

Tvarovatelnost a predikce mechanických vlastností výztuží při zpracování kompozitních materiálů

Bc. Vít Černý

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Vít Černý
Osobní číslo:	T18329
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Tvarovatelnost a predikce mechanických vlastností výztuží při zpracování kompozitních materiálů

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše v oblasti aktuálního stavu znalostí v oblasti tvarovatelnosti a deformovatelnosti tkanin a prepregů.
2. Problematika tvarovatelnosti výztuží a možnosti simulace tvarovatelnosti a deformovatelnosti výztužných systémů.
3. Vypracujte 3D návrh součástí s typickými tvary při lisování kompozitních materiálů.
4. Srovnání dostupných simulačních možností na trhu pro predikci tvarovatelnosti a deformovatelnosti výztuží.
5. Predikce vlastností kompozitních materiálů v SW HeliComposites.
6. Diskuse a závěr v oblasti významu vlivu tvaru výztuží na kvalitu finálních děl. Predikce mechanických vlastností z pohledu aktuálních možností.

Forma zpracování diplomové práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J. 2018, Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8

ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomovou práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

14. 5. 2020

Jméno a příjmení studenta:

Vít Černý

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem tvarovatelnosti a predikce mechanických vlastností výztuží při zpracování kompozitních materiálů, které byly dodané společností Toray Advanced Composites.

V teoretické části je popsána podstata kompozitů. Dále je vysvětlena problematika tvarovatelnosti a deformovatelnosti prepregů vyztužených vlákny a podpůrné programy, které se zabývají predikcí těchto jevů.

Praktická část je zaměřena na simulaci procesu tváření dvou typů skelných a dvou typů uhlíkových prepregů pomocí programu Aniform Prepost a zkoumání jejich vlastností. Druhá část spočívá v měření multiaxiálního skelného vlákna pomocí metody digitální korelace obrazu. V závěru byly výsledky zhodnoceny a prodiskutovány.

Klíčová slova: Tvarovatelnost, prepreg, simulace tváření, skelné vlákno, uhlíkové vlákno

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the study of formability and prediction of mechanical properties of reinforcements in the processing of composite materials, which were supplied by Toray Advanced Composites.

The theoretical part describes the essence of composites. Furthermore, the issue of drapability and deformability of fiber-reinforced prepregs and support programs that deal with the prediction of these phenomena are explained.

The practical part is focused on the creation of a simulation of the forming process of two types of glass and two types of carbon prepregs using the Aniform Prepost program and the investigation of their properties. The second part consists of measuring a multiaxial glass fiber using the method of digital image correlation. In conclusion, the results were evaluated and discussed.

Keywords: Drapability, prepreg, Forming simulation, glass fiber, carbon fiber

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za vedení, rady a připomínky k práci. Dále panu doc. Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za pomoc při měření pomocí metody digitální korelace obrazu. Dále společnosti Aniform Virtual Forming za poskytnutí programu pro simulaci tváření kompozitů. V poslední řadě rodičům a kamarádům za nesmírnou podporu při zpracovávání diplomové práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	10
1.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA	10
1.1.1 Skleněná vlákna	11
1.1.2 Aramidová vlákna	12
1.1.3 Uhlíková vlákna	13
1.2 MATRICE	16
1.2.1 Termosety	16
1.2.2 Termoplasty	20
2 VÝROBA VYZTUŽENÝCH MATERIÁLŮ	23
2.1 PREPREGY	23
2.2 TECHNOLOGIE VÝROBY S OTEVŘENOU FORMOU	24
2.2.1 Ruční pokládání	24
2.2.2 Ruční nastříkávání	25
2.3 TECHNOLOGIE VÝROBY SE ZAVŘENOU FORMOU	26
2.3.1 Vakuové lisování	26
2.3.2 Vakuová infuze	27
2.3.3 Reakční vstříkávání (RTM)	28
2.3.4 Pultruze	29
2.3.5 Autokláv	30
3 TVAROVATELNOST A DEFORMOVATELNOST TKANIN A PREPREGŮ	31
3.1 TVAROVATELNOST	31
3.1.1 Vrásnění	32
3.1.2 Přejížděvací zóny	33
3.1.3 Prokluz mezi přízí	33
3.2 DIGITÁLNÍ KORELACE OBRAZU	33
3.2.1 2D Digitální korelace obrazu	36
3.2.2 3D Digitální korelace obrazu	37
4 DOSTUPNÉ SIMULAČNÍ MOŽNOSTI PRO PREDIKCI TVAROVATELNOSTI A DEFORMOVATELNOSTI VÝZTUŽÍ	38
4.1 ANIFORM PREPOST	38
4.2 AUTODESK HELIUS	40
4.2.1 Autodek Helius PFA	41
4.3 PAM-COMPOSITES	41
4.3.1 PAM-FORM	42
4.4 DIGIMAT	43
4.4.1 Digimat MF	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	45

5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	46
6	SIMULACE TVÁŘENÍ	47
6.1	NÁVRH VÝROBKU PRO SIMULACI PROCESU TVÁŘENÍ.....	47
6.2	ZVOLENÝ MATERIÁL	48
6.3	POROVNÁNÍ SIMULACÍ.....	50
6.3.1	Simulace změny tloušťky.....	51
6.3.2	Vyhodnocení simulace tloušťky.....	54
6.3.3	Simulace zatížení vláken.....	56
6.3.4	Vyhodnocení simulace zatížení vláken.....	59
6.3.5	Simulace hloubky průniku	60
6.3.6	Vyhodnocení simulace hloubky průniku	63
6.3.7	Simulace celkového přemístění materiálu	64
6.3.8	Vyhodnocení simulace přemístění materiálu	67
6.3.9	Simulace změny směru vláken v ose y.....	68
6.3.10	Vyhodnocení simulace změny směru vláken v ose y	71
7	MĚŘENÍ POMOCÍ DIGITÁLNÍ KORELACE OBRAZU	72
7.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	72
7.1.1	Příprava formy.....	73
7.1.2	Proces laminování	73
7.2	MĚŘENÍ VZORKŮ NA DIC	73
7.2.1	Příprava měření	74
7.2.2	Vyhodnocení výsledků měření na DIC.....	76
	ZÁVĚR	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	87
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK	101
	SEZNAM PŘÍLOH	102

ÚVOD

Kompozit je pevná látka, která je složena nejméně ze dvou fází, které mohou být umělé i přírodní. Každá z nich zastává jinou specifickou funkci a má jiné fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti. Obvykle je jedna fáze kompozitu spojitá, tzv. matrice a druhá fáze je nespojitá, tzv. výztuž. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost). Hlavním cílem výztuží je tedy zlepšení mechanických vlastností. [1], [2]

Jedním z charakteristických rysů dnešní doby je stále širší okruh využití kompozitních materiálů. Má celou řadu předností oproti běžně používaným konstrukčním materiálům – nízká hustota, větší měrná pevnost, lomová houževnatost, odolnost vůči chemickým a povětrnostním vlivům, lepší tepelné, elektroizolační vlastnosti a snazší technologie výroby. Díky těmto vlastnostem se použití kompozitu rozšířilo do odvětví, jako je automobilový průmysl, letectví, stavební konstrukce, elektronika a astronautika. [3], [4]

Automobilový průmysl potřebuje produkovat plastové produkty s vysokou rozměrovou přesností a sníženou hmotností, proto se uchyluje k méně konvenčním výrobním procesům a zkoušením kompozitu namísto tradičních materiálů. Kompozit se využívá pro výrobu listových pružin namísto obvyklých ocelových, které jsou integrovány v osobních automobilech. Ve výkonných vozidlech je materiál střechy nahrazován kompozitem s přírodními vlákny, které působí jako termální bariéra. Využití v automobilovém průmyslu se velmi rozšiřuje, některé aplikace kompozitu jsou vyobrazeny na obr. 1. [5], [6]

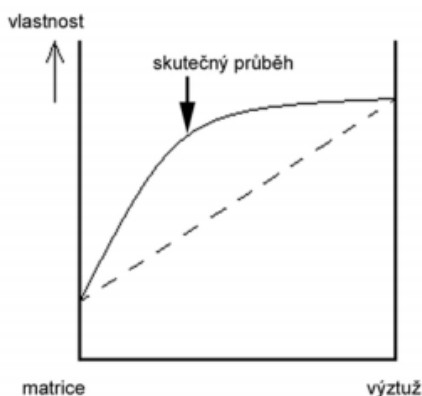


Obr. 1 Příklady výrobků z kompozitu [7], [8]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Vhodnou kombinací těchto dvou složek za pomoci vhodných výrobních technologií je možné vytvořit nehomogenní, anizotropní materiálovou strukturu, která odpovídá deformačním a pevnostním požadavkům na příslušné těleso. Oproti kovovým materiálům lze zvýšit měrnou pevnost, lomovou houževnatost, odolnost proti korozi a tuhost. Je možné také upravit tepelnou a elektrickou vodivost nebo redukovat hmotnost. Nevýhodou kompozitních materiálů je většinou komplikovanější výrobní technologie, vyšší cena, menší odolnost vůči vysokým teplotám, přítomnost zbytkových napětí z procesu výrobní technologie a jiné nevýhody. [2] [9]



Obr. 2 Synergické chování složek kompozitu [3]

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek (obr. 2). Existence synergismu je velmi důležitá, protože vede k získávání materiálu kvalitativně zcela nových vlastností. Příkladem synergického chování je kompozit z keramické matrice (Al_2O_3) vyztužená keramickými vlákny (SiC). Obě složky jsou samostatně velmi křehké, výsledný kompozit ale disponuje určitou mírou odolnosti proti náhlému křehkému porušení. Uvedené chování je zapříčiněno tím, že šířící se lomová trhlinka je na rozhraní fází bržděna. Kvalita rozhraní mezi fázemi má tedy velký dopad na vlastnosti výsledného kompozitu. [2], [3], [4]

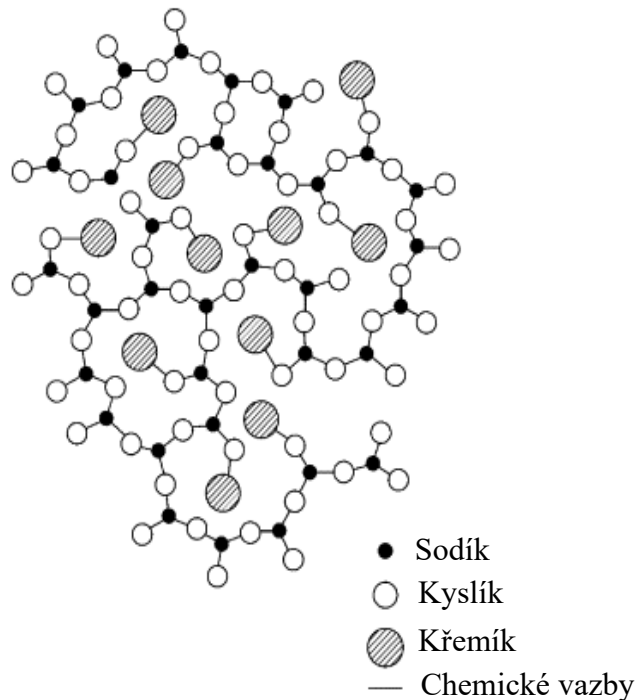
1.1 Vyztužující vlákna

Materiály ve formě vláken se jako konstrukční prvek používají velmi zřídka. Zajímavými se stávají až v kompaktní formě, jak je tomu právě v kompozitních materiálech. Vlákna

vyztužené plasty jsou složeny z vláken s velkou měrnou pevností a z úložného materiálu – matrice. [13]

1.1.1 Skleněná vlákna

Skelná vlákna (glass fiber) se vyrábějí z tavenin v různých složeních změnou poměru surovin jako jsou písek a oxid křemičitý, jíla a oxid hlinitý, kalcit a oxid vápenatý nebo

