, kudy je vedena plastová součást. Ionizované částice reagují s plastem, na povrchu se vytvářejí reaktivní skupiny a současně se zvyšuje drsnost. Výboj plazmy je naopak docílen elektromagnetickým zářením o vysoké energii za nízkých tlaků, z plynu (z O₂, Ar, He, nebo ze vzduchu) jsou absorpcí fotonů uvolněny elektrony a excitované částice plynu reagují s povrchem adherendu, odkud velmi efektivně odstraní vlhkost a organické znečištění. [30]

Další technologie

Mezi další metody povrchových úprav patří čištění laserem nebo ošetření plamenem. Laserem je vhodné kvůli šetrnosti k povrchu čistit například skla a součásti, kde je nežádoucí intervence do kvality povrchu. Ošetření plamenem je levnější, avšak druhořadá varianta ošetření elektrickým výbojem. [32]

3.5 Proces lepení

Správná příprava lepidel začíná již u skladovacích podmínek, které ve výsledku mohou výrazně ovlivnit efektivitu a životnost lepeného spoje. Vysoké teploty vyvolávají předčasnou polymeraci. Skladování při teplotách pod bodem mrazu zase vede k vytvoření aglomerací nebo koagulací v polymerních emulzích. Některá moderní lepidla proto mohou obsahovat glykoly, které však tyto děje pouze oddálí. Vhodné je dodržovat doporučení technických dat, které poskytují výrobci lepidel, zpravidla se jedná o rozmezí teplot 15–25 °C. [27]

V případě dvousložkových lepidel dochází těsně před lepením ke smísení složek podle stanovených směsných poměrů. Vhodným řešením jsou směsné trysky, u kterých je nízké riziko vzduchových bublin v lepeném spoji. Levnější alternativou je smíchání obou složek v otevřené nádobě. [27]

Dalším krokem je aplikace lepidel na adherend. K tomuto účelu lze využít například aplikační pistole, nebo pro menší lepenou plochu injekční stříkačky. Důležité vždy je, aby došlo ke vzniku uniformní vrstvy bez přítomnosti uvězněných plynů. [28]

Slepené adherendy jsou poté umístěny do formovacích prvků, tzv. přípravků, které svým tvarem určují výsledné rozměry lepené spáry. Zde probíhá vytvrzování lepidel až do doby tvarové stálosti spoje. Pro monitorování vytvrzujících reakcí lepidel existuje několik metod, v praxi se využívá například termomechanická analýza, diferenciální skenovací kalorimetrie nebo termální gravimetrická analýza [30].

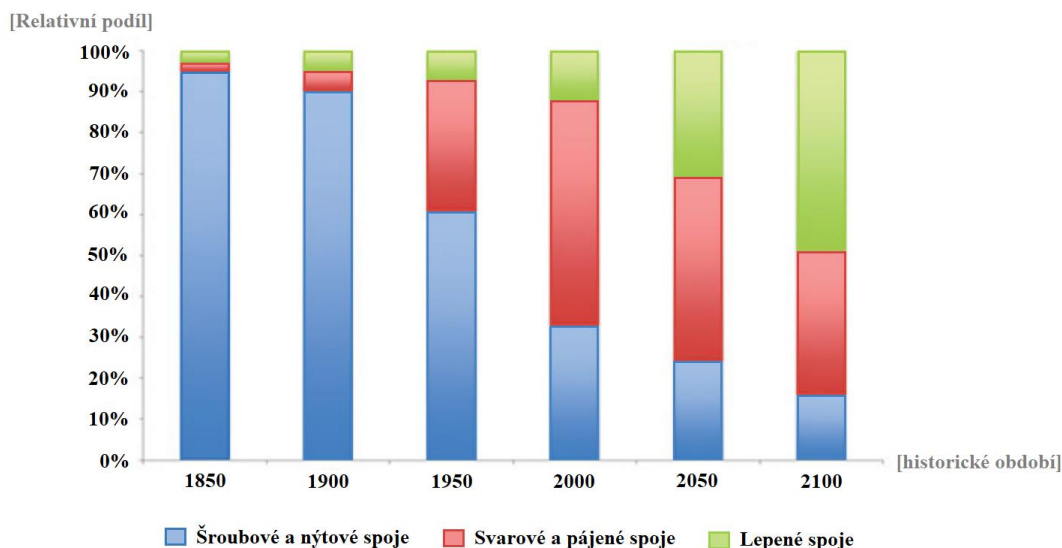
3.6 Lepení kompozitů

Pro kompozitní materiály je technologie lepení specifická, neboť se mnohdy jedná o jedinou vhodnou spojovací technologii. Aplikace mechanických spojů je kvůli křehké povaze struktury nežádoucí, díry šroubových spojů totiž způsobí v kompozitním materiálu výrazné koncentrátoři napětí a během vrtání hrozí riziko delaminace. Také fyzikální spoje jako svařování nebo pájení jsou u termosetických kompozitů z principiálních důvodů neuskutečnitelné. Lepení však kompozitům poskytuje vhodnou kompenzaci v podobě vynikající přilnavosti lepidel a síly spoje v případě lepení polymerních kompozitů polymerními lepidly. Chemická kompatibilita adherendu a adheziva zároveň rozšiřuje technologické možnosti. Kompozitní konstrukce tedy mohou projít vytvrzením zároveň s aplikovanými lepidly (tzv. *co-curing*), snižuje se tak časová náročnost výroby a zvyšuje se síla lepeného spoje skrze difúzi polymerních řetězců. Rovněž je možné spojit vytvrzenou a nevytvrzenou součást (tzv. *co-bonding*), zde je již nutná povrchová úprava vytvrzeného adherendu. Třetí možností je přirozeně spojit vytvrzené adherendy (tzv. *secondary bonding*), což se u kompozitů primárně využívá v případě rozměrných a komplexních sestav. [27]

V záležitostech povrchových úprav lze pro kompozity použít stejné metody, jako pro plasty. Praktické řešení doporučované výrobcem lepidel se zakládá na očištění a odmaštění pomocí isopropylalkoholu nebo acetonu následované zdrsněním povrchu obroušením a dokončené dalším očištěním [33, 34]. Alternativním řešením jsou strhávací tkaniny, které se před vytvrzením kompozitu umístí na plochu, jež je určena k lepení. Jedná se o materiál, který matrice prosytí, ale pevně k ní nepřilne. Pro tento účel se využívá například nylon nebo Dacron®. Po vytvrzení se strhávací tkaniny stávají vrchní vrstvou laminátu a chrání ho proti absorbování nečistot či plynů. Strhávací tkanina je odstraněna (odtržena) těsně před lepením, vzniká tak plocha s vhodnou povrchovou energií. Tato metoda je rychlá a levná, avšak vyžaduje určitou zručnost, neboť při strhávání hrozí kontaminace adherendu [32]. Z hlediska automatizace patří mezi nejspolehlivější povrchové technologie ošetření plazmou, korónou a čištění laserem, jejich zavedení do výroby je otázkou posledních let a týká se především leteckého průmyslu [27].

3.7 Komparace spojovacích technologií

Lepené spoje nahrazují v inženýrských aplikacích stále větší procento konvenčních spojů. Již nyní jsou nedílnou součástí dopravních prostředků nebo spotřební elektroniky a do konce století mají tvořit polovinu všech konstrukčních spojů (Obr. 30) [35]. Vývoj technologie lepení se samozřejmě přímo odráží od rozvoje makromolekulární chemie, která se velmi dynamicky rozmohla právě ve druhé polovině dvacátého století [35].



Obr. 30: Vývoj relativního významu spojovacích technologií [33].

Důvody rozšiřujícího se uplatnění lepení je několik. Mezi nejdůležitější výhody této technologie patří [6]:

- snížení hmotnosti a počtu součástí,
- rovnoměrná distribuce napětí ve spojovaném materiálu,
- nevznikají tepelná ovlivnění spojovaného materiálu,
- tuhost i ohebnost spoje,
- vysoká únavová životnost,
- korozní odolnost,
- snížení hluku a vibrací,
- možnost spojení odlišných materiálů.

Přirozeně se vyskytují i určitá negativa a omezení. Při konstrukci lepeného spoje je důležité pamatovat na [27]:

- bezpečnost vůči teplotě T_g ,
- creep a relaxaci napětí,
- časovou náročnost vytvrzování,
- nutnost použití přidržovačů a přípravků při vytvrzování,
- nerozebíratelnost spojů,
- nerecyklovatelný materiál lepidel.

4 Vliv tloušťky lepené spáry na pevnost spoje

Cílem praktické části práce je experimentálně zjistit optimální tloušťku spoje při lepení kompozitů. Bude postupně provedena volba lepidla, návrh a výroba vzorků pro lepení, konstrukce přípravku na lepení, povrchová úprava vzorků, samotné lepení, testování pevnosti spoje na trhacím stroji a vyhodnocení experimentu. Výsledkem bude stanovení nejvhodnější tloušťky lepené spáry pro pevnost spoje kompozitů.

4.1 Volba lepidla pro experiment

Pro účely experimentu byla vybrána dvě lepidla: *3M Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP110* a *3M Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP125* (Obr. 31), což jsou dvousložková, konstrukční lepidla o epoxidovém základu a aminovém akcelerátoru. Pevnosti těchto lepidel se pohybují v rozmezích 17–10 MPa při lepení oceli a 5–2,5 MPa při lepení plastu (PVC), a tak představují standard v oblasti konstrukčních lepidel [33, 34].