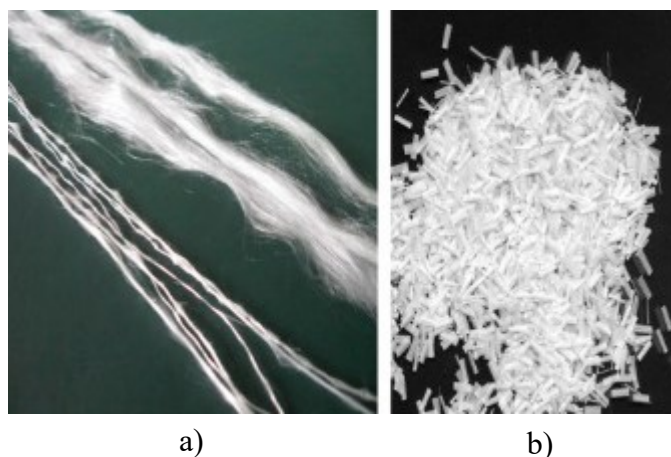


Obr. 3 Schématický diagram struktury skla [11]

kolemanit a oxid boritý (obr. 3). Proto různé typy skleněných vláken mají různé vlastnosti, například odolnost vůči chemikáliím nebo dobré mechanické vlastnosti. Záleží na množství křemíku a ostatních příměsí. Skleněná vlákna se dělí na základě kompozitu, ve kterém jsou použity. [10]

Skleněná vlákna jsou tvořena vysoce kvalitními vlákny, kde je základním materiálem křemík. Ve vysokopevnostních skleněných vláknech je přítomen hlinitokřemičitan, jehož délka je 5–24 μm . [11], [12], [13]

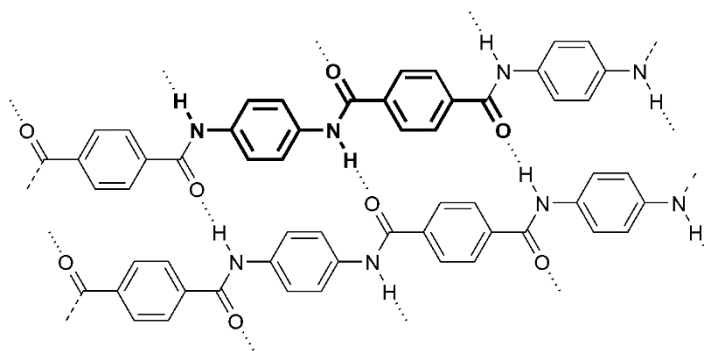
Skleněné vlákno se vyskytuje v různých tvarech a formách jako jsou souvislá vlákna, rovingy, střížová nebo nasekaná vlákna. Pro míchání s pryskyřicí je obvyklé použití souvislých nebo nasekaných vláken (obr. 4). Jejich průměr je obvykle 3,8 – 20 μm . [10], [12]



Obr. 4 a) Souvislá skleněná vlákna b) nasekaná skleněná vlákna [13]

1.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (obr. 5) (aramid fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností těchto vláken je vysoká pevnost, pružnost a odolnost proti abrazi. Vlákna degradují při teplotě kolem 500 $^{\circ}\text{C}$, což je zapříčiněno vysokou žáruvzdorností a nízkou hořlavostí. [13]



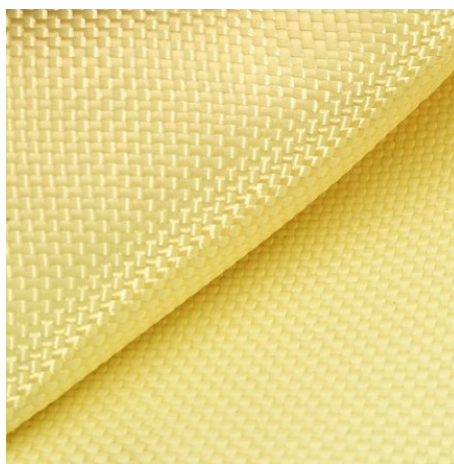
Obr. 5 Struktura aromatického polyamidu [13]

Nízká vodivost z nich dělá vynikající izolanty. I přes dobrou odolnost proti většině organických rozpouštědel jsou aramidová vlákna citlivá na sůl, chlor a některé látky na bázi kyselin. Po vystavení ultrafialovému záření degradují. Další mechanické a fyzikální vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce 1. [13], [14], [16]

Tabulka 1 – Mechanické a fyzikální vlastnosti aramidových vláken [13]

Aramid	Hustota [g·cm ⁻³]	Průměr [μm]	E-modul v tahu [N·mm ⁻²]	Mez pevnosti v tahu [N·mm ⁻²]	Tažnost [%]
Vysokotažný	1,45	12	80000	3600	4
S vysokou tuhostí	1,45	12	131000	3800	2,8
Ultratučný	1,45	12	186000	3400	2

Aramidová vlákna (obr. 6) se používají pro velmi náročné aplikace, jako jsou balistické ochranné prvky, žáruvzdorné rukavice nebo hasičské uniformy. Kevlar se používá jako výztuž pro pneumatiky. Vlákna mohou figurovat jako náhrada za azbest v obložení brzdového systému. Poměr vysoké pevnosti a nízké hmotnosti je žádoucí jako výztuž v kompozitech. Ohybová tolerance vyniká především u křídel letadel. Korozí je velký problém u podmořských potrubních systémů ropných společností, z tohoto důvodu byly

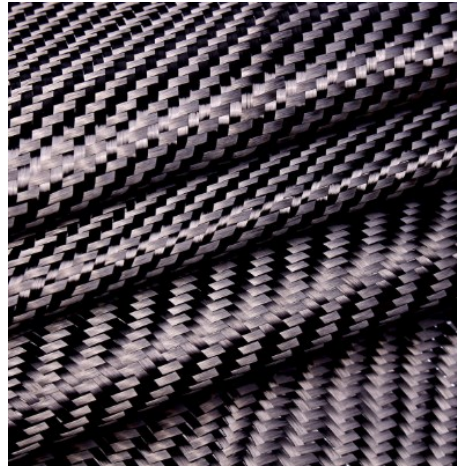


Obr. 6 Aramidová vlákna [15]

vyvinuty plastové trubky. Ve sportovním odvětví je vlákno používáno k výrobě tětiny luku, výpletu tenisových raket, hokejových holí, lyží, běžecké obuvi nebo jako součást trupu plachetnic. [14], [16]

1.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (obr. 7) (carbon fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpují téměř všechny prvky kromě uhlíku. Se stoupající teplotou (zvyšující se grafitizací) se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800 °C je tvorba grafitové struktury ukončena.

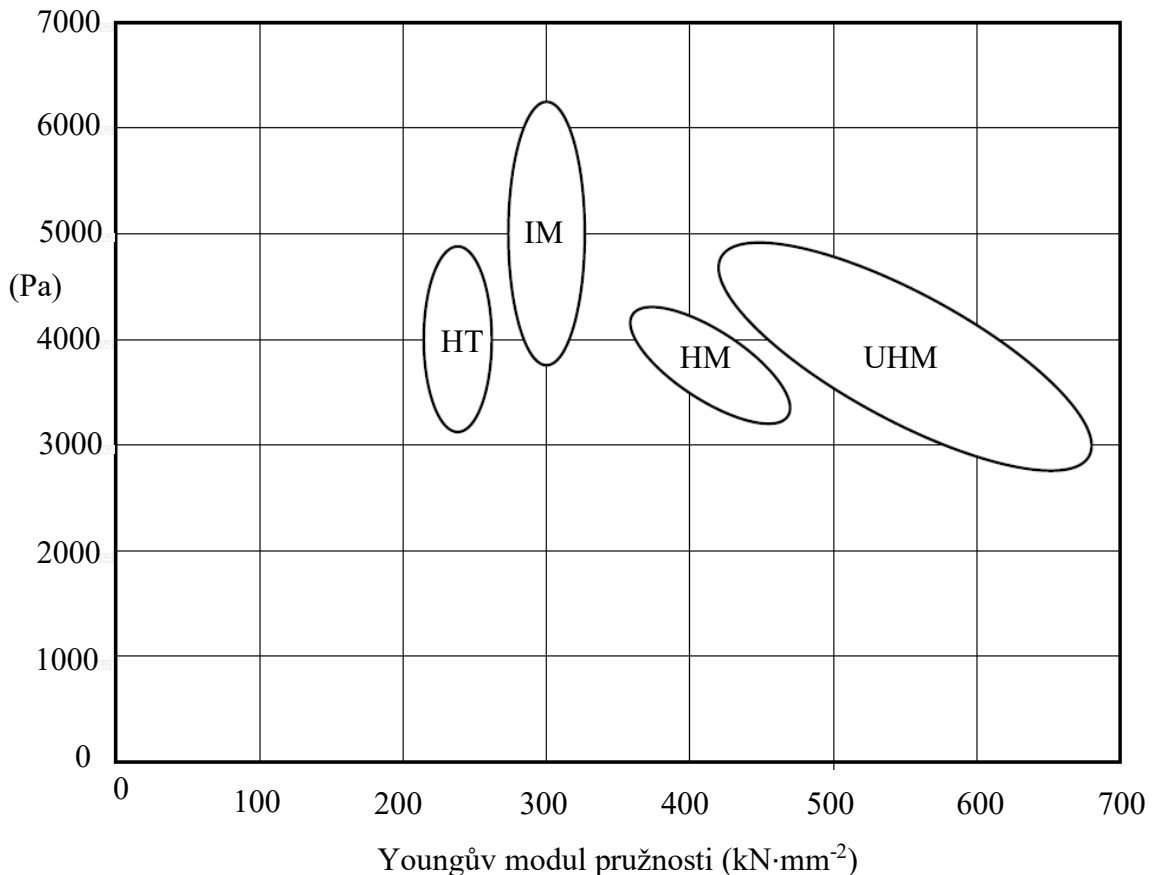


Obr. 7 Uhlíkové vlákno [21]

Atomy uhlíkového vlákna jsou spojeny v krystaly orientované paralelně k dlouhé ose vlákna. Několik tisíc uhlíkových vláken je spřádáno do příze, které jsou tkány do tkaniny. Kromě vysoké pevnosti oplývají vlákna i jinými vlastnostmi, které mají vysoké využití v širokém okruhu průmyslů. [13], [17], [18], [19]

- Uhlíková vlákna mají oproti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota youngova modulu
- Vysoká pevnost i hodnoty modulu pružnosti až do teploty 500 °C, nízká hustota
- Mimořádně vysoká korozní odolnost, výjimkou jsou silně oxidační prostředí
- Uhlíková vlákna jsou ve srovnání se skleněnými vlákny silně anizotropní
- Při zpracování se uhlíková vlákna velmi lámou a za normálních podmínek je jejich křehkost velmi vysoká, proto se využívá povrchové úpravy apretační směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Ta slouží jako ochrana při zpracování a současně jako činidlo pro zlepšení vazby mezi vláknem a matricí
- Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Mají lepší dynamické vlastnosti než hliník a ostatní oceli
- Rychlost hoření kompozitu složeného z 90 % uhlíkových vláken je velmi pomalá. [13]

Uhlíková vlákna lze dělit podle několika kritérií, jedním z nich je Youngův modul pružnosti (obr. 8). Vlákna s malým modulem pružnosti mají hodnotu pod $240 \cdot 10^6$ kPa. Další rozdělení zahrnuje vlákna se standartním, středním, vysokým nebo s ultravysokým modulem pružnosti. Karbonová vlákna s ultravysokým modulem pružnosti dosahují hodnot mezi $500 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$ kPa. Ocel má Youngův modul přibližně kolem $200 \cdot 10^6$ kPa. [18]



Obr. 8 Rozdělení uhlíkových vláken (ve stav bezprostředně po výrobě) HT – standartní, IM – středně-, HM – vysoko, UHM – ultravysokomodulová [13]

Dále můžeme vlákna měnit např. podle struktury (Tab. 2) [22]

Tabulka 2 – Rozdělení uhlíkových vláken podle struktury [13]

Hlavní znaky struktury	Typ uhlíkového vlákna
Roviny vrstev převážně rovnoběžné s osou vláken, osově nepravidelná struktura	Vysoce pevné (HT) vlákno
Roviny vrstev zcela rovnoběžné s osou vláken, osově pravidelná struktura	Vlákno s vysokým modulem pružnosti
Žádná znatelná orientace, velmi slabé uspořádání vláken v osovém směru	Sekaná vlákna s nízkou pevností

Karbonová vlákna jsou nejvíce využívána jako výztuž v polymerních kompozitech. Ty nachází využití v letectví na trupy a křídla letadel. Ve větrných elektrárnách mohou být použity v jejich rotorech. Výjimkou není použití ve sportovním odvětví – čluny, golfové



Obr. 9 Výrobky z uhlíkových vláken v automobilovém průmyslu [26], [27]

hole, skluznice lyží, dřívky sportovních šípů a dalších sportovních potřebách. V dnešní době je snaha o větší zakomponování uhlíkových vláken do automobilového průmyslu. Nárazníky, části karoserií nebo listové pružiny bývají zhotoveny z těchto vláken (obr. 9). [17], [20]