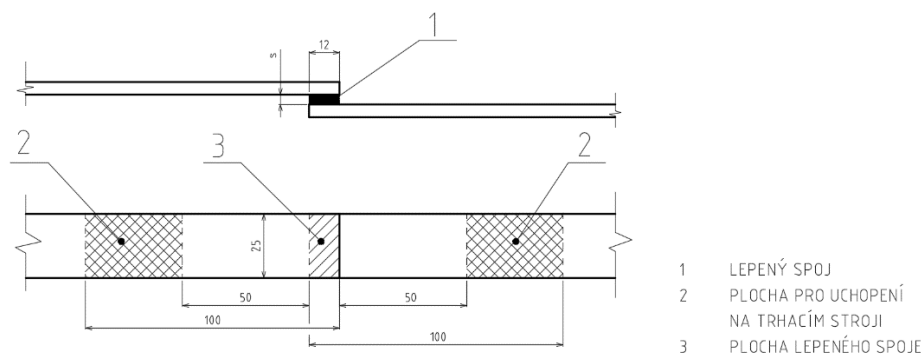


Obr. 31: Zvolená lepidla pro experiment.

Dalším důvodem této volby lepidel je krátký čas k dosažení doby zpracovatelnosti (*work life*), kdy již není nutná přítomnost přidržovačů nebo přípravků k zajištění rozměrů lepeného spoje. Work life je u DP110 zhruba 10 minut [33], u DP125 pak 20 minut [34].

4.2 Návrh vzorku pro experiment

Tvar i rozměry vzorků korespondují s normou ISO 4587, jež udává geometrické parametry trhací zkoušky jednoduše přeplátovaného spoje (Obr. 32). Tento typ spoje byl vybrán pro jednoduchost proveditelnosti a pro reprezentativnost způsobu namáhání lepených spojů.



Obr. 32: Návrh vzorku pro lepení podle ISO 4587.

Plocha lepeného spoje má dle normy velikost 300 mm^2 ($12 \times 25 \text{ mm}$) a délka vzorku by měla umožnit uchycení na trhačím stroji v předepsaných vzdálenostech od spoje (tzn. minimálně 100 mm). Hodnoty tloušťek lepené spáry (s) budou určovat čtyři série vzorků (1, 2, 3 a 4 mm), dohromady pro dvě lepidla tedy proběhne měření pevnosti u 8 sérií vzorků. Aby byl experiment statisticky podložen, každá série bude obsahovat 4 lepené spoje stejné tloušťky, tudíž bude slepeno 8 vzorků pro každou sérii. Ve výsledku je tedy potřeba připravit celkem 64 vzorků.

Posledním podstatným parametrem pro experiment je tloušťka laminátového vzorku. I když ji norma ISO 4587 stanovuje hodnotu 1,6 mm, nemusí být při trhačí zkoušce zaručeno, že pro tuhle tloušťku vzorku nastane selhání lepeného spoje, ale mohlo by dříve dojít k porušení vzorku. Důvodem obav jsou chybějící informace ohledně pevnosti vybraných lepidel při lepení kompozitů. Proto byla tloušťka vzorku záměrně navýšena pro zaručení kohezního, nebo adhezivního porušení lepeného spoje.

Vzorek pro experiment bude tvořit kompozitní laminát. Jako výztuž je konkrétně zvolena *Skelná tkanina rovingová 800 g/m²* a *Skelná tkanina UNIGLASS 280 g/m²*, a to kvůli vysoké pevnosti a nízké ceně skelných vláken. Matricí je *Tužidlo HG 133* a *Epoxidová pryskyřice LG 815* v poměru 1:3.

Výsledný laminát bude složen z pěti vrstev tkanin, z čehož dvě tkaniny o gramáži 280 g/m^2 jsou určeny pro vrchní a spodní vrstvu, tři tkaniny o gramáži 800 g/m^2 budou tvořit vnitřní vrstvy laminátu. Protože se jedná vždy o biaxiální tkaniny, je při orientaci vláken ve směru 0 zároveň výztuž i ve směru 90, poskytují tedy jak podélnou, tak i příčnou pevnost. Kvůli potenciálnímu víceosému charakteru deformací, jež mohou při trhačí zkoušce v laminátu vznikat, je prostřední vrstva natočena do orientace 45/-45. Zbylé čtyři vrstvy mají orientaci 0/90.

4.3 Výroba vzorku pro experiment

Vzhledem ke tvaru vzorku se jako nejsnadnější technologické řešení výroby jeví vytvoření jednoho plátu laminátu, který posléze bude nařezán na menší vzorky o požadovaných rozměrech. Pro výrobu laminátu byla nakonec zvolena metoda mokrého kladení, jinou volbou by spolehlivě mohlo být kladení prepregů, nebo také infuze. Nicméně pro potřeby experimentu, kdy není vyvíjen nárok na přílišnou kvalitu a rovnoměrnost prosycení, je mokré kladení zcela postačující. Samotná výroba pak bude probíhat podle vyobrazeného schématu, kdy započne přípravou formy a skončí vytvrzením ve vakuovém pytli (Obr. 33).

Vakuový pytel	
Netkaná textilie	
Separační folie	
Strhávací tkanina	
Tkanina 280 g/m^2	0/90
Tkanina 800 g/m^2	0/90
Tkanina 800 g/m^2	45/-45
Tkanina 800 g/m^2	0/90
Tkanina 280 g/m^2	0/90
Separační činidlo	
Forma	

Obr. 33: List skladby.

Formu při laminování tvořila tabule skla, na kterou byl hadříkem nanesen separační vosk *Oskar's M 700*, jenž usnadní oddělení kompozitu od formy. Sklo poskytuje laminátu rovinný tvar a navíc vytvoří hladký povrch nelepené strany vzorku.

Poté bylo potřeba vypočítat, odměřit a nastříhat výztužnou tkaninu. Zde je nutné neopomenout přídavek na řezání vzorků z výsledného laminátu. Výpočet plochy pak probíhal následovně:

$$S_L = b_v \cdot l_v \cdot n_v \cdot p_L = 0,025 \cdot 0,2 \cdot 64 \cdot 1,1 = 0,35 \text{ m}^2, \quad (10)$$

kde je: S_L [m²] plocha laminátu, b_v [m] šířka vzorku, l_v [m] délka vzorku, n_v počet vzorků a p_L přídavek na řezání laminátu.

Následně byly nastříhány výztužné tkaniny o ploše S_L pomocí rotačního řezacího nože. Pro stanovený obsah plochy 0,35 m² a při dané délce vzorku to byly tkaniny o rozměrech 0,2 × 1,75 m.

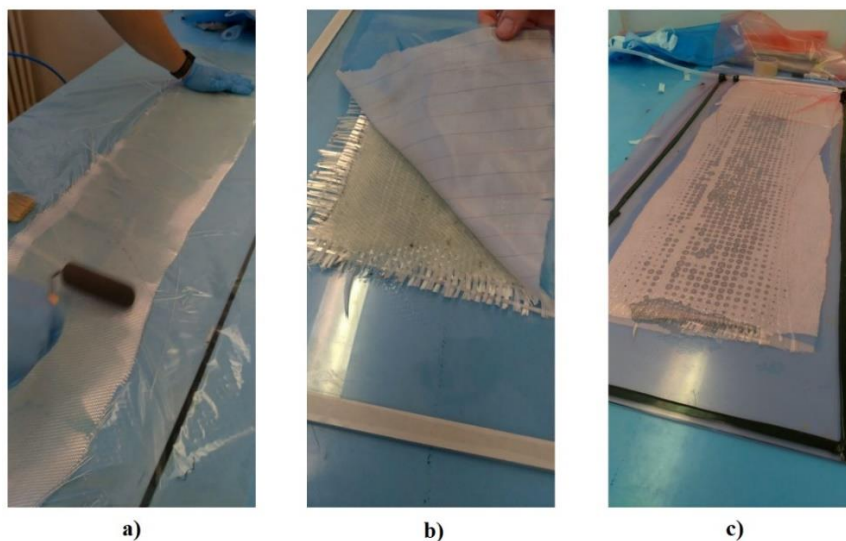
Dále byla připravena matrice. Potřebné množství je vypočítáno z celkového objemu tkanin a z poměru matrice k výztuži, který je v případě mokrého kladení 1:1 [39], tudíž matrice zastává ve struktuře stejný objem jako výztuž. Při známé základně S_L stačí k zjištění objemu dopočítat výšku tkanin. Zde lze aplikovat jednoduché orientační pravidlo: gramáž přibližně reflektuje šířku dané tkaniny, tedy při gramáži 280 g/m² má tkanina přibližně tloušťku 0,28 mm, obdobně tkanina 800 g/m² bude mít tloušťku 0,8 mm [39]. A tak lze množství matrice určit rovnicí:

$$V_M = S_L \cdot v_L = 0,35 \cdot (0,28 + 0,8 + 0,8 + 0,8 + 0,28) = 1,036 \text{ l}, \quad (11)$$

kde: V_M [l] je objem matrice a v_L [mm] je výška laminátu.

Při samotné přípravě matrice bylo smíšeno 0,25 litru vazebného činidla a 0,75 litru pryskyřice pro dodržení stanoveného poměru 1:3. Mísení probíhalo v plastové odměrce za pomoci skleněné tyčinky a v ochranných rukavicích. Během tohoto procesu hrozí riziko vzniku vzduchových bublinek, které by znehodnotily laminát, proto je míchání potřeba provádět pomalými pohyby.

Nyní je možné začít laminovat. Na formu se nejprve umístí spodní tkanina v požadované orientaci a pozvolně se na ni vylije matrice. Poté je matrice ručním válečkem rozprostřena po celé ploše tkaniny (Obr. 34 a). V případě skelných vláken lze vizuálně určit, zdali došlo k prosycení výztuže, vlákna pak zřetelně změní odstín. Teprve po prosycení následuje kladení druhé vrstvy a proces se opakuje až se dospěje k poslední, páté vrstvě laminátu (Obr. 34 b).



Obr. 34: Proces mokrého kladení: a) sycení tkanin, b) laminování, c) vytvrzování.

Dalším krokem je umístění strhávací tkaniny PA80 na vrchní povrch laminátu, jedná se o povrch určený k lepení, tudíž je tímto způsobem zároveň vyřešena otázka povrchové úpravy

(Kap. 3.5). Na tuto nylonovou tkaninu jsou poté položeny vrstvy pro vytvrzení kompozitů za přítomnosti vakua. Konkrétně se jedná o separační folii, jež zamezuje prosáknutí matrice, netkanou textilií, která napomáhá odsávání vzduchu a zabraňuje porušení vakua ostrými hranami laminátu, a vakuový pytel, jenž byl utěsněn pomocí oboustranné pěnové lepicí pásky. Před utěsněním pytle je k laminátu přiložena spirálová hadice a ventil pro odvod vzduchu z formy. Skrze hadici napojenou na vzduchové čerpadlo pak došlo k vytvoření podtlaku (Obr. 34 c). V tomto stavu laminát setrval 48 hodin do plného vytvrzení struktury.

Pro vyjmutí laminátu z formy stačí odstranit vakuový pytel, dále odebrat vrchní vrstvy kromě strhávací tkaniny a laminát oddělit od formy, což by v případě použití separátoru měl být snadný úkon.

Dále následovala vizuální kontrola, po níž by byla provedena příprava laminátu na nařezání vzorků. Nicméně kontrola odhalila značnou nedokonalost ve struktuře kompozitu. Výztuž byla velmi nerovnoměrně prosycena, což byl patrně důsledek pochybení při sycení tkanin. Konkrétně se mohlo jednat o překonání doby gelace předtím, než byl kompozit smísen. Tudíž výrazně vzrostla viskozita matrice, poté nedošlo k řádnému smáčení povrchu vláken a ve struktuře začaly vznikat vzduchové bubliny, které ani podtlak vakua nevytlačil. Vyrobený laminát by s tímto množstvím strukturních vad mohl negativně ovlivnit výsledky experimentu. Pro předejití podobné situace stačí při výrobě vzorků zavést jedno z následujících opatření:

- zkrátit dobu sycení tkanin,
- použít jiný typ pryskyřice a akceleratoru s delší dobou gelace,
- rozdělit přípravu matrice na vícero dávek,
- pracovat při nižších teplotách.

Nicméně výroba dalšího laminátu byla kvůli pandemii SARS-CoV-2 a kvůli souvisejícím vládním nařízením zkomplikována. Z tohoto důvodu byl laminát objednan od specializovaného výrobce (pod obchodním názvem *Sklotextit G10*). Součástí zakázky bylo i nařezání laminátu na požadované rozměry (Obr. 35). Vzorky ve výsledku mají tloušťku 5 mm a definovanou pevnost v tahu 300 MPa. Z těchto hodnot již lze zjistit, zda při experimentu nastane porušení lepeného spoje, nebo laminátu. Při výpočtu se vychází z porovnání silového působení při mezním stavu pevnosti laminátu a lepeného spoje [6]. Pak platí:

$$\tau_a = \frac{S_v}{S_a} \cdot \sigma_v = \frac{5 \cdot 25}{12 \cdot 25} \cdot 300 = 125 \text{ MPa}, \quad (12)$$

kde je: τ_a [MPa] přípustná mez pevnosti lepidla ve smyku, σ_v [MPa] pevnost v tahu sklolaminátového vzorku, S_a [mm²] plocha lepeného spoje, S_v [mm²] příčný průřez vzorku.

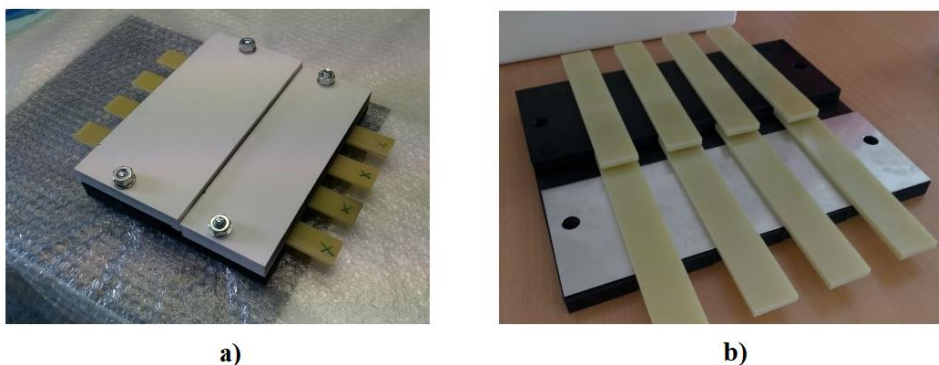
Aby při experimentu byla zkoumána pevnost spoje, nikoli laminátu, nesmí pevnost lepidla překročit hodnotu τ_a . Avšak pro porovnání: momentálně nejvýkonnější lepidlo *DELO MONOPOX VE403728* má mez pevnosti 43 MPa [40], tudíž lze bezpečně konstatovat, že nežádoucí porušení vzorků nenastane.



Obr. 35: Vzorky pro experiment.

4.4 Konstrukce přípravku na lepení

Aby bylo zajištěno, že lepený spoj bude mít požadované rozměry, byl navržen a vyroben přípravek na lepení (Příl. 1). Toto zařízení se skládá ze tří částí: jedné podstavy a dvou přitlačných desek, které jsou k sobě upevněny pomocí šroubových spojů. Přípravek umožňuje lepení jedné série vzorků (Obr. 36 a). Kvůli snadnějšímu ukládání vzorků mají přitlačné desky ve spodní drážce, jejichž šířka je shodná se šířkou vzorků. Šírku lepené spáry lze měnit vkládáním plechů pod vzorky na spodní plochu podstavy (Obr. 36 b). Při základní konfiguraci, bez využití plechů, je výška spáry 4 mm.



Obr. 36: Zobrazení přípravku: a) během lepení, b) po vložení plechu.

Přípravek byl vyroben na 3D tiskárně *Original Prusa i3 MK3S+* ve firmě *Meopta – optika, s.r.o.* 3D Tisk byl proveden technologií FDM za použití materiálu ABS. Jedná se nicméně pouze o prototyp, jehož velikost je navíc ovlivněna rozlohou 3D tiskárny. Proto při lepení více vzorků by byl vhodnější ocelový nebo hliníkový přípravek zhotovený frézováním a vrtáním.

I když slepené vzorky zůstanou v přípravku jen do doby, než uplyne work life, hrozí, že při vytečení lepidla nepůjde přípravek manuálně rozdělat. A proto musí být jeho povrch před lepením ošetřen separátorem, podobně jako u formy na výrobu laminátu. Pro tento účel byly v průběhu experimentu použity dva druhy výrobků (Obr. 37): *K2 COLOR FLEX* a *SIL 100*[®]. V prvním případě se jedná o kapalný kaučuk, který po zaschnutí vytvoří ochrannou slupovací vrstvu. Nicméně pro časovou náročnost zasychání se ukázala být efektivnější druhá metoda, aplikace silikonového filmu.



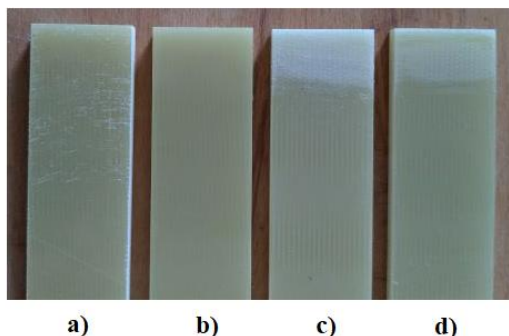
Obr. 37: Separáčnı čınidla.

Použitı obou látek musí probıhat za nepřıtımnostı vzorků a v případě silikonu nesmı množství filmu ohrožovat kontaminaci lepeného spoje. V průběhu experimentu je pak nutné zbavovat přípravek vyteklého lepidla a popřípadě obnovovat separáčnı vrstvu.

4.5 Povrchová úprava vzorků

Povrchová příprava by v případě vyrobených vzorků spočívala v odtržení strhvací tkaniny, čímž by vznikl čistý a zdrsňený povrch. Nicméně vzorky, které byly pro experiment koupeny, jsou hladké a mají nízkou povrchovou energii, tudíž i nízkou adhezi k lepidlům. Musí tedy následovat náležitá povrchová úprava (Obr. 38). Na doporučení výrobce lepidel byl adherend upraven následujícími operacemi [33, 34]:

- očištěním acetonem (nebo jiným rozpouštědlem na bázi ketonu),
- zdrsňením povrchu broušením,
- opětovným čištěním acetonem.



Obr. 38: Proces povrchových úprav: a) neupravený vzorek, b) očištěný vzorek, c) obroušený vzorek, d) připravený vzorek.

Při čištění acetonem je nutné dodržovat bezpečnostní opatření: mít nasazené ochranné rukavice, činnost provádět v dobře větraném prostoru a uhasit všechny blízké zdroje vznícení. Očišťování vzorků pak probíhalo pomocí papírové utěrky zvlhčené v acetonu. Mírným tlakem a odpařením rozpouštědla bylo z povrchu odstraněno organické znečištění a jiné kontaminace.

Dalším krokem bylo broušení povrchu brusným papírem s nízkou zrnitostí (konkrétně se 100 zrn/cm²). Došlo tak k narušení jemného povrchového profilu matrice. Z hlediska funkce zcela postačuje zdrsňit pouze plochu určenou k lepení, tudíž se nejedná o časově náročnou operaci.

Posledním bodem úpravy je druhé čištění. Důvodem jsou uvolněné částice vzniklé broušením. Proces probíhal stejně jako u prvního čištění pomocí papírové utěrky a acetonu. Protože se jedná o finální úpravu, musí být poté vzorek důkladně vysušen. Jakýkoliv zbytek acetonu by, jakožto organické rozpouštědlo, znehodnotil lepený spoj.

Na vzorky by mělo být aplikováno lepidlo vždy v co nejkratší době od povrchové úpravy. Při experimentu tahle doba nikdy nepřesáhla 15 minut. Ačkoliv se nejednalo o modifikaci povrchu nebo jinou metodu, kde se zvyšuje chemická reaktivita adherendu, stále hrozí riziko ulpívání prachových částic.