1.2 Matrice

Matrice je materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne stálý výrobek. Hlavním úkolem matrice je zajistit dokonalé spojení nosné části a vytvoření vnějšího tvaru, který musí zajistit správnou funkci tělesa. Matrice má dále tyto funkce:

- Přenos zatížení na vlákna
- Přenos zatížení mezi jednotlivými vlákny
- Ochrana vlákna před vlivem prostředí
- Zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku

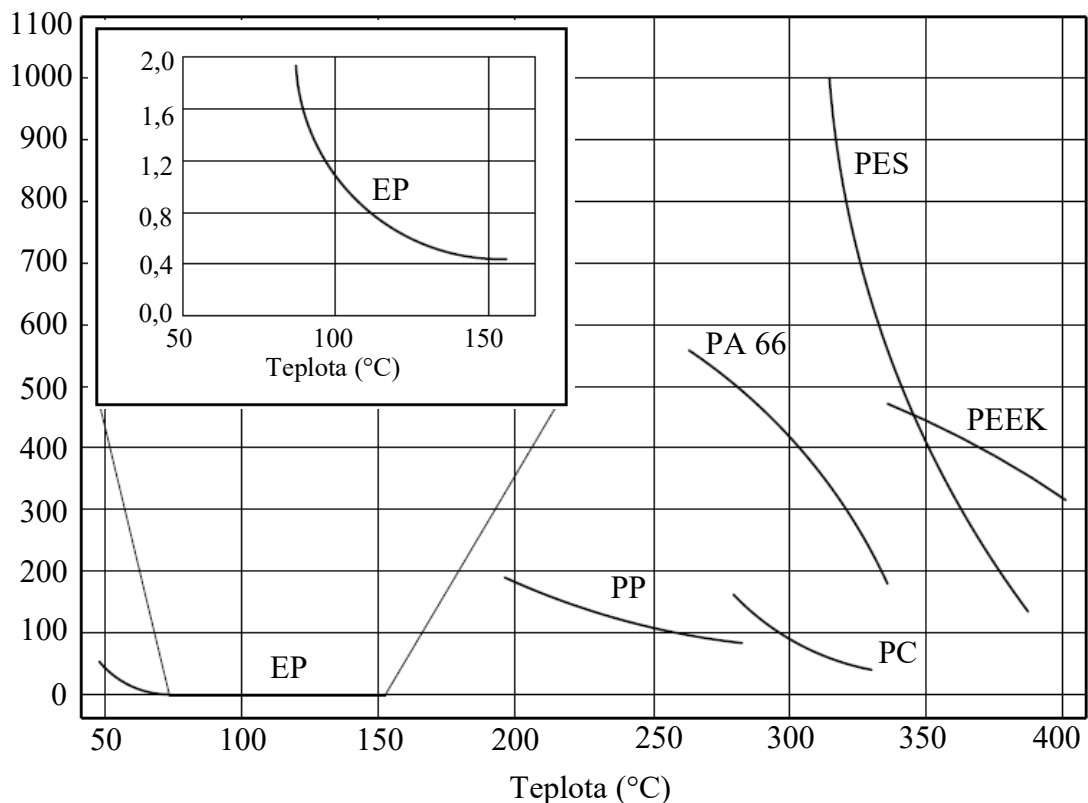
Nejčastěji jsou používány organické polymerní matrice, které se dělí na termosety a termoplasty. [1], [13], [23]

1.2.1 Termosety

Velká část termosetů je používána jako materiál k výrobě vysoce kvalitních matic kompozitů z důvodu jejich přirozené reaktivity a lehké impregnace. Zahřátím na určitou

teplotu se termoset změní na taveninu, zchlazením zase nevratně zpět na tuhou látku. Výsledná zesíťovaná struktura nemůže být znovu tavena, vysoká teplota ale velmi ovlivní její mechanické vlastnosti. Jsou upřednostňovány hlavně z důvodu nižší viskozity ve formě taveniny, než mají termoplasty (obr. 10). Na obou svislých osách je znázorněna viskozita η ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) [13], [24], [25]

Po vytvrzení nelze termosety znovu ohřát a tvarovat. Proto je velmi těžké tyto kompozity recyklovat. Reakční pryskyřice není sama o sobě recyklovatelná, ale některým novým společnostem se úspěšně povedlo odstranit pryskyřici z kompozitů anaerobním procesem zvaný pyrolýza a jsou schopné získat zpět alespoň výztužná vlákna. [31]



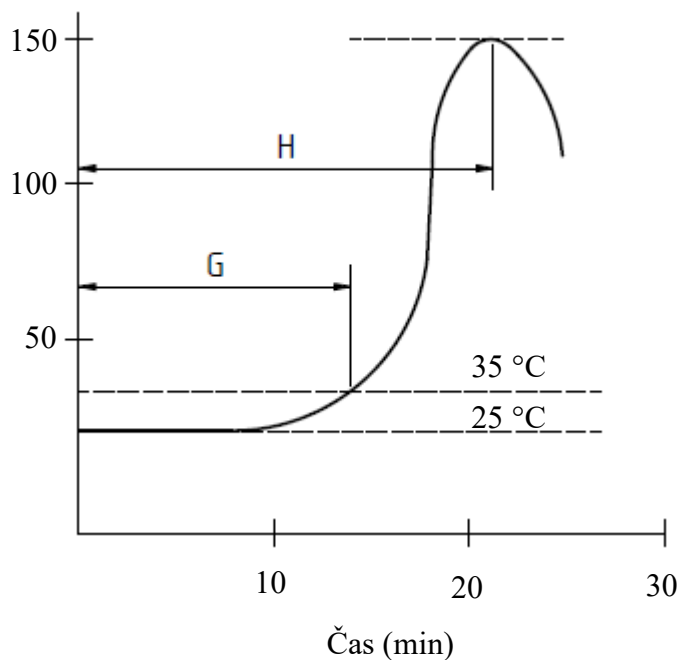
Obr. 10 Viskozita termosetů a termoplastů při prosycování vyztužujících vláken [13]

Reaktivní pryskyřice tvoří největší část termosetů, která je nejčastěji používána k výrobě kompozitů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které jsou za pomoci iniciátorů, katalyzátorů, urychlovačů nebo jiných tvrdidel vytvrzovány. Termosetické kompozity jsou děleny podle toho, zda obsahují:

- Nepravidelně rozdělená krátká vlákna (délky 6–75 mm)
- Tkaniny nebo rohože prosycené pryskyřicí. [13]

Do nejdůležitějších typů reaktivních pryskyřic lze řadit nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylesterové nebo fenakrylátové pryskyřice nebo pryskyřice epoxidové, fenolické, metakrylátové a izokyanátové. [13]

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice** – jedná se o nejrozšířenější typ pryskyřice pro výrobu matrice. Můžou být vyrobeny z různých kyselin, alkoholů a monomerů. Obecně se jedná o viskózní kapaliny, které obsahují polyester rozpuštěný



Obr. 11 Exotermní vytvrzování nenasyceného polyesteru

– G – želatinace, H – vytvrzování [24]

v monomeru (styrenu). Polyesterem je snižována viskozita a podporuje síťování. Dobrý poměr mezi cenou a lehkým zpracováním je výsadou těchto pryskyřic. Polyestery mohou být složeny tak, aby byly pružné a odolné, nebo tvrdé a křehké a odolávaly chemickým látkám a počasí. Přidáním chlóru nebo bromu je zvýšena odolnost proti hoření, zatímco zamícháním termoplastické pryskyřice do sloučeniny je zlepšen povrch výrobku. [24]

Ke zkrácení času zesíťování jsou použity katalyzátory a akcelerátory. Po přidání iniciátorů začne samotný proces. Po pár minutách (záleží na různých podmínkách) začne „želatinace“ za průběhu exotermické reakce, která je způsobena řetězovou polymerací. Teplota radikálně vzrůstá při konečném vytvrzování (obr. 11). [24], [25]

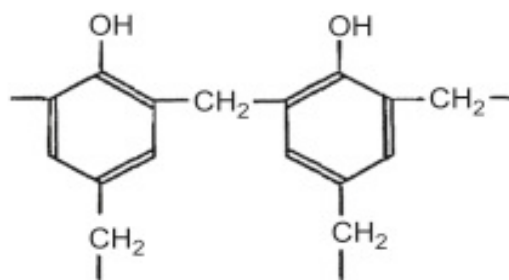
- **Epoxidové pryskyřice** – za normálních teplot se mohou vyskytovat jako kapalné nebo pevné látky, které většinou obsahují přídatné pomocné sloučeniny, např. rozpouštědla.

Několik výhod je spojováno s těmito pryskyřicemi. Protože mají nízkou viskozitu, je možné s nimi utěsnit mezery i za pokojové teploty. Nízké smršťování je příčinou malých napětí po vytvrzování. Díky vysoké přilnavosti jsou využívány v laminátech, a především v uhlíkových kompozitech, které mají využití v automobilovém, leteckém a vojenském průmyslu. [13], [24], [25], [28]

- **Vinylesterové pryskyřice** – vycházejí ze základních složek fenolických pryskyřic, jsou podstatně reaktivnější a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesítnění. To je důvodem vyšší teplotní odolnosti a relativně větší křehkosti.

Vlastností vinylesterových pryskyřic je především v oblastech s vysokým korozním namáháním (velkorozměrové trubky v odsírovacích zařízeních, pračky, chladicí věže, komíny, potrubí a pro stavbu lodí a jiné.) Vysoká pevnost těchto pryskyřic je využita u nosných konstrukcí (mosty s pilíři z tažených profilů). [13]

- **Fenolické pryskyřice** (obr. 12) – vyrábějí se kondenzací fenolů a 30–50 % vodných roztoků aldehydů. V kompozitních materiálech se vyskytují především díky mechanické odolnosti, vysoké odolnosti proti zatížení za zvýšených teplot a kvůli resistenci proti rázům.



Obr. 12 Chemická struktura fenolů. [29]

Oproti jiným polymerním matricím excelují v odolnosti proti ohni, kouři a toxicitě. Proto jsou první volbou, pokud jde o požadavek požární ochrany při stavbě budov. Fenolické kompozity nachází využití v interiérech letadel a autobusů, narůstající využití je i v námořní dopravě. [13], [29]

1.2.2 Termoplasty

Termoplasty se liší od termosetů zpracovatelskými i uživatelskými vlastnostmi. Reaktivní pryskyřice jsou za normálních teplot nízkoviskózní. Proto velmi dobře smáčejí a prosycují vlákna výztuže. Chemickým vytvrzením se dosáhne konečné konzistence. Termoplasty jsou za normálních teplot pevné látky, po zahřátí na určitou teplotu (většinou nad 200 °C) dosahují požadované viskozity. [13]

Oproti reaktivním pryskyřicím se termoplasty liší dvěma zásadními rozdíly. První z nich je, že termoplastické pryskyřice disponují větší rázovou odolností v porovnání s termosety. Někdy je rozdíl až 10krát větší. [30]

Druhou velkou výhodou je schopnost termoplastických kompozitů se znovu tavit a přetvářet. Při impregnaci za tepla a tlaku vláken s termoplastickou pryskyřicí primárně vzniká fyzická změna ve struktuře. Tento jev je příčinou možnosti opětovně přetvářet termoplastickou pryskyřici. Termoplastické kompozity mohou být navíc na konci jejich životnosti recyklovány [30]

Tabulka 3 – Termoplasty využívané v kompozitech [30]

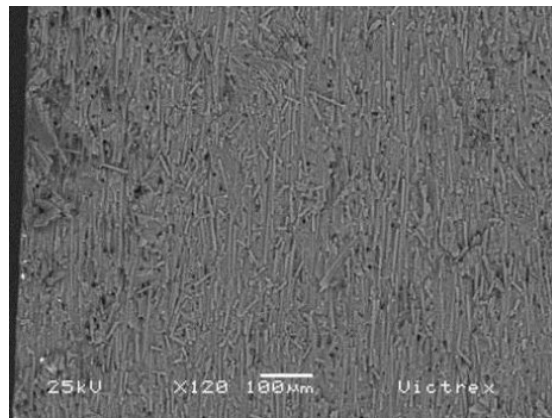
Polymer	Morfologie	T _g (°C)	T _m (°C)	Proces (°C)	Cena
PBT	Semikrystalický	56	223	250	Střední
PA6	Semikrystalický	48	219	245	Nízká
PA12	Semikrystalický	52	176	224	Nízká
PP	Semikrystalický	-20	176	190	Nízká
PEEK	Semikrystalický	143	343	390	Vysoká
PEI	Amorfní	217	-	330	Střední
PPS	Semikrystalický	89	307	325	Nízká
PEKK	Semikrystalický	156	306	340	Střední

Přirozené skupenství termoplastických pryskyřic je pevné, proto je obtížná impregnace vyztužujícími vlákny. Pryskyřice musí být ohřata na určitou teplotu, poté je třeba vyvinout tlak, při kterém je možné integrovat vyztužující vlákna. Finální ochlazení musí probíhat stále za daného tlaku. Rozdělení je postaveno především na teplotě, při které je polymer schopen udržet si funkci, tj. teplota skelného přechodu T_g (tabulka 3). Na této teplotě se amorfní část polymeru změní ze skelné na gumovou fázi. Semikrystalické termoplasty jsou schopny

vydržet teplotu vyšší, než je teplota T_g , protože pouze jejich amorfní část se stává gumovou. Krystalická část zůstává tuhá až do teploty tavení T_m . [30], [31]

Dále mohou být děleny na termoplasty s krátkými, dlouhými nebo nekonečně dlouhými vlákny.