4.6 Lepení vzorků

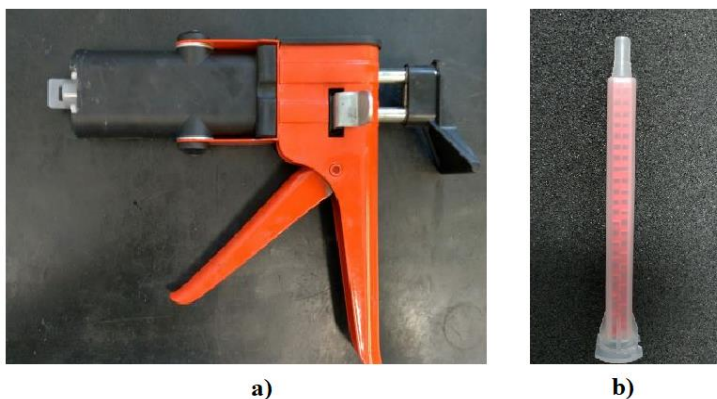
Příprava dvousložkových lepidel je určitým způsobem analogická k přípravě matric při výrobě kompozitů. Opět je základem spočítat potřebný objem a poté smíchat složky. Je patrné, že objem lepidla bude závislý na tloušťce spáry, tudíž se bude i množství lepidla pro různé série vzorků lišit. Obecně lze tedy vyjádřit potřebné množství lepidla jako:

$$V_a = z \cdot S_a \cdot s \cdot p_a \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 300 \cdot s \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot s \text{ [ml]}, \quad (13)$$

kde je: V_a [ml] objem lepidla, z počet vzorků v sérii a p_a přídavek na přetečení lepidla.

Při manipulaci s konstrukčními lepidly nesmí dojít ke kontaktu s pokožkou, a proto je podmínkou použití ochranných rukavic, popřípadě ochranného oděvu a brýlí.

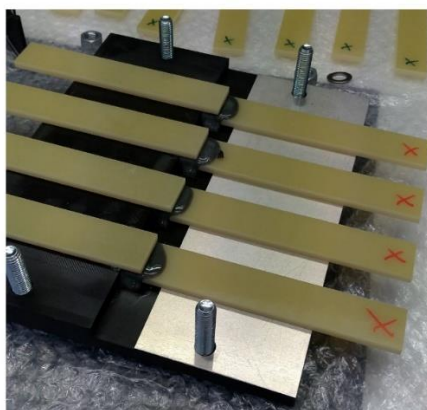
Mísění lepidel probíhalo pomocí aplikační pistole, na jejíž hlaveň byla připojena směsná tryska (Obr. 39). Nejprve byla do pistole uložena dvoudílná kazeta lepidla (Obr. 31) obsahující izolované složky, které jsou po zmáčknutí spouště hnány pomocí pístů pistole směrem ke směsné trysce. Zde se obě složky skrze systém labyrintu rovnoměrně smísí a na výstupu z trysky již vytéká homogenní směs lepidla.



Obr. 39: a) aplikační pistole, b) směsná tryska.

Při tomto způsobu mísení může být lepidlo rovnou aplikováno na adherend. Avšak kvůli malé ploše lepeného spoje bylo lepidlo nejdříve přemístěno do dávkovací stříkačky, která umožňuje snadnější manipulaci a přesnější aplikaci. Lepidla navíc musí dosahovat určité viskozity, aby dokázala vyplnit celou tloušťku spáry, což lze v dávkovací stříkačce zkontrolovat.

Poté již přišlo na řadu lepení. Kvůli dobrému prosycení povrchu byla nejdříve vytvořena vrstva lepidla na obou adherendech, které byly až posléze uloženy do přípravku (Obr. 40). Tímto způsobem pokračovalo lepení celé série vzorků. Během procesu je ovšem nutné počítat s přetečením lepidla, proto byl také do výpočtu lepidla zahrnut přídavek p_a . Zároveň je důležité, aby lepidlo bylo nanášeno na větší plochu, než je S_a , jejíž velikost se vymezení až přiložením přitlačných desek a uzavřením přípravku.



Obr. 40: Lepení vzorků.

Následovalo tuhnutí lepeného spoje a čekání, než nastane work life. Protože tato doba nemusí vždy odpovídat technickým datům lepidel, tak je vhodné vynést vzorek použitého lepidla na oddělený papír a sledovat průběh viskozity zde.

Přípravek lze rozdělit až při dosažení manipulační pevnosti spoje. Po vyjmutí vzorků je možné odstranit lepidlo, jež vyteklo ze spáry na boky laminátů. Avšak z hlediska výsledků experimentu jsou nežádoucí jen ta vytečení, která tvoří spojení obou adherendů, v jiném případě se jedná pouze o „mrtvou“ hmotu, která by neměla ovlivnit pevnost spoje.

Dalším krokem je očištění přípravku a obnova vrstvy separátoru. Poté již může přijít na řadu zhotovení další série vzorků, včetně povrchových úprav, přípravy lepidla a procesu lepení.

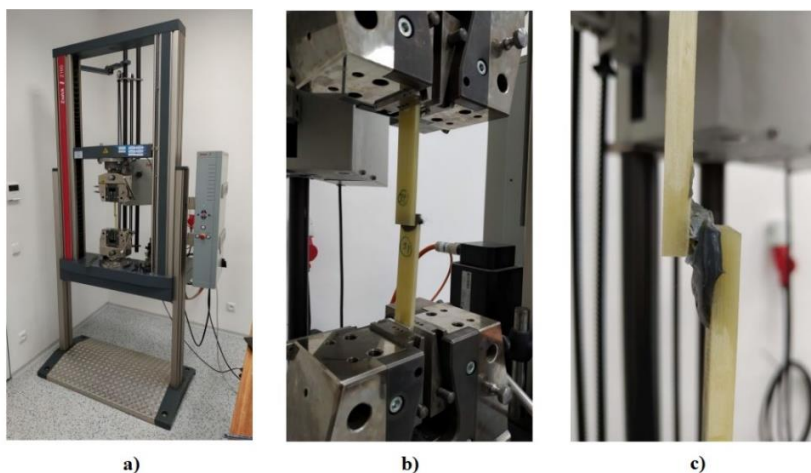
Po slepení všech vzorků došlo k úplnému vytvrzení lepeného spoje podle technických dat [33, 34]. Vzorky lepidla DP110 byly plně vytvrzeny po 48 hodinách při teplotě 22 °C. U DP125 se jednalo o dvofázové vytvrzování: nejprve po dobu 24 hodin při teplotě 22 °C a poté 2 hodiny v peci při teplotě 70 °C. Pro tento účel byla použita sušicí pec *Memmert* (Obr. 41). Dokončením vytvrzení končí proces lepení a následuje již testovací část experimentu.



Obr. 41: Sušicí pec.

4.7 Zkoušky pevnosti

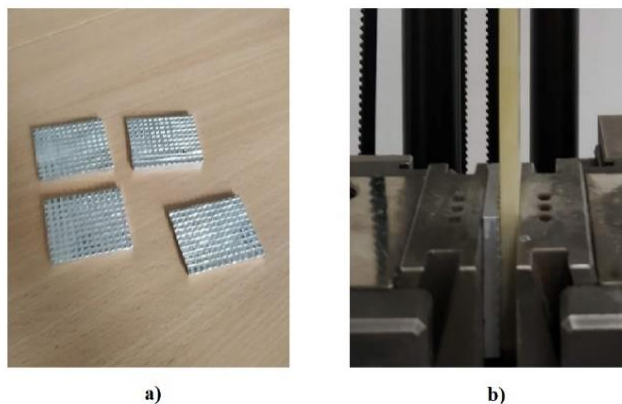
Zkoušky k určení meze pevnosti zhotovených spojů (Obr. 42) byly provedeny na trhacím stroji *Zwick Z100*, který umožňuje komunikaci s externím zařízením skrze prostředí programu *testXpert*. V tomto rozhraní lze provádět změny v parametrech zkoušek a je možné kontrolovat i jejich průběhy. Změřená data se poté dají exportovat pomocí formátu CSV například do *Microsoft Excelu*.



Obr. 42: Průběh testování: a) trhací stroj, b) uchopené vzorky, c) porušování spoje.

Pevnost spoje byla testována za teploty 22 °C a při rychlosti přičníku 20 mm/min, která byla zvolena dle normy DIN-EN-ISO 572-1 a s ohledem na ISO 4587, kde je pevně stanovena doba zkoušky na 65 s ± 20 s. V tomto časovém intervalu musí dojít k porušení spoje.

Vzorky byly v trhačím stroji uchyceny pomocí svěrných čelistí a hliníkových vložek (Obr. 43). Při zkušebním testování nebylo využito zmíněných vložek, vzorky pak nebyly pevně sevřeny a měly tendenci vykluzovat. Právě kvůli tomuto problému byly dodatečně vyrobeny vložky s vroubkováním, které sílu sevření podpořily.



Obr. 43: a) hliníkové vložky, b) uchycení vzorků.

Poté již mohly následovat jednotlivé zkoušky spojů, během jejichž průběhů docházelo k zaznamenávání dat, které byly nakonec vyexportovány do tabulkového softwaru Microsoft Excel. Konkrétně se vždy jednalo o závislosti zátěžné síly na poměrné prodloužení vzorků.

4.8 Výstupní data zkoušek

Výsledky z celkem 32 zkoušek byly rozděleny podle použitého lepidla na výsledky skupiny A (pro 3M Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP110) a na skupinu B (pro 3M Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP125). Skupiny byly dále děleny podle tloušťky spáry, vzniklo tak 8 sérií po 4 vzorcích (Tab. 6).

Tab. 6: Tabulky naměřených hodnot.