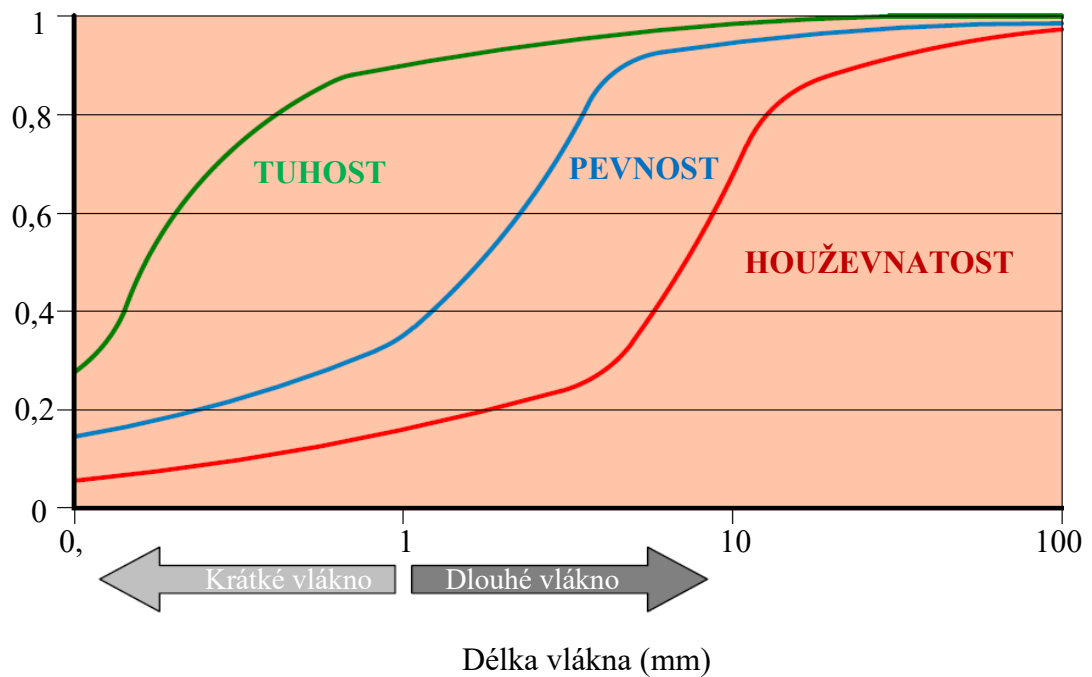
- **Krátká vlákna** (do 0,2 mm) (obr. 13) – především pro vyztužení a zesílení matrice při vstřikování. Jsou vyrobeny zamícháním vláken přímo do roztaveného termoplastu. Délka vlákna a náhodná orientace vláken uvnitř matrice umožňují relativně snadno dosáhnout dobrého smáčení (zcela obalit všechna vlákna s matricí). V porovnání s ostatními typy vláken jsou kompozity s krátkými vlákny nejjednodušší na výrobu, ale nabízejí nejmenší zvýšení mechanických vlastností. Obsah vyztuže se většinou pohybuje mezi 15–50 hmotnostního procenta. Při obsahu vyztuže méně než 15 % se vlastnosti téměř nemění, při obsahu nad 50 % je obtížné rovnoměrné smáčení. [13], [33]



Obr. 13 Mikrosnímek krátkých vyztužujících vláken [33]

- **Dlouhá vlákna** – bývají okolo 2 cm dlouhá. Vlastnosti kompozitu záleží na parametrech vláken, jako je například jejich množství, velikost a poměr, homogenita rozložení a potažení, spojené s přilnavostí. Vlákná dlouhá 10 mm je možno vyrobit vstřikovacími lisami, vlákna dlouhá více, než 20 mm se nemohou vyrábět konvenčními způsoby. Je nutno použít techniku vytlačování se stlačováním. Výrobní surovinou pro dlouhá vlákna jsou 13 mm dlouhé „pelety“, které jsou vyrobeny za pomoci tlaku a tepla pultruzním procesem. Pro výrobu konečného výrobku je vhodné použít technologii lisování. [32], [33]

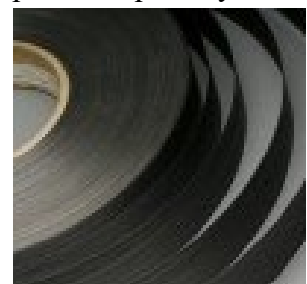
Dlouhá vlákna mají schopnost kombinovat vysoké úrovně tuhosti, pevnosti a houževnatosti v jednom materiálu v závislosti na jejich délce (obr. 14). Na svislé ose je znázorněna výkonnostní úroveň. V tomto ohledu je těžké naleznout konkurenci. Velmi dobré mechanické charakteristiky a nízká hmotnost jsou důvody, proč kompozity s dlouhými vlákny nahrazují v mnoha aplikacích oceli. [32], [34]



Obr. 14 Vliv délky vlákna na kvalitě vlastností [34]

Kromě mimořádné pevnosti, tuhosti a houževnatosti disponují dlouhá vlákna i dobrou odolností proti křepeu a únavovému zatížení. Ponechávají si funkci i při nízkých teplotách, při vyšších teplotách si udrží své strukturální schopnosti lépe než nevyztužený polymer. Dlouhá vlákna jsou rozměrově stálé a mají schopnost tlumit vibrace. [34]

- **Nekonečně dlouhá vlákna** – používají se u termoplastů vyztužených skleněnou rohoží, tkaninou nebo jednosměrnými pásy jako polotovary pro další procesy nebo zpracování. „Nekonečná“ znamená, že jejich délka může být v rozmezí od několika desítek centimetrů až po stovky metrů. Vyskytují se v různých formách (tyče vyrobené pultruzí, tkané rohože), nebo například jako páska (obr. 15). Je vyrobena impregnační vlákna danou maticí a formována do této geometrie. [33]

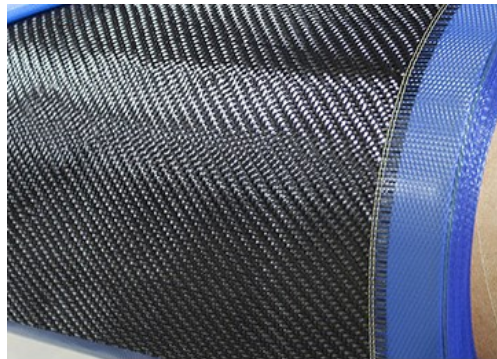


Obr. 15 Páska [33]

2 VÝROBA VYZTUŽENÝCH MATERIÁLŮ

2.1 Prepregy

Pro výrobu dílů lisováním nebo v autoklávu se nejčastěji používá předimpregnovaná výztuž, tzv. prepreg (obr. 16). Výhodou je, že složitý proces prosycování výztuže pojivem je oddělen od dalšího zpracování.



Obr. 16 Prepreg [35]

Obecně je matrice z pryskyřice v kompozitu částečně konzervována pro lepší budoucí zpracování a uložena do chladného prostředí, aby bylo zamezeno kompletní polymerizaci. U tohoto postupu je nutné použít speciální zařízení a má velký vliv na kvalitu výrobku. Hotový prepreg je připraven pro vyložení formy bez nutnosti přidat další pryskyřici. Mezi výhody využití této technologie patří: [13], [35], [36], [37]

- **Dosažení maximálních pevnostních vlastností** – laminát zhotovený ručním pokládáním obsahuje většinou příliš mnoho pryskyřice, která je důvodem vyšší křehkosti. Prepreg obsahuje kolem 35% pryskyřice, což je ideální k dosažení nejlepších vlastností, kterých je obecně nemožné dosáhnout ručním pokládáním. [35]
- **Stejnorodost a opakovatelnost** – protože technologií výroby prepregů je eliminován lidský faktor, je teoreticky množství pryskyřice stejnorodé a tloušťka identická ve všech směrech. [35]
- **Méně odpadu** – Ručním pokládáním je promarněna část pryskyřice, u technologie výroby prepregů podobný problém nenastává.
- **Kratší čas konzervace** – po ohřevu a konzervaci je součást ihned připravena vykonávat svoji funkci. Není nutné čekat standardních 48 hodin na plnou konzervaci. [35]

- **Lepší vzhled povrchu** – uložení do formy a poté otevření ovlivňují vzhled součástí. Technologii výroby prepregů jsou eliminovány vzduchové bubliny a povrch je hladký a lesklý. [35]

Výroba a použití prepregů je však provázena i několika nevýhodami. Vysoká cena převažuje i součet nákladů na pryskyřici, konzervaci a tkaniny. Je doporučeno prepreg udržet v chladném prostředí, protože teplo snižuje životnost. [35]

Využití prepregů je v mnoha aplikacích, ve kterých je zapotřebí vysoká kvalita výrobku. Některé z nich jsou například:

- Interiéry a podlahy letadel, komponenty do kosmických lodí
- Automobilové součástky a komponenty, nářadí, balistické panely
- Součásti odolné proti UV záření a vysokým teplotám, sportovní potřeby
- Uhlíkové kompozity, povrchy odolné proti rázům
- Elektronické vysílače, nehořlavé lamináty. [36]

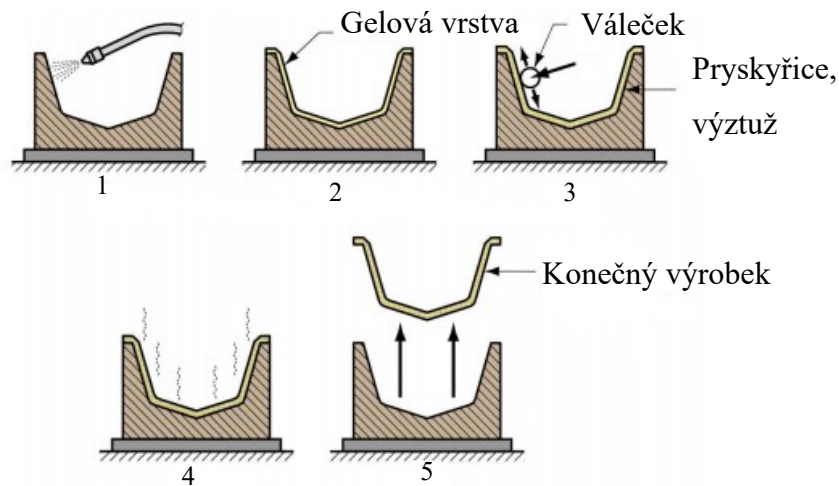
2.2 Technologie výroby s otevřenou formou

Principem těchto technologií je kladení pryskyřice a vyztužujících vláken do otevřené formy, kde jsou vystaveny vzduchu. Tento způsob výroby využívá různých procesů, jako jsou ruční pokládání a nastřikování, ruční lití nebo navíjení. Je často nenákladný a je vhodný pro prototypy výroby nebo malé série. [38]

2.2.1 Ruční pokládání

Ruční pokládání (obr. 17) je nejstarší a nejjednodušší metodou výroby kompozitů se skleněnými vlákny. Nejprve je nutné nasekat výztuž, která se impregnuje pryskyřicí. Následně se tato výztuž vloží do otevřené formy potřené antiadhezním činidlem a gelovou vrstvou. Forma je potřená proto, aby nedošlo k přilnutí na povrch formy. Válečkováním se dosáhne požadované tloušťky a je odstraněn nežádoucí vzduch z výrobku. Prepreg může být použit ve zmíněné technologii. [38], [39], [40]

Jedná se o nenákladnou, jednoduchou metodu, kterou je možno zhotovit široké spektrum součástí. Velkou nevýhodou je nekonzistence, která vzniká z důvodu přítomnosti lidského faktoru. Kvalita výrobku je z velké části závislá na pracovníkovi. Pryskyřice si musí udržet nízkou viskozitu, aby bylo možné s ní pracovat. Vlastnosti výrobku mohou být zhoršeny a zdraví pracovníka je vystaveno neoptimálním podmínkám. [38], [39], [40]

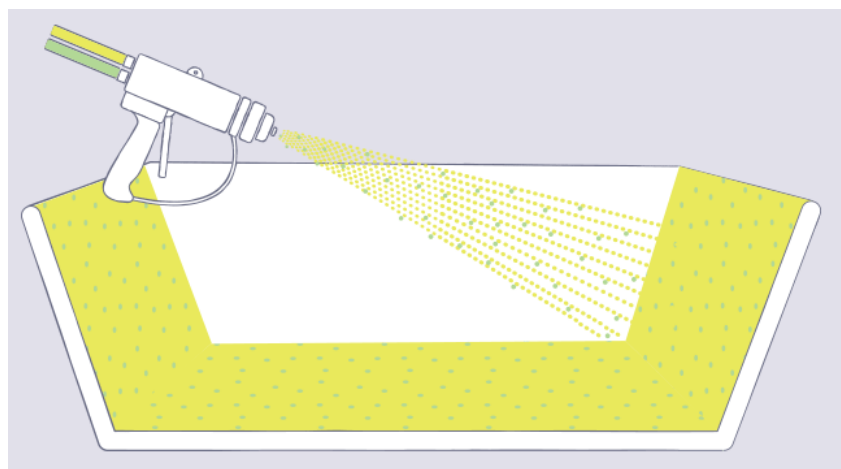


Obr. 17 Postup technologie ručního kladení – 1) Nanášení antiadhezního činidla, 2) Tenká gelová vrstva, 3) Aplikace vrstev pryskyřice a výztuže, 4) Vytvrzení, 5) Vyjmutí výrobku [39]

Metoda ručního pokládání se používá k výrobě trupů lodí, bazénů, velkých kontejnerů a filmových a divadelních rekvizit. [39]

2.2.2 Ruční nastříkávání

Technologie ručního nastříkávání (obr. 18) je velmi podobná ručnímu pokládání s výjimkou použití rozprašovací pistole jako nástroje k nanesení pryskyřice a nasekané výztuže na povrch formy. Operátor je schopný ovlivnit tloušťku nanášené vrstvy, závislost na jeho zručnosti je ale vyšší než u ručního pokládání. Metoda je obdobně jednoduchá, nenákladná a využívá prosté nástroje. [38], [39]



Obr. 18 Schéma ručního nastříkávání [38]

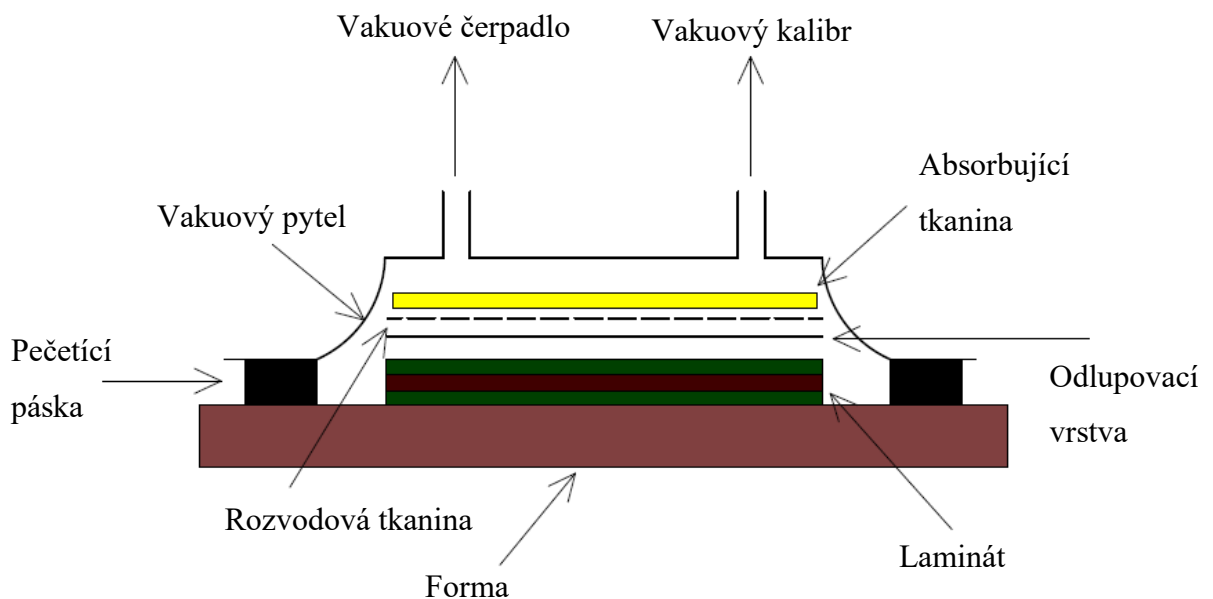
Gelová vrstva a separátor jsou aplikovány na povrch formy. Nařezaná vlákna a pryskyřice jsou poté nastříknuty pistolí na tuto vrstvu. Pro požadovanou tloušťku se mohou nanést další vrstvy nasekaných vláken. Postup je vhodný pro výrobu trupů lodí, součástí do přepravy a sprchových jednotek. [38], [39]

2.3 Technologie výroby se zavřenou formou

U těchto technologií je principem vytvrzování pryskyřice a vláken uvnitř dvoudílné formy, kam je zamezen přístup vzduchu. Automatizace je většinou nutná a vyžaduje speciální vybavení, tudíž jsou tyto metody využívány v závodech, kde je roční produkce nejméně 500 000 součástí. [38]

2.3.1 Vakuové lisování

Vakuové lisování (obr. 19) je proces navržen tak, aby vylepšil mechanické vlastnosti laminátu (dvě a více vrstev vyztužujícího vlákna spojeného pryskyřicí). Produktem je vysoce kvalitní výrobek kompletně bez vzduchových bublin a s velmi dobrým povrchem, protože výrobek není v kontaktu s formou. Této kvality se dosáhne zapečetěním součásti do polypropylenového vaku, upraveného tak, že je schopný odolat zvýšeným teplotám. Vzduch je vypumpován a výrobek je vystaven tlaku, který jej slisuje. [38], [41]



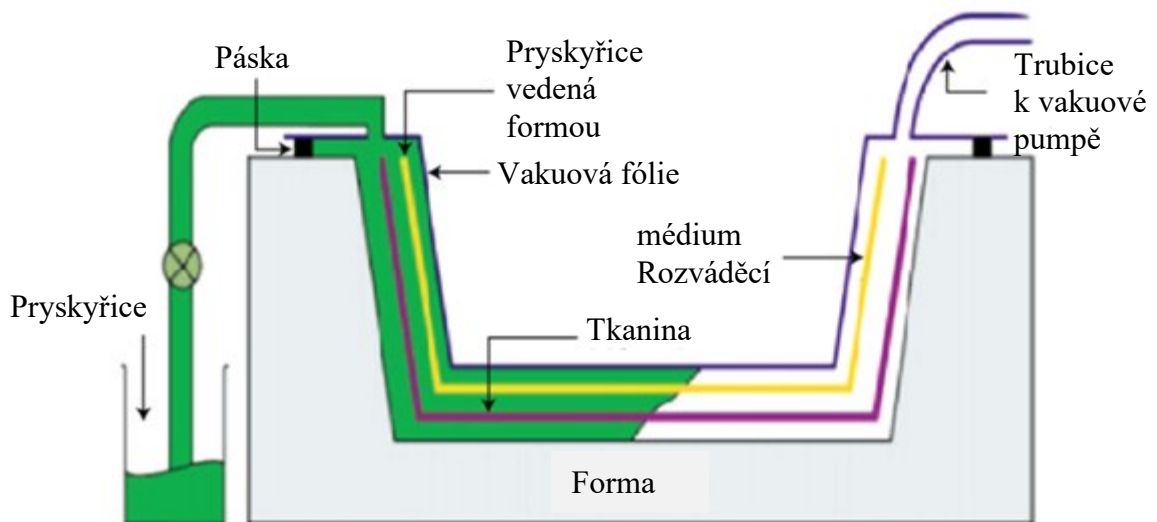
Obr. 19 Schéma vakuového lisování ve vacích [42]

Technologie je vhodná k výrobě širokého spektra komponentů, výjimkou nejsou díly rozsáhlých, komplexních rozměrů. Tímto způsobem mohou být vyráběny lodě, závodní auta a jiné. [39]

2.3.2 Vakuová infuze

Vakuová infuze (obr. 20) je technologie, která využívá vakua spolu s tlakem k prosycení dané tkaniny. Je variací vakuového lisování, kdy je pryskyřice dopravena do formy až po slisování tkaniny vakuem. Suchý materiál je vložen do formy spolu s dalšími komponenty (odtrhovací tkanina, rozvodová tkanina, fólie) a kompletně se utěsní oboustrannou lepicí páskou. Po docílení vakua je pryskyřice vedena do formy pomocí správně umístěného vtokové systému a rozvedena do celé plochy výrobku rozvodovou tkaninou. Za pomoci vakua a tlaku pryskyřice prosycuje tkaninu. Výhody této technologie jsou: [38], [45]

- Lepší poměr vlákno – pryskyřice
- Konzistentní využití pryskyřice
- Čas na přípravu není limitován
- Méně promarněné pryskyřice
- Nízká cena pomůcek
- Možnost výroby rozměrných součástí



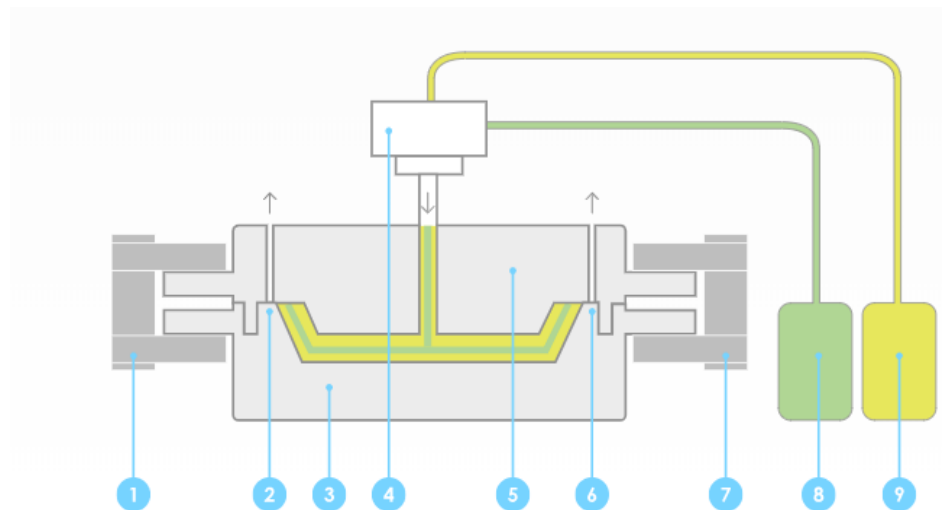
Obr. 20 Schéma vakuové infuze [46]

Výsledný výrobek má vysokou kvalitu a disponuje dobrými mechanickými vlastnostmi. Technologie je vhodná pro rozměrné výrobky, jako například karoserie aut, trupy lodí nebo pro součásti letadel. [38], [46]

2.3.3 Reakční vstřikování (RTM)

Reakční vstřikování (obr. 21) je pokročilou technologií, kterou je možné vyrobit součást se dvěma dokončenými povrchy. Výztuž se pokládá suchá do formy, díky čemuž je možné použít jakoukoli kombinaci a orientaci vláken, nevýjimaje trojrozměrné výztuže. Proces může být jednoduchý až vysoce automatizovaný. Široké spektrum forem je obvyklé při použití technologie RTM, od nízkonákladových až po temperované, vysoce kvalitní formy. [38]

Nejprve je forma potažena separačním prostředkem. Výztuž je kladena do formy, která je poté uzavřena. Pod tlakem je pryskyřice s vytvrzovacím činidlem přivedena do formy, kde je vytvrzena. Následně je forma otevřena, výrobek vyjmut a povrch je zodpovědně vyčištěn. Technologii lze uskutečnit při pokojové teplotě. [38], [44]