Typ lepidla	Tloušťka spáry s [mm]	Číslo vzorku č. [-]	Maximální Síla F_{max} [N]	Pevnost ve smyku R_{ms} [MPa]	Typ lepidla	Tloušťka spáry s [mm]	Číslo vzorku č. [-]	Maximální Síla F_{max} [N]	Pevnost ve smyku R_{ms} [MPa]
A (DP110)	1	1	4794,12	15,98	B (DP125)	1	17	5853,71	19,04
		2	4584,61	16,37			18	1574,59	5,04
		3	4967,93	16,56			19	3180,75	10,18
		4	4586,62	15,29			20	6398,19	20,47
	2	5	3737,44	12,46		2	21	3696,21	11,83
		6	3918,69	13,06			22	3137,82	10,04
		7	3965,35	13,22			23	3504,20	11,21
		8	3513,14	11,71			24	2608,81	8,35
	3	9	4619,26	16,50		3	25	1466,38	4,69
		10	4190,90	14,97			26	960,85	3,20
		11	4305,78	15,38			27	2776,41	9,25
		12	4596,92	16,42			28	4655,25	15,52
	4	13	3946,50	13,16		4	29	1817,78	6,06
		14	3930,00	13,10			30	2447,40	8,16
		15	4153,65	13,85			31	2178,06	7,26
		16	4093,40	13,64			32	2535,25	8,45

4.9 Vyhodnocení experimentu

Pro zjištění optimální tloušťky spáry při lepení kompozitů následovalo zpracování naměřených dat. Jednalo se o zjištění aritmetického průměru hodnot pevností ve smyku R_{ms} pro každou sérii vzorků, z čehož byly poté určeny a porovnány další statistické veličiny (Tab. 7). Nakonec došlo k vyhodnocení statistických hodnot s ohledem na vady vzorků.

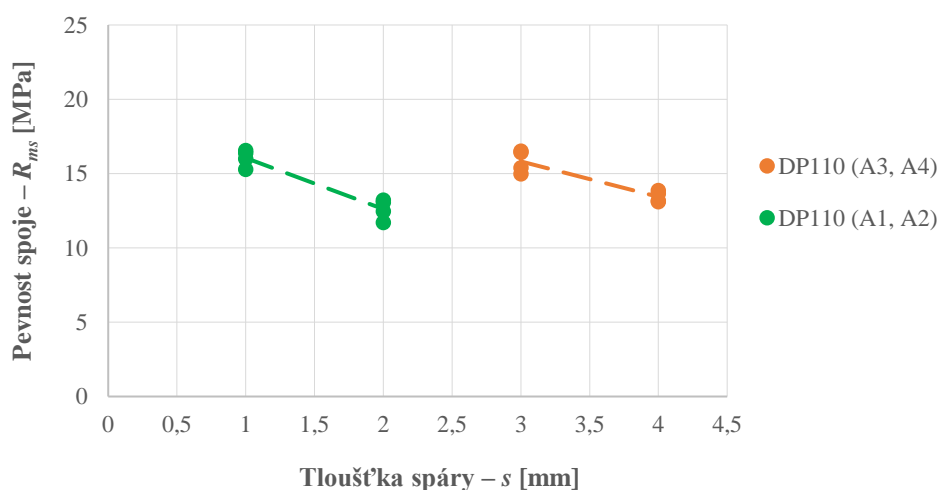
Tab. 7: Statistické vyhodnocení experimentu.

Lepidlo	Spára s [mm]	Aritmetický průměr R_{ms} \bar{x} [MPa]	Směrodatná odchylka s_x [MPa]	Relativní chyba v [%]
A (DP110)	1	16,05	0,56	3,5
	2	12,61	0,68	5,4
	3	15,82	0,76	4,8
	4	13,44	0,37	2,7
B (DP125)	1	13,68	7,34	53,7
	2	10,36	1,53	14,8
	3	8,17	5,54	67,8
	4	7,48	1,08	14,4

4.9.1 Skupina A (Lepidlo DP110)

Naměřené hodnoty u lepidla A lze ze statistického aspektu považovat za přesné pro velmi nízké směrodatné odchylky. Avšak pevnosti u prvních dvou sérií vzorků (1 a 2 mm) jsou důsledkem chyby při technologii lepení nižší, než jakých hodnot by potenciálně mohly dosáhnout. Stalo se tak kvůli částečnému ucpání směšné trysky, kdy nebyl dodržen směšný poměr složek. A tak je nutné srovnávat pouze lepidla o stejném směšném poměru a složení. Z tohoto hlediska nelze pokládat sérii 2 mm za minimum funkce pevnosti v závislosti na tloušťce spáry.

Lepení zbylých dvou sérií (3 a 4 mm) skupiny A proběhlo bez komplikací. I přesto v této skupině dosáhla nejvyššího aritmetického průměru R_{ms} série s tloušťkou spáry 1 mm. Zároveň lineární regrese naznačují (Obr. 44), že pevnost spoje v závislosti na nižší tloušťce spáry roste a v případě tenčích spár má lineární fit větší směrnici.



Obr. 44: Pevnost jednoduše přeplátovaného spoje jako funkce tloušťky spáry (pro DP110).

Odlišnost ve směsném poměru lepidla A pro různé série lze určit i vizuálně (Obr. 45). Po bližším posouzení porušení lepených spojů byla dále zjištěna vysoká homogenita vzorků v rámci jednotlivých sérií. Vždy došlo k prosycení celé plochy lepené spáry a porušení skrze adhezní selhání lepidla na laminátu, který v přípravku tvořil vrchní část spáry. Jedinou výjimkou byl vzorek č. 1, kde došlo k adheznímu porušení na obou adherencích – lom přešel z jednoho povrchu na druhý, avšak rozptyl hodnot pevnosti tím nebyl ovlivněn.



Obr. 45: Vzorky skupiny A.

4.9.2 Skupina B (Lepidlo DP125)

Z výsledků aritmetického průměru R_{ms} lepidla B je nejvíce patrný trend rostoucí pevnosti v závislosti na snižující se tloušťce spáry. V této skupině nicméně došlo k relativnímu nárůstu směrodatné odchylky u dvou sérií, což lze pravděpodobně přičíst nízkému počtu vzorků, a tedy velkému vlivu odlehlejších hodnot na statistické veličiny.

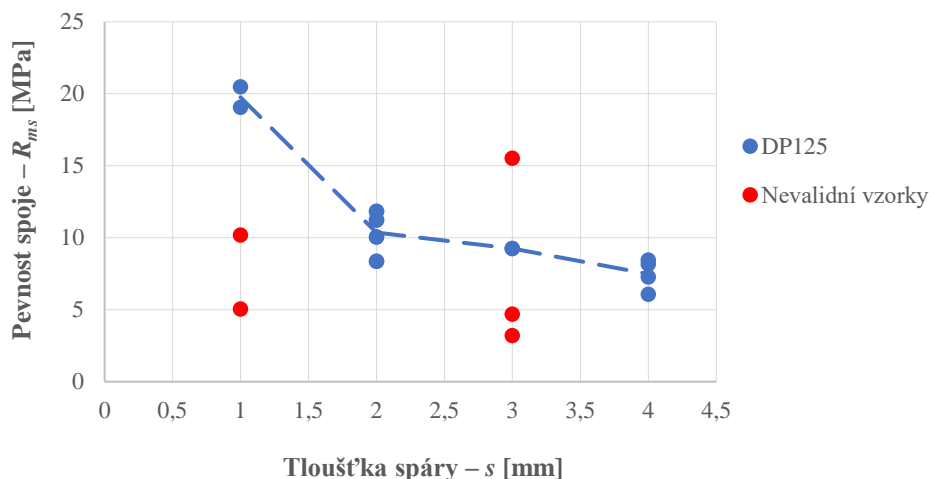
Po přezkoumání porušených spojů bylo zjištěno několik technologických nedokonalostí procesu lepení (Obr. 46). Důvodem odchylek a odlehlých statistických hodnot byla nejspíš chybná manipulace se vzorky při vytvrzování v přípravku. Jedná se dohromady o pět vzorků, které již nelze pokládat za validní. Konkrétně jsou to vzorky č. 18 a 19, u kterých došlo k vytečení lepidla ze spáry, kdy lepidlo zastávalo jen 20–50 % objemu spáry, s čímž souvisí i odpovídající pokles pevnosti oproti jiným vzorkům té série.



Obr. 46: Vzorky skupiny B.

Zbylé tři nevalidní vzorky lepidla B byly v sérii s 3 mm. U vzorků č. 25 a 26 nastala redukce délky spáry z 12 mm na 10 mm a u vzorku č. 28 došlo naopak ke zvětšení stejného parametru na 15 mm, což byl pravděpodobně důsledek špatného umístění přitlačných desek. Vzhledem k hodnotě pevnosti zbylého vzorku této série (č. 27), lze předpokládat, že při tloušťce 3 mm nenastane extrém v evaluaci optimální tloušťky spáry.

Pro dodržení normované velikosti spáry a kvůli relativně nízkým hodnotám směrodatných odchylek zbylých vzorků, mohlo dojít k posouzení hledané závislosti i u skupiny B. Ukázalo se, že pevnost spoje v závislosti na nižší tloušťce spáry opět roste a že dochází taktéž k strmějšímu nárůstu pevnosti v intervalu mezi 1 až 2 mm (Obr. 47).



Obr. 47: Pevnost jednoduše přelátovaného spoje jako funkce tloušťky spáry (pro DP125).

4.10 Výsledek experimentu

Protože ve zvoleném intervalu tlouštěk spáry (1 až 4 mm) nabývá pevnost spoje maximálních a minimálních hodnot právě v krajních bodech intervalu, nedošlo při tomto experimentu ke stanovení konkrétní hodnoty optimální tloušťky spáry pro lepení kompozitů, ani k objevení jiných extrémů funkce závislosti pevnosti lepidla na tloušťce spáry.