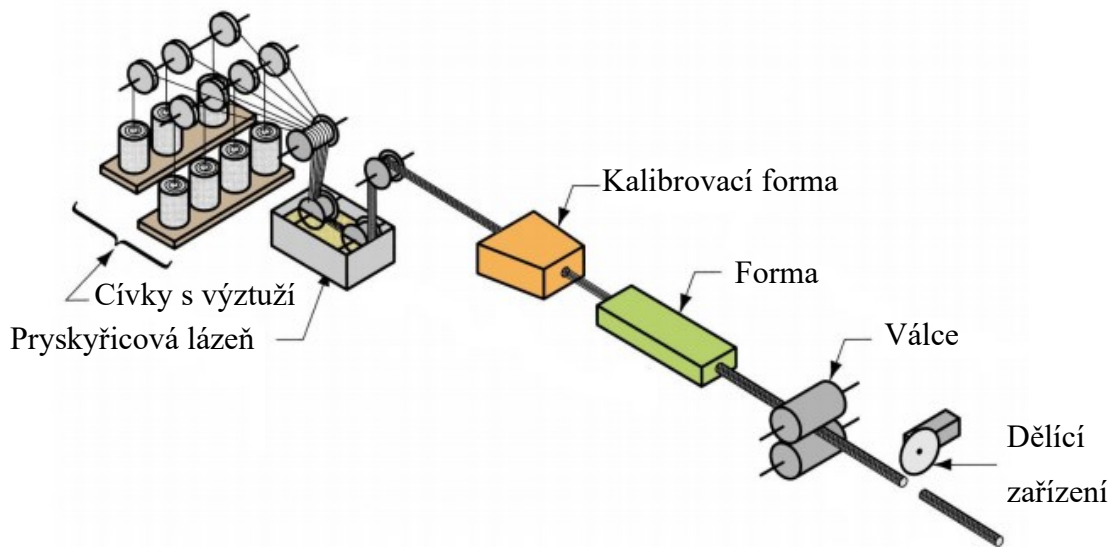
Obr. 21 Schéma reakčního vstřikování [47]

1 – úpinka, 2 – ústí ventilu, 3 – dolní část formy, 4 – vstřikovací hlava, 5 – horní část formy,
6 – ústí ventilu, 7 – úpinka, 8 – katalyzátor, 9 – pryskyřice.

Reakční vstřikování je používáno v rozlehlém množství průmyslu. V letectví se vyrábí listy větráků, křídla, palivové nádrže a hnací hřídele vrtulníků. Rovněž kostry karoserií automobilů, nárazníky a skříně spojek jsou vyráběny touto technologií. Ve strojírenství je technologie vhodná na kryty kompresorů, hnací hřídele, setrvačníky, převodové skříně a ochranné přilby. Sportovní, dopravní a lodní průmysly nejsou výjimkou. [44]

2.3.4 Pultruze

Pultruze (obr. 22) je nepřetržitý proces, při kterém se vyrábí součásti s konstantním průřezem (tyče, trubky, desky, kolejnice). Prameny výztuže jsou přiváděny z cívek do pryskyřicové lázně, kde jsou vlákna důkladně napuštěna pryskyřicí. Komposit se poté vytvrdí ve vyhřívané formě, která má tvar výsledného výrobku. Produkt se vytáhne válci do dělicího zařízení, kde se nařeže na požadovanou délku. [43]



Obr. 22 Schéma technologie pultruze [39]

Tvary a rozměry kompozitních profilů vyrobených pultruzní technologií jsou závislé na stroji a jeho příslušenství. Souvisí to s jeho mohutností, tj. velikostí tažné síly, a na možnostech jeho ovládání, tj. změně rychlosti tažení, regulace teploty. Na standardních strojích se dosáhne šířky od 500 do 1000 mm. Maximální tloušťka stěn závisí na možnostech prohřátí materiálu, pohybuje se kolem 50 mm. [41]

Mezi výhody této technologie patří:

- Proces je automatizovaný, velmi rychlý
- Lze vyrobit širokou škálu výrobků
- Rovnoměrně rozložená výztuž
- Výborné mechanické vlastnosti

Mezi nevýhody této technologie lze zařadit:

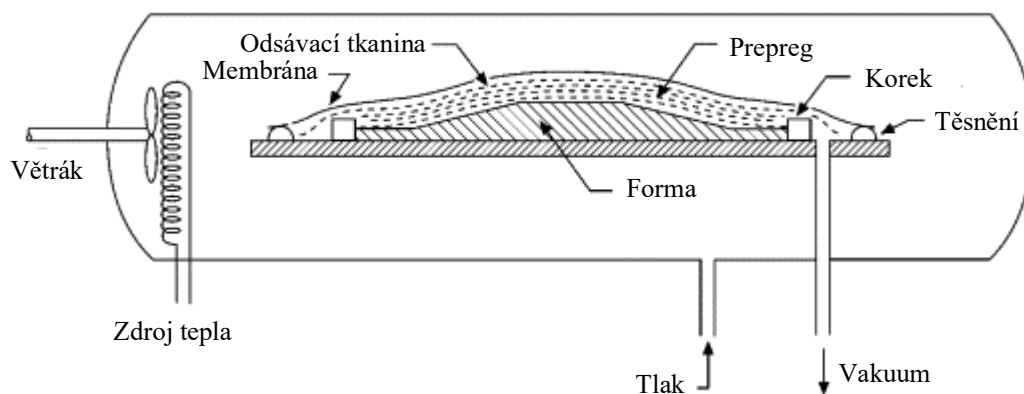
- Především se zpracovávají termosety
- Náklady na vyhřívání vytlačovací hlavy mohou být vysoké
- Povrchová úprava není hladká, v důsledku na povrch vystupujících vláken
- Vyšší cena technologie [40], [41]

2.3.5 Autokláv

Autokláv (obr. 23) je uzavřená nádoba, ve které procesy probíhají pod vysokým tlakem a vysokou teplotou. Technologie je velmi podobná vakuovému lisování. Výjimkou je vystavení produktu vyššímu tlaku, což vyústí v kvalitnější konečnou součást. Typicky se využívá v kosmickém průmyslu k výrobě vysoce kvalitních kompozitů z prepregů. Laminát, který je pokrytý z obou stran polyesterovou látkou, je umístěn do formy a vytvarován. Povrch prepregu je pokryt separační látkou a odtrhovací tkaninou pro lepší vlastnosti. Celá forma, laminát a ostatní komponenty jsou položeny do vakuového pytle, který je pak vložen do autoklávu (obr. 24). Za pomoci tepla a tlaku je zde prepreg vytvrzen. Vakuum je většinou aplikováno pouze na začátku vytvrzovacího cyklu, zatímco tlak je udržován během celého ohřevného i chladícího cyklu. Technologie je možno použít pro kompozity na bázi termoplastů i termosetů. Postup je možné aplikovat k výrobě leteckých součástí nebo ve vojenském a kosmickém průmyslu. [49], [50], [51]



Obr. 23 Autokláv [49]



Obr. 24 Schéma výroby součásti v autoklávu [51]

3 TVAROVATELNOST A DEFORMOVATELNOST TKANIN A PREPREGŮ

V dnešní době je vývoj zaměřen na pokročilé kompozity, které se využívají k výrobě výrobků se složitou geometrií o velkých výrobních sériích. Trh se nezaměřuje pouze na mechanické vlastnosti výrobku, ale také na zpracovatelnost, tvarovatelnost a celkovou cenu. Tvářecí technologie, které byly původně zavedeny pro tváření ocelí našly svoje uplatnění i při zpracování kompozitních materiálů. Umožňují tak modelovat kompozity do komplexnějších tvarů. Tvarovatelnost kompozitů neboli schopnost formovat je do určitých geometrií záleží na typu vláknové výztuže. Nestability, jako vrásnění nebo lokální trhliny jsou obvyklé, ale aby tváření dosáhlo určité efektivity, je nutné tyto defekty předpovídat a eliminovat. Materiál s lepší tvarovatelností vyžaduje menší tlakové síly a je méně náchylný k tvorbě defektů. [62]

3.1 Tvarovatelnost

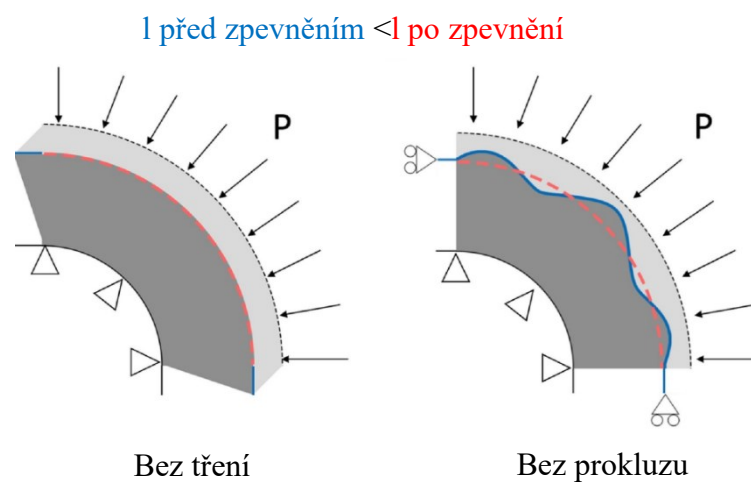
Současné způsoby výroby kompozitních materiálů s kontinuálními vlákny využívají několik procesů. Rostoucí využívání kompozitních materiálů přitahuje pozornost k myšlence nahradit tradiční (nákladné) experimentální metody založené na pokusech a omylech optimalizací parametrů zpracování pomocí numerických simulací a virtuální výroby. [62]

Procesy tekutého kompozitního tváření (LCM) a tváření prepregů jsou dvě z hlavních skupin výrobních procesů. V LCM procesech se obvykle termosetové pryskyřice vstříkují do textilního předlisku, který se potom vytvrzuje při vysoké teplotě. Prepregy jsou polotovary vyrobené z kontinuálních vyztužených vláken a termosetové nebo termoplastické matrice. V případě termosetového prepregu je matrice přítomna, ale není pevná, protože ještě není polymerizována, takže výztuž může být snadno deformována. Pro kontinuální tváření termoplastických předběžných vláken se matrice zahřívá nad teplotu tání, což umožňuje deformaci výztuže, která může být takto tvarována ve své konečné formě. Každý z výše uvedených procesů má svou specifickou; avšak tvarování předlisků pro LCM procesy a termoplastické tvarování prepregů za tepla mají společné rysy, které se získají deformací spojitých vyztužení vláken. Matrice chybí v předběžném kroku LCM procesů. Při termosetech s termoplastem a termoplastickým formováním hraje matrice důležitou roli, ale deformace prepregů je přesto řízena deformacemi kontinuální výztuže vláken. Tato

deformace je specifická. Mezi vlákny jsou možné pohyby, což umožňuje vysokou deformaci ve smyku, zatímco vlákna jsou obecně téměř neroztažitelná. [62]

3.1.1 Vrásnění

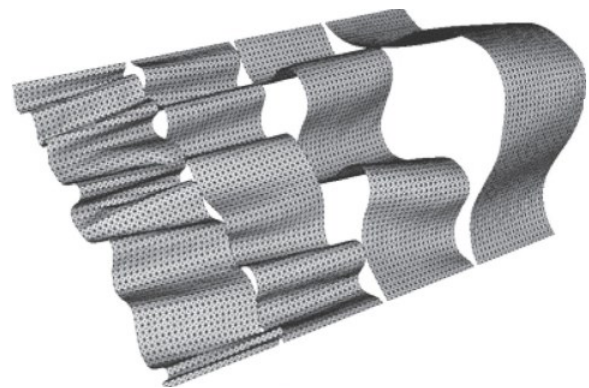
Během výroby kompozitu může zpevnění (tlustého) svazku vyztužených vláken impregnovaných viskózní pryskyřicí vést k vytvoření vrásek, po kterém následuje vytvoření nadměrné délky. Na obrázku číslo 25 je znázorněn materiál před a po zpevnění. Po zpevnění (za aplikovaného tlaku P) se tloušťka a délka dráhy na vrcholu části (I) zmenší. Pokud se vrstvy nemohou komprimovat ani sklouznout navzájem, jediným způsobem, jak přizpůsobit změnu délky, je deformace vrstev mimo rovinu. [63]



Obr. 25 Vznik vrásnění [63]

Při tváření kompozitů je zvrásnění hlavním problémem kvůli jejich tenkosti. Ohybová tuhost textilních výztuží je slabá z důvodu možného prokluzu mezi vlákny. V důsledku toho jsou vrásky pro tyto textilní materiály časté.

Snížení tloušťky prepregu (tj. vrstvy vláknité výztuže impregnované pryskyřicí) za aplikovaného tlaku je těsně spojeno s režimem proudění pryskyřice. Při nízké viskozitě pryskyřice je pozorován filtrační režim (také známý jako krvácení). Při krvácení protéká pryskyřice vláknitou sítí, jejíž konfigurace je téměř nedotčena. U systémů s vysokou viskozitou je však

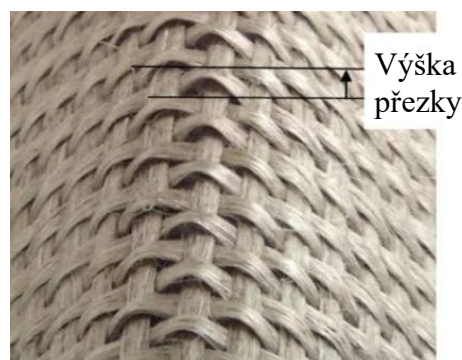


Obr. 26 Vrásnění při různých hodnotách ohybové tuhosti [62]

pozorováno stlačování vláken, což znamená, že vlákna jsou nesena pryskyřicí, která se příčně rozpíná při působení zatížení. Na zvrásnění mají vliv vlastnosti kompozitu, jako jsou například smyková rychlost a ohybová a smyková tuhost (obr.26). Tyto defekty mohou být lokalizovány v měřítku mikro, mezo (hladina vrstvy) a makro (úroveň součásti). [62], [63]

3.1.2 Přechodové zóny

Dalším typem defektu, který se může vyvinout, pokud geometrie předlisku je taková, že místa s rozdílným úhlem stříhu navzájem kolidují, jsou přechodové zóny. Tyto zóny jsou například zakřivení přízí, které jsou pozorovány na povrchu výrobku. Mohou vést k jevu, který se nazývá „přezka“ (obr. 27). Příčinou tohoto jevu je lokální ohybová tuhost. Přezky působí lokální pokles mechanických vlastností. [62]



Obr. 27 Příklad „přezky“ [62]

3.1.3 Prokluz mezi přízí

Během procesu formování výztuže může dojít k velkému prokluzu mezi přízí (obr. 28). Příčinou je většinou nízká teplota na okraji výrobku, což brání správné deformaci při tváření za tepla. Vnitřní skluz vede k zónám se zakroucenými vlákny, a ne požadované útkové přízi. Tento jev vede ke ztrátě kontinuity textilní výztuže. [62]



Obr. 28 Prokluz mezi přízí [62]

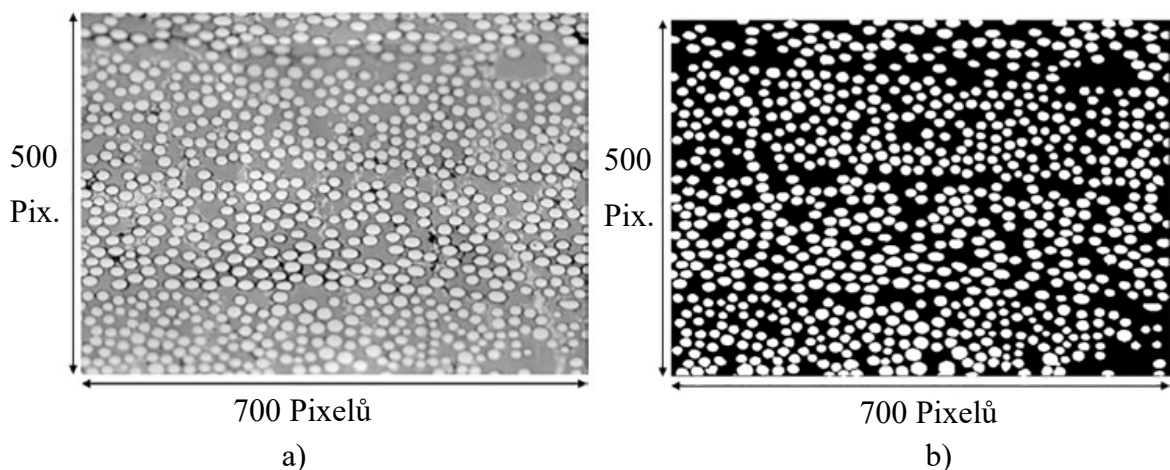
3.2 Digitální korelace obrazu

Digitální korelace obrazu (DIC) (obr. 30) umožňuje plně určit pole posunutí na povrchu načtené struktury. Cílem extrakce pole posunu touto metodou je identifikovat zákony chování nebo charakterizovat poškození nebo prasknutí materiálu. Tato bezkontaktní metoda měření je vhodná pro zkoušky přístrojů prováděné v agresivních prostředích, jako jsou korozivní prostředí pod rezervou optické přístupnosti na povrchu vzorku. Za účelem získání měření pole je technika založena na srovnání dvou obrazů odpovídajících rovnému povrchu zkušebního vzorku. První odpovídá referenčnímu stavu (bez mechanického

zatížení) a druhý odpovídá napjatému stavu (při mechanickém zatížení). Povrch vzorku musí zobrazovat náhodný vzor. Obvykle se získává stříkáním černých a bílých barev, které musí zůstat dostatečně tenké, aby jeho pole posunu co nejlépe odpovídalo povrchům zkušebního vzorku. [52], [60]

Dle obrázku č. 30 je nejprve nutné získat výchozí data pro sledování vláken. V prvním kroku se stanoví rozdíly objemových posunů vláken mezi snímky s využitím digitální korelace obrazu. Poté se provede segmentace (obr. 29) prvního snímku pro identifikaci jednotlivých průřezů vláken, které mají být sledovány ve druhé části navrhované metody. Třetí krok zahrnuje přiřazení detekovaných průřezů vláken bodovému DIC měření. [60]

DIC je optická technika, která využívá koncepcí registrace obrazu sledováním lokální intenzity šedé barvy v obrazech. Typický Algoritmus DIC diskriminuje první (referenční) obraz v obrazové řadě do mřížky malých čtvercových oblastí zvaných fazety. Každý aspekt v referenční snímku se poté shoduje s odpovídajícím umístěním v systému snímku následujícího a určí vektor posunu. Pro algoritmus DIC a efektivní fungování by se každý snímek měl lišit z hlediska distribuce intenzity šedé úrovně, a tedy i obrázek musí mít náhodný vzor s vysokým kontrastem. Při použití DIC pro měření deformace celého pole z povrchu součásti, je na komponentu obvykle nanášena černá nebo bílá barva za účelem vytvoření náhodného vzoru skvrn (obr. 29). [60]

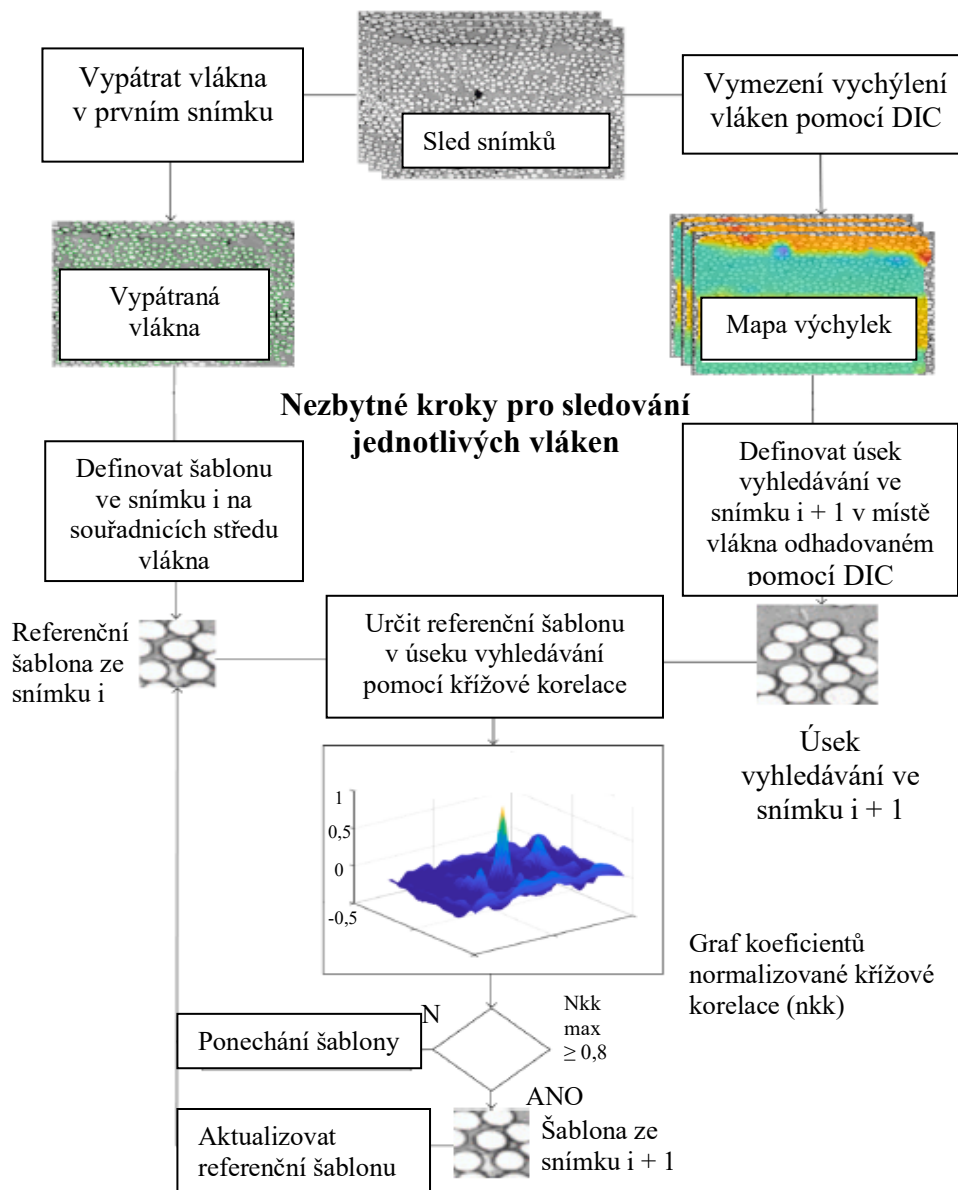


Obr. 29 Vzor segmentace vzorků – a) Před segmentací, b) Po segmentaci [60]

Ke sledování každého jednoho detekovaného průřezu vlákna byla definována šablona ve tvaru čtverce v prvním obrázku, označovaném jako „referenční šablona“. Její střed leží v souřadném středu průřezu vlákna. Umístění této šablony je promítnuto v dalším obrázku pomocí posunu DIC fazety ležící nejbližší ke středu referenční šablony v prvním obrázku.

Předpokládaná referenční šablona je nalezena pomocí funkce v programu Matlab. Tato funkce počítá koeficient normalizované křížové korelace (nkk) mezi referenční šablonou a základní oblastí okna v každém jednom pixelu. Výstupem je mapa nkk koeficientů od -1 do 1. Tyto nkk koeficienty -1 a 1 odpovídají perfektní antikorelaci a korelaci. Umístění identifikované šablony bylo považováno za umístění maximální hodnoty na mapě nkk koeficientů. Nakonec byla identifikovaná šablona segmentována pomocí výše popsané strategie segmentace a středová souřadnice byla uvažována jako střed průřezu vlákna. [60]

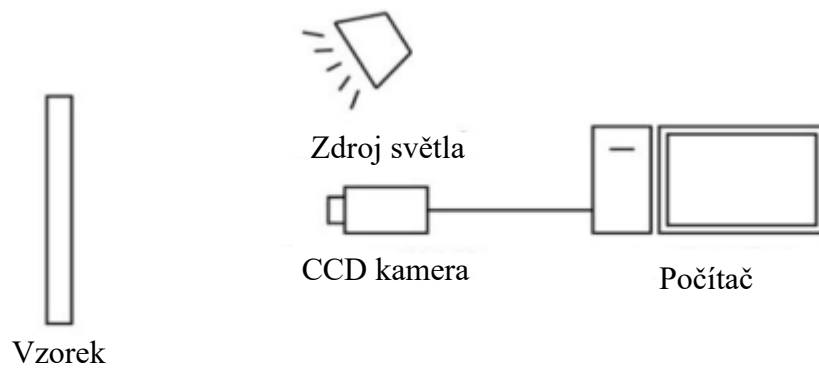
Nezbytné kroky pro sledování vláken



Obr. 30 Postup DIC technologie [60]