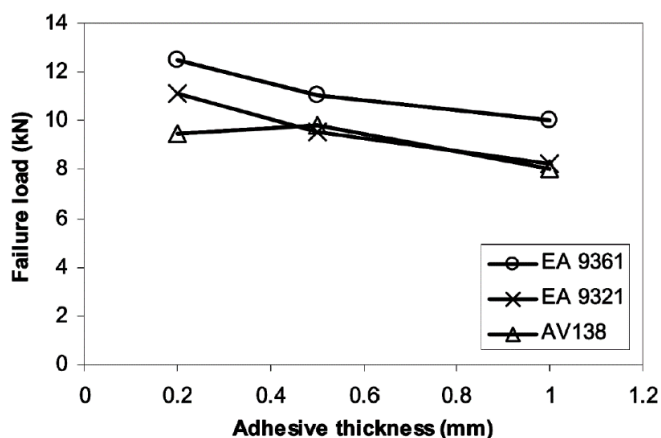
Vyhodnocená data však ukazují na jasný trend rostoucí pevnosti při snižujících se hodnotách tlouštěk lepených spár. Tato závislost bude mít pravděpodobně nelineární průběh, neboť změna pevnosti v rámci vybraných tlouštěk spár není konstantní. Podle dat z experimentu se nejvíce zvýšila pevnost při snížení tloušťky spáry ze 2 na 1 mm. U lepidla A to bylo o 27 %, u lepidla B naopak až o 90 %.

Kvůli těmto skutečnostem lze předpokládat, že optimální tloušťka spáry při lepení kompozitů je závislá na druhu lepidla a její výsledná hodnota se bude nacházet v otevřeném intervalu mezi 0 až 1 mm.

5 DISKUZE

Výsledek experimentu je ovšem v rozporu s klasickými analytickými modely lepených spojů, s modely Vorkersen (1938) [41] nebo Goland a Reisner (1944) [42], které předpokládají opačný průběh, tedy že tlustší lepený spoj bude dosahovat vyšší pevnosti. Závěry analýz pomocí MKP od Crombeho (1989) zase odhalily zvětšenou koncentraci napětí na koncích tenkých spár a rovnoměrnější distribuci napětí pro tlustší spáry [43].

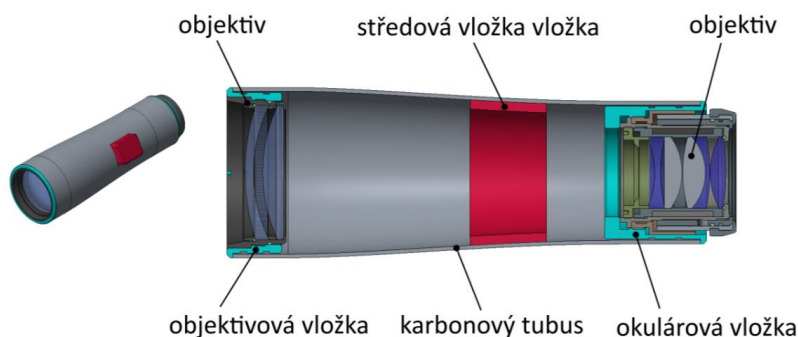
Nicméně novější studie nasvědčují tomu, že porušování lepeného spoje závisí především na nominální hodnotě napětí v oblasti celého spoje, která je v případě tenkých spár podstatně nižší – Gleich (2001) [44]. Podle jiné studie pak bylo při lepení oceli dosaženo optimální spáry v řádech desetin milimetrů – da Silva (2006) [45]. Da Silva provedl svá měření za použití třech druhů lepidel pro spáry o tloušťkách 1; 0,5 a 0,2 mm (Obr. 48).



Obr. 48: Testy tlouštěk jednoduše přeplátovaného spoje podle da Silvy [45].

Ačkoliv při zmíněných studiích byly vždy předmětem experimentů kovové adherendy, tak je možné vzhledem k výsledkům práce předpokládat, že i pro kompozity bude mít lepený spoj maximální pevnost při spáře o tloušťce menší, než je 1 milimetr.

Toto zjištění lze již částečně využít pro kompozitní konstrukce v přesných aplikacích. Příkladem může být sportovní optika, kde nelze použít jinou technologii než lepení ke spojení kompozitního tubusu a kovových vložek (Obr. 49). Problematická je ale rozměrová a geometrická stálost spoje hlavně po demontáži přípravku, kdy hrozí porušení sousostí vložek [46]. A tak potenciálním řešením je lepení tenkých a pevnějších spár.



Obr. 49: Model kompozitního tubusu [47].

Otázkou však zůstává teplotní stabilita lepidel a geometrická stálost v důsledku creepu. A proto je v budoucnu nutný další výzkum v této oblasti, aby technologie lepení byla pro kompozity plně využitelná.

ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo formou experimentu zoptimalizovat tloušťku lepené spáry tak, aby technologie lepení kompozitních materiálů umožňovala budoucí využití v přesném průmyslu. Protože se jedná o značně progresivní téma, byla teoretickým podkladem experimentu rešerše z téměř čtyřiceti odborných knih a studií.

Data z tahových zkoušek 32 přeplátovaných spojů nasvědčují tomu, že pevnost lepeného spoje roste s klesající tloušťkou spáry. Při minimálních měřených tloušťkách spáry došlo ke změření maximálních pevností spojů. V korespondenci s diskutovanými studiiemi lze obecně stanovit, že nejvyšší pevnost lepeného spoje kompozitních materiálů je docílena pro tloušťku spáry v řádech desetin milimetrů.

Vzhledem k úsudku, že pevnost lepeného spoje roste nepřímou úměrou ke tloušťce spáry, je možné vyvodit další významná pozitiva pro technologii lepení. Při tenčí tloušťce spáry přirozeně klesá množství použitého lepidla, tedy i cena, hmotnost a čas nutný pro vytvrzení struktury. Ve vztahu k Hookovu zákonu musí při zvýšení pevnosti spoje a konstantních mezních deformacích dojít také k nárůstu tuhosti. S tím poté souvisí vyšší rozměrová nebo geometrická stálost lepených konstrukcí při provozu.

Tyto vyvozené vztahy jsou ovšem zatím teoretické. Výsledky experimentu tedy mohou posloužit jako médium pro další výzkum a testování k docílení plnohodnotného zavedení technologie lepení do výroby přesných kompozitních konstrukcí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PTÁČEK, Luděk a kol. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav SVORČÍK a Vojtěch DALIBOR. *Úvod do studia materiálu*. Praha: VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [3] CHAWLA, Krishan K. *Composite Materials*. 3rd ed. Birmingham: Springer, 2011. ISBN 978-0-387-74364-6.
- [4] LIN, Kuen Y. *Composite Materials Overview for Engineers* [online]. In: William E. Boeing Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, b.r. [cit. 2021-03-24].
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS a Martin HARTL, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [7] CAMPBELL, F. C. *Structural Composite Materials*. Materials Park (Ohio): ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [8] PENDLETON, Richard L., TUTTLE, Mark E., ed. *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*. Dordrecht: Springer, 1989. ISBN 978-94-010-7000-3.
- [9] GAY, Daniel, Suong V. HOA a Stephen W. TSAI. *Composite Materials: Design and Applications*. 4th ed. Boca Raton (Florida): CRC Press, 2003. ISBN 1-58716-084-6.
- [10] WU, Cheng. Hooke's Law. *Efunda: engineering fundamentals* [online]. Sunnyvale (Californie): eFunda, 1999 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/hooke.cfm
- [11] Kelly, P. *Solid Mechanics Lecture Notes: An Introduction to Solid Mechanics* [online]. Auckland: The University of Auckland, 2013, poslední revize 14.5.2015 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/index.html>
- [12] ILCEWICZ, Larry a Kurt DAVIES. *Composite Materials Handbook: Volume 1 - Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials*. Wichita (Kansas): SAE International, 2012. ISBN 9781591245094.
- [13] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-verbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně.html>
- [14] MACEK, K. *Strojírenské materiály* [online]. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2003 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf

- [15] MALLICK, P.K. *Fiber-reinforcement Composites: Materials, Manufacturing and Design*. 3rd ed. Boca Raton (Florida): CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [16] KIMURA, Yoshiharu. *High-Performance and Specialty Fibers: Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future*. Tokyo: Springer, 2016. ISBN 978-4-431-55202-4.
- [17] SEYDIBEYOGLU, M. Ozgur, Amar K. MOHANTY a Manjusri MISRA. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. Duxford: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-101871-2.
- [18] MATKOVICH, V. I., SAMSONOV, G. V., P. HAGENMULLER a T. LUNDSTROM, ed. *Boron and Refractory Borides*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977. ISBN 978-3-642-66620-9.
- [19] Fibers for the World: People, Products and Technologies for the Rope, Cordage, and Netting Industry. In: *Honeywell Spectra* [online]. Colonial Heights (Virginie): Honeywell, 2017 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.packagingcomposites-honeywell.com/spectra/wp-content/uploads/2017/12/508-SP-BRO-RopeCordage-v6.pdf>
- [20] KLEIN, Lisa, Mario APARICIO a Andrei JITIANU. *Handbook of Sol-Gel Science and Technology: Processing, Characterization and Applications*. 2nd ed. New York: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-32101-1.
- [21] Polymerization of styrene. In: *Syrris* [online]. Rayston: Syrris, 2021 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.syrris.com/applications/polymerization/>
- [22] PAVLÍKOVÁ, Petra. *MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/2424/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Eva Mollíková.
- [23] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. 2nd ed. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 970-80-7080-662-3.
- [24] OHRING, Milton. *Engineering Materials Science*. San Diego: Academic Press, 1995. ISBN 0-12-524995-0.
- [25] IREDALE, Robert J., Carwyn WARD a Ian HAMERTON. *Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides* [online]. Bristol: University of Bristol, 2016 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670016301125?via%3Dihub>
- [26] PAYDAYESH, Azin a Mehrdad KOKABI. Highly filled organoclay/phenolic resin nanocomposite as an ablative heat shield material. In: *Iranian Polymer Journal* [online]. Teherán: Springer, 2015, s. 9 [cit. 2021-04-12]. ISSN 1735-5265. Dostupné z: doi:10.1007/s13726-015-0331-6
- [27] DA SILVA, Lucas F.M., Andreas ÖCHSNER a Robert D. ADAMS. *Handbook of Adhesion Technology*. 2nd ed. Porto: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-55410-5.
- [28] *3M: školení/vzdělávání* [online]. Praha: 3M, 2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/bonding-and-assembly-ctl/training-education/science-of-adhesion/#

- [29] ČSN EN 923:2016 - Lepidla – Termíny a definice. *Uvádění výrobků na trh: informační systém* [online]. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/3977?isCsnId=true>
- [30] TROUGHTON, M. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, c2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [31] ADHESION & COHESION. *Adhesives.org* [online]. Alexandrie (Virginie): The Adhesive and Sealant Council, 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.adhesives.org/adhesives-sealants/science-of-adhesion/adhesion-cohesion>
- [32] EBNESAJJAD, Sina. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*. 2nd ed. Waltham (Massachusetts): Elsevier, 2014. ISBN 978-0-323-26435-8.
- [33] 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP110 Gray. 3M [online]. St. Paul (Minnesota), 2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b40066461/
- [34] 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive DP125. 3M [online]. St. Paul (Minnesota), 2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b40066448/
- [35] WEGNER, Jürgen. Strategic Solutions: The Future of Adhesives and Sealants. *ASI: Adhesives and Sealants Industry* [online]. Troy (Michigan): BNP Media, 2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.adhesivesmag.com/articles/93778-strategic-solutions-the-future-of-adhesives-and-sealants>
- [36] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering* [online]. Boca Raton (Florida): CRC Press, 2002 [cit. 2021-5-17]. ISBN 978-1-4200-4198-9. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=oHLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=6M4Q__IZSS&sig=KT5ppAE0IPxUfq3tGz60RSQHS4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [37] A Review on Design and Development of Filament Winding Machine for Composite Materials. In: *Inpressco* [online]. Mandal's Institute of Technology: INPRESSCO, 2021, s. 4 [cit. 2021-5-17]. ISSN 2277–4106. Dostupné z: <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2016/10/Paper1674-77.pdf>
- [38] SCHMIDT, Günter. *World corrosion organization* [online]. WCO, 2009 [cit. 2021-3-24]. Dostupné z: https://corrosion.org/Corrosion+Resources/Publications/_/nowisthetime.pdf
- [39] EASY COMPOSITES LTD. *How to Make Carbon Fibre Sheet - 3 Alternative Methods* [online]. 2016 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch/?v=3uhR4jdFiS4&t=1s>
- [40] The World's Strongest Adhesive. *DELO: News* [online]. Sudbury (Massachusetts), 2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.delo-adhesives.com/us/delo-news/industries/cross-industrial-information/the-worlds-strongest-adhesive/>
- [41] VOLKERSEN, O. Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten, *Luftfahrtforschung*, Vol. 15, 1938, s. 41–47.
- [42] GOLAND, M. a E. Reissner. *The Stresses in Cemented Joints* [online]. 1944 [cit. 2021- 5 -17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.4009336>

- [43] CROCOMBE, A. D. Influence of the Spew Fillet and other Parameters on the Stress Distribution in the Single Lap Joint. *The Journal of Adhesion* [online]. 1981, **2006**(13), 17 [cit. 2021-5-17]. ISSN 00218464. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218468108073182>
- [44] GLEICH, D. M. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. 2001, **2012**(15), 13 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1163/156856101317035503>
- [45] DA SILVA, Lucas F. M. Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. *The Journal of Adhesion* [online]. 2006, **2006**(82), 27 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218460600948511>
- [46] KUPČÁK, Radim a Jan ZOUHAR. Application of Composite Materials in Sports Optics. *Manufacturing Technology: Engineering Science and Research Journal* [online]. 2020, **20**(2), 10 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: doi:10.21062
- [47] KUPČÁK, Radim. *VYUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI SPORTOVNÍ OPTIKY* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193529. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Zouhar.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ACTP	Acetylene-terminated Polyimide
ASPEC	Assembly Substrate Process End use Cost (spoj, podklad, proces, konečné použití, náklady)
B	Borová vlákna
BMI	Bismaleimid
CMCs	Ceramic Matrix Composites (Kompozity s keramickou maticí)
CSV	Comma Separated Values
CVD	Chemical Vapour Deposition (Chemická depozice z plynné fáze)
DGEBA	Diglycidylether bisfenolu A
DDS	Diaminodifenylsulfon
DETA	Diethylentriamin
FDM	Fused Deposition Modeling
GRP	Glass Reinforced Plastics (Kompozity se skelnou výztuží)
HDP	Hrubý domácí produkt
MKP	Metoda konečných prvků
MMCs	Metal Matrix Composites (Kompozity s kovovou maticí)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a vesmír)
PA	Polyamid
PAI	Polyamid-imid
PAN	Polyakrylonitril
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PMCs	Kompozity s polymerní maticí
PPS	Polyfenylsulfid
PSU	Polysulfon
PVA	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin Transfer Moulding (vysokotlaké vstřikování)
TGDDM	Tetraglycidyl-diaminodifenylmethan
UV	Ultrafialové (záření)
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (vysokotlaké vstřikování asistované vakuem)

Veličina	Symbol	Jednotka
Šířka vzorku	b_v	m
Délka vzorku	l_v	m
Počet vzorků	n_v	-
Počet vzorků v sérii	z	-
Měrná tepelná kapacita	c	J/kg·K
Průměr vlákna	d	μm
Modul pružnosti v tahu	E	GPa
matrice	E_{matrice}	GPa
výztuže	$E_{\text{výztuže}}$	GPa
Maximální síla	F_{max}	N
Modul pružnosti ve smyku	G	GPa
Stupeň polymerizace	n	-
Přídavek na přetečení lepidla	p_a	-
Přídavek na řezání laminátu	p_L	-
Střední aritmetická úchylka profilu	R_a	μm
Pevnost ve smyku	R_{ms}	MPa
Tloušťka spáry	s	mm
Plocha		
lepeného spoje	S_a	mm^2
laminátu	S_L	m^2
příčného průřezu vzorku	S_v	mm^2
Směrodatná odchylka pevnosti	S_x	MPa
Teplota		
skelného přechodu	T_g	$^{\circ}\text{C}$
tání	T_m	$^{\circ}\text{C}$
maximální provozní	T_{max}	$^{\circ}\text{C}$
Doba		
vytvrzení	t_{cure}	min
gelace	t_{gel}	min
Objem		
lepidla	V_a	ml
matrice	V_M	l
Výška laminátu	v_L	m
Aritmetický průměr pevnosti	\bar{x}	MPa
Koeficient teplotní roztažnosti	α	$1/^{\circ}\text{C}$
Smrštění objemu při vytvrzování	δV	%
Koeficient tepelné vodivosti	λ	W/mK
Poissonova konstanta	μ	-

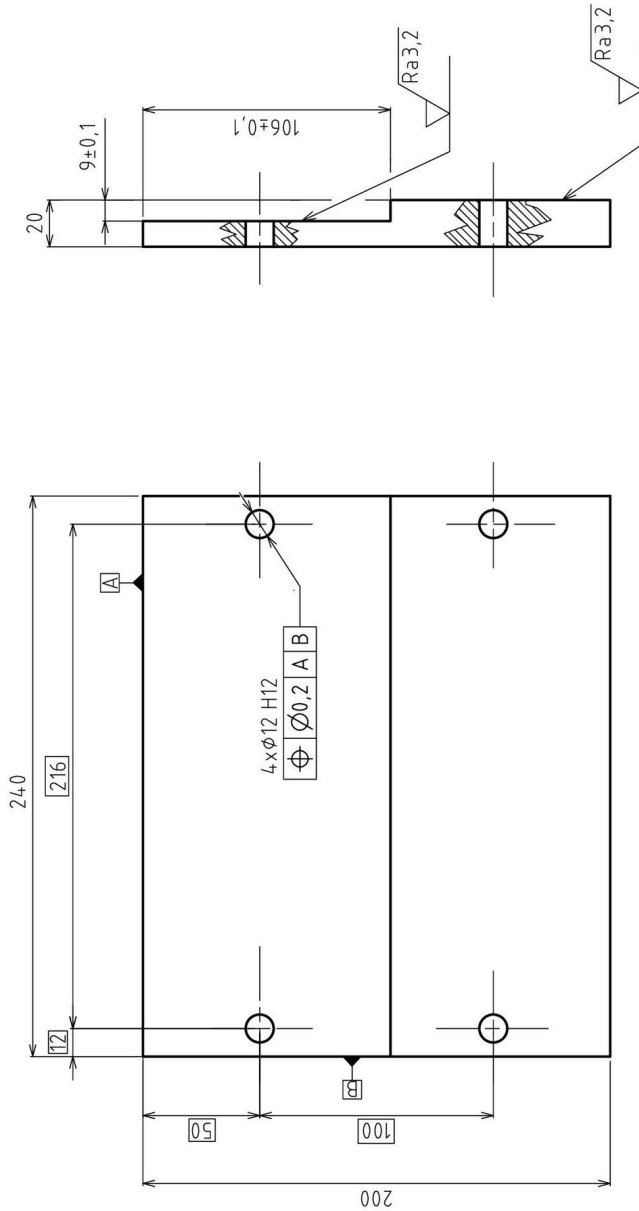
Relativní chyba	v	%
Mez pevnosti	σ_p	MPa
matrice	$\sigma_{p,matrice}$	MPa
výztuže	$\sigma_{p,výztuže}$	MPa
sklolaminátového vzorku	σ_v	MPa
přípustná mez pevnosti lepidla	τ_a	MPa
Poměrné prodloužení (deformace)		
mezní	ϵ_{max}	%
matrice	$\epsilon_{matrice}$	%
výztuže	$\epsilon_{výztuže}$	%
Dynamická viskozita	η	Pa·s
Hustota	ρ	kg/m ³