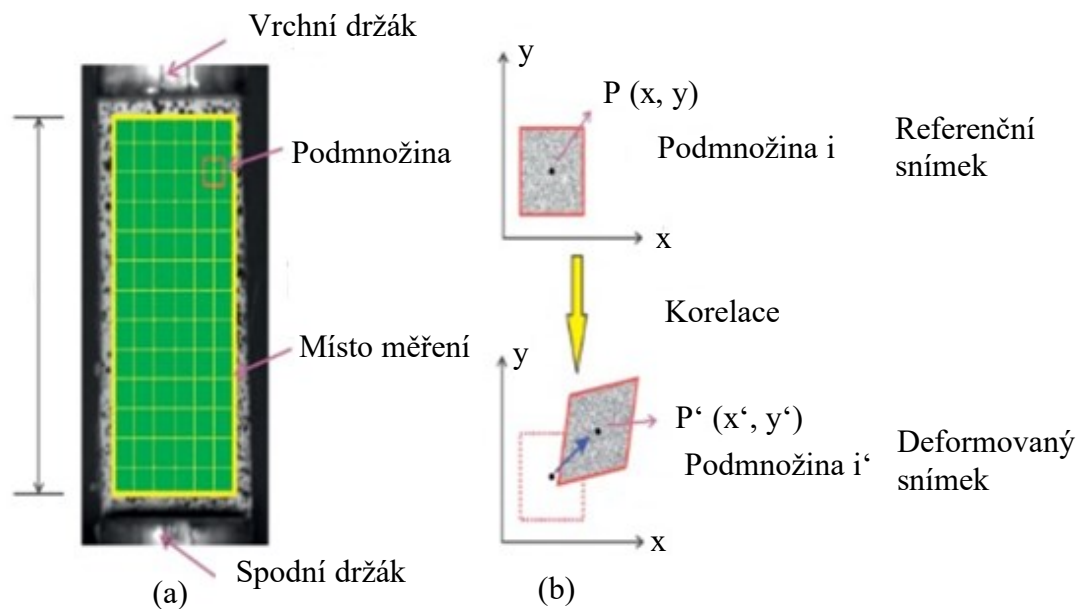
3.2.1 2D Digitální korelace obrazu

Při dvourozměrné korelaci digitálního obrazu jsou posuny přímo detekovány digitálními snímky povrchu objektu (vzorku). Typický příklad experimentálního uspořádání pro dvourozměrnou korelaci digitálního obrazu je na obrázku číslo 32. Povrch roviny objektu je obvykle pozorován CCD (charge – coupled device) kamerou se zobrazovací čočkou. Poté jsou



Obr. 32 Rozestavení zařízení pro měření pomocí digitální korelace obrazu [53]

obrázky povrchu objektu, jeden před a druhý po deformaci, zaznamenaný, digitalizovaný a uloženy v počítači jako digitální obrázky. [53]



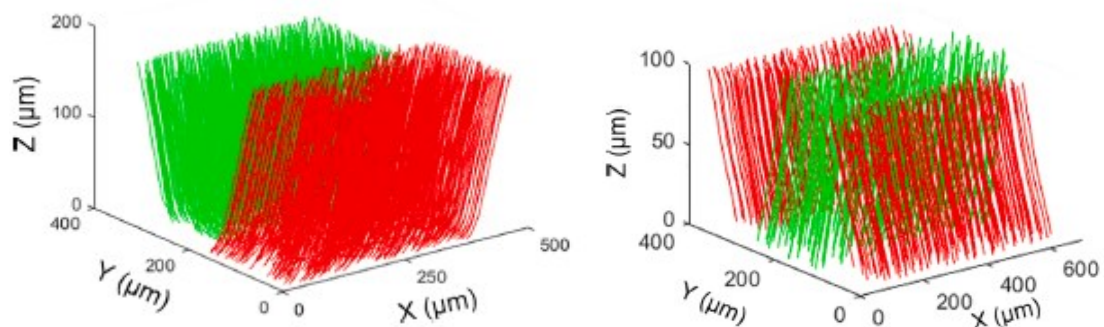
Obr. 31 DIC – a) Měřené místo (s podmnožinou), (b) Schéma podmnožiny referenčního snímku a deformovaného snímku [52]

Tyto obrázky se porovnávají pomocí souřadnic jednoho bodu na referenčním i finálním snímku. Protože téměř není možné bod najít, pracuje se s úsekem velkým například 20 x 20 pixelů (tzv. podskupinou) (obr. 31), která má v určitém místě jedinečný odstín šedé. Je předpokládáno, že se tento odstín během deformace nemění. Jestliže je tato podskupina nalezena na finálním snímku, lze posun vyhodnotit. [53]

3.2.2 3D Digitální korelace obrazu

3D digitální korelace obrazu je stereoskopické měření na zakřivené ploše objektu. Lze získat posunutí a poměrnou deformaci na objektech jakéhokoli tvaru a pohybu.

Pokud se měří rovinná deformace textilie, přechodem z 2D na 3D měření se nezlepší jeho kvalita – naopak, stává se horším. Podle definice se jedná o rovinnou deformaci textilie, která je charakterizována deformacemi středního povrchu tkaniny. 3D měření udává napětí v tangenciální rovině a určí lokální bod na povrchu tkaniny, kterým je definován mikro-reliéf tkaniny, lišící se velkou mírou od středního povrchu. Napětí změřené pomocí 3D DIC nemůže být použito k charakterizaci rovinné deformace textilie. [61]



Obr. 33 Příklady výstupního grafu 3D digitální korelace obrazu – směr vláken [61]

4 DOSTUPNÉ SIMULAČNÍ MOŽNOSTI PRO PREDIKCI TVAROVATELNOSTI A DEFORMOVATELNOSTI VÝZTUŽÍ

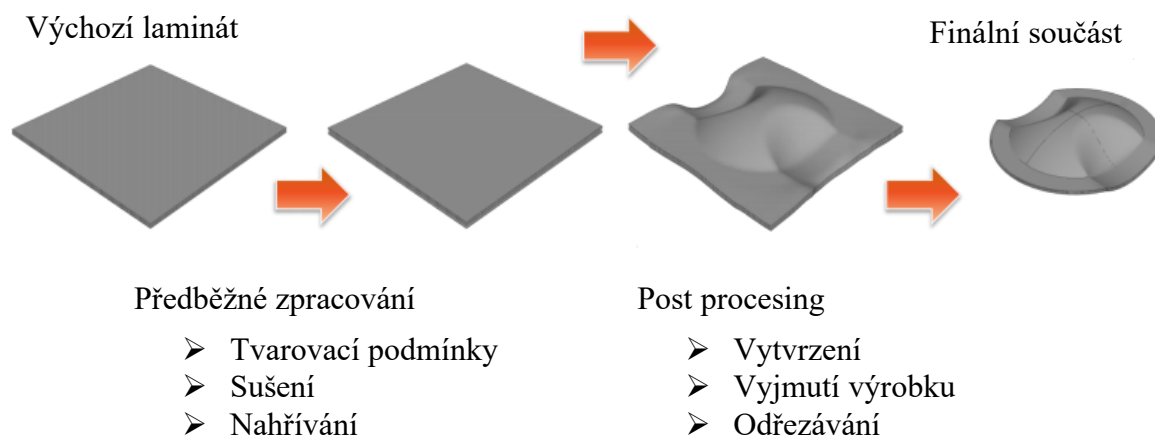
V dnešní době je velká poptávka výrobních společností po simulačních programech, které podporují výrobu součástí z různých materiálů. Simulační program umožňuje digitálně zobrazit stav materiálů nebo výrobku, který je pod vlivem daných fyzikálních nebo chemických faktorů. Simulováním určitého stavu výrobku lze snížit náklady na experimentální zkoušení daného produktu, urychlit tak výrobu a celkově zkvalitnit a optimalizovat celý proces výroby.

V následující kapitole budou popsány softwary používané na simulaci tvarovatelnosti, deformovatelnosti a mechanických vlastností kompozitních součástí. Mezi vybrané programy patří Aniform, Autodeks Helius, PAM-Composites a Digimat.

4.1 Aniform PrePost

AniForm vyvíjí technologii pro předpovídání tvarovatelnosti kompozitních laminátů. AniForm Suite je snadno použitelný a přesný simulační nástroj, umožňující prvotřídní implementaci procesů. Software se skládá z grafického uživatelského rozhraní pro definování procesu a implicitního řešitele konečných prvků pro provádění výpočtů. [54]

Aniform je software, jehož podstata je založena na metodě konečných prvků. Je používán k simulacím procesů, jako je stříhání, ohýbání a tváření kompozitu za tepla (obr. 34). Inženýři provádějí snadné a přesné analýzy tvarování kompozitu díky klíčovým funkcím AniForm Suite. Optimalizace součástí může být prozkoumána studiem procesů, které mají

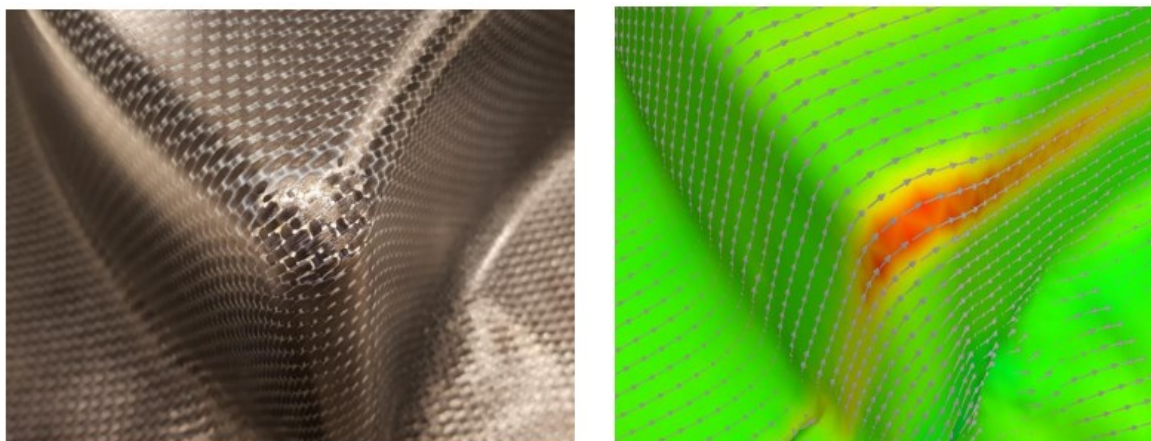


Obr. 34 Proces tváření laminátu [54]

rigidní, segmentované nebo flexibilní nástroje, jako jsou membrány. Tvarovatelnost různých jednosměrných nebo textilií vyztužených laminátových konfigurací může být zkoumána pomocí funkce PrePost, která umožňuje rychlé úpravy, jako je tvar polotovaru a zohlednění řezů a šipek. Jakýkoli systém pro manipulaci s laminátem, jako jsou systémy provozované s napínáky a různými typy chapadel, lze v tomto programu namodelovat. [54], [55]

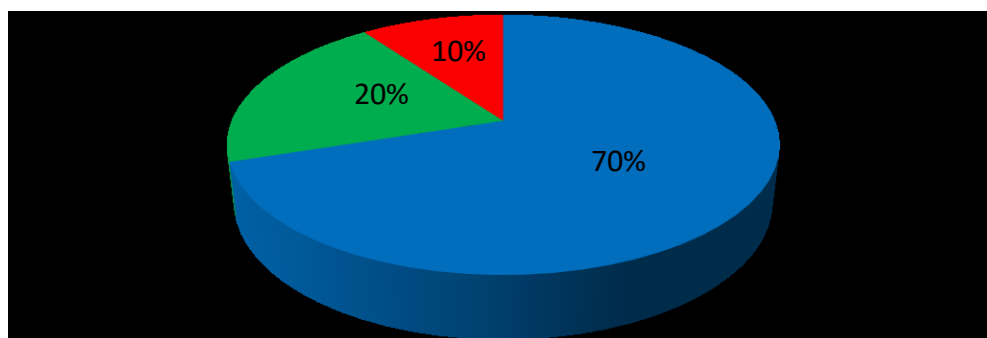
Pomocí programu Aniform lze zpracovávat simulace různých tvarů laminátu, ať už se jedná o lamináty s otvory, šípkami nebo na míru vyrobené textilie. Z uchycovacích prvků je možné použít tenzometry, svěráky, přidržovače nebo nosiče fólií. V programu lze zpracovávat materiály jako jsou tkané textilie, termoplastické nebo termosetové matrice nebo nezvlněnou látku. Vlákna mohou mít jakékoliv natočení. [54], [55]

Značnou předností Aniformu je predikce chování daného laminátu. Pomocí simulace