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výrobní výkresy přípravku

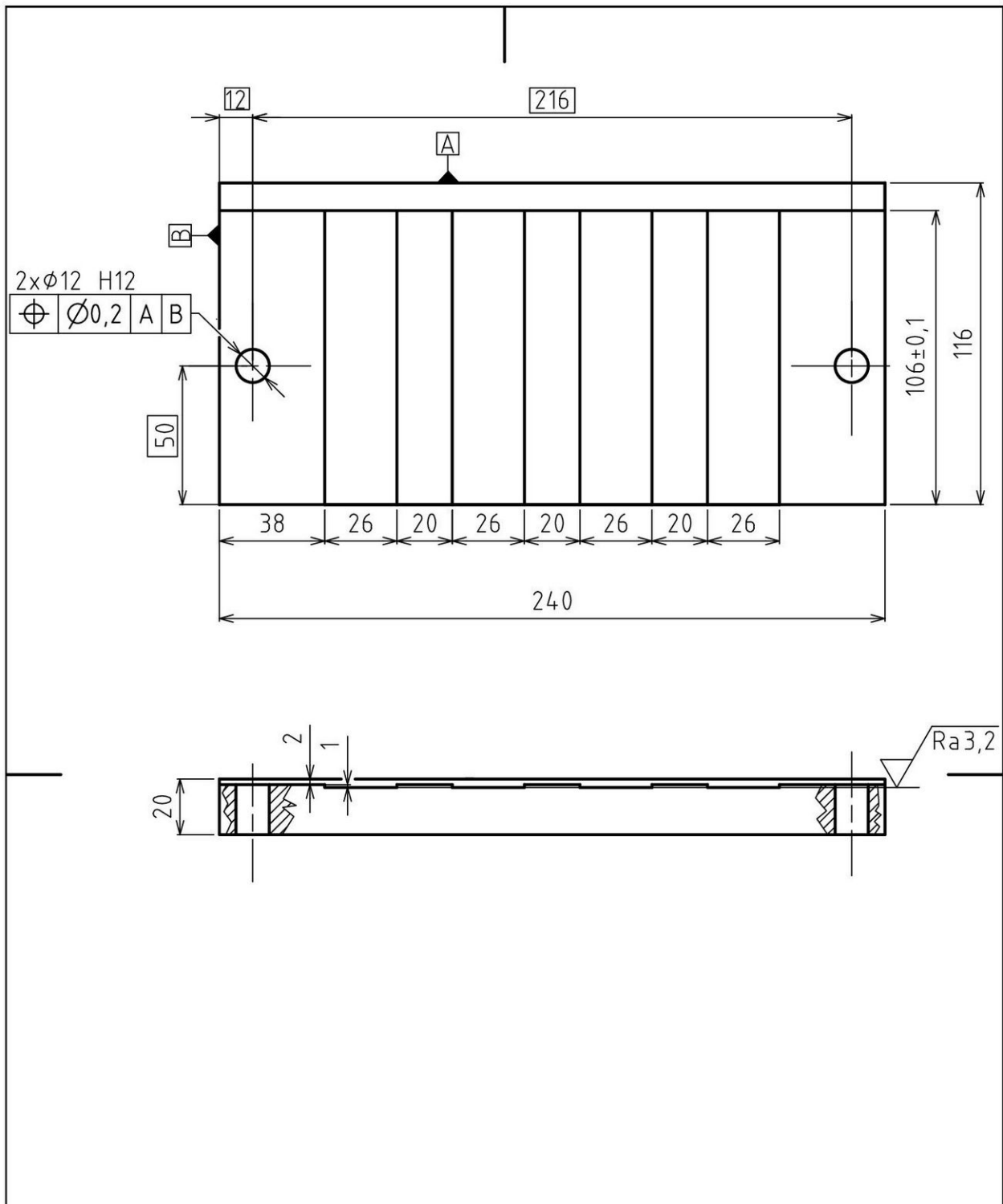
Příloha 1: Výrobní výkresy přípravku

Výrobní výkres Podstavky přípravku (1/3)



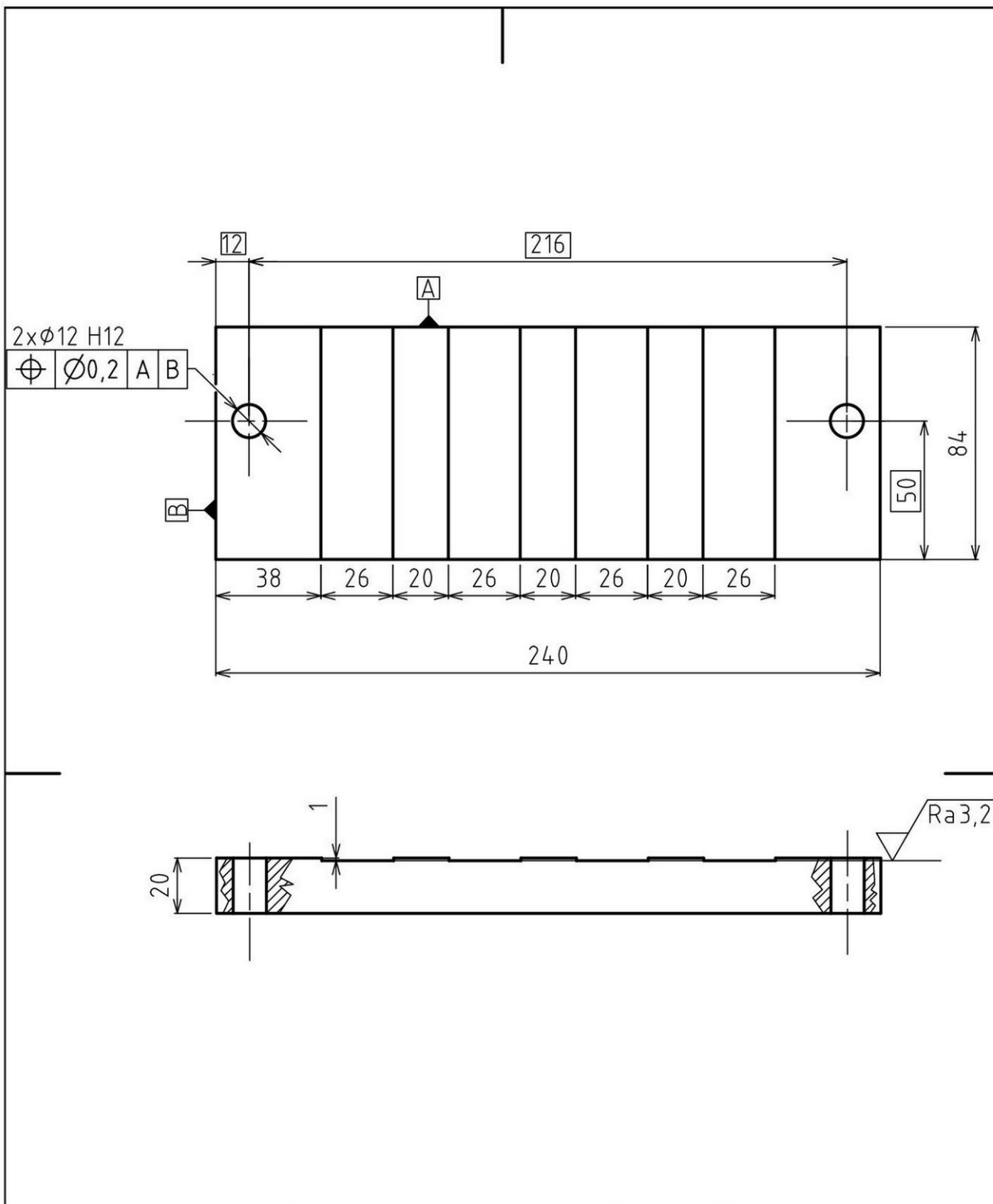
Struktura povrchu: Ra 6,3	(✓)	Hrany: -0,3	+0,3	Měřítko 1:2	Přesnost ISO 27168-mH
Polotovary		kg		Sestava PŘÍPRAVEK	Chránění
Druh dokumentu Kresil		Hmotnost		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
Schválil ing. RADIM KUPČÁK		Název		PODSTAVA PŘÍPRAVKU	
Datum vydání 20.05.2021		Číslo dokumentu		3-P-1	
		VÝKRES SOUČÁSTI		List 1/1	
		VOJTĚCH SCHUBERT			

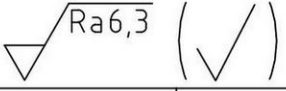
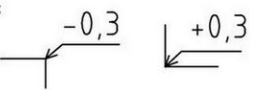

Výrobní výkres Přítlačné desky - 1 (2/3)



Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko 1:2		Přesnost ISO2768-mH Sestava PŘÍPRAVEK Promítání	
Materiál	Polotovar	Hmotnost		kg		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
		Druh dokumentu		VÝKRES SOUČÁSTI			
		Kreslil		VOJTĚCH SCHUBERT			
		Schválil		ing. RADIM KUPČÁK			
		Datum vydání		20.05.2021			
		Název		PŘÍTLAČNÁ DESKA - 1			
		Číslo dokumentu		4-P-2			
				List 1/1			

Výrobní výkres Příkladné desky - 2 (3/3)



Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko 1:2	Přesnost ISO2768-mH Sestava PŘÍPRAVEK Promítání 
Materiál	Polotovár	Hmotnost	kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
	Druh dokumentu	VÝKRES SOUČÁSTI		Název PŘÍTLAČNÁ DESKA - 2	
	Kreslil	VOJTĚCH SCHUBERT			
	Schválil	ing. RADIM KUPČÁK		Číslo dokumentu	
	Datum vydání	20.05.2021		4-P-3	
					List 1 / 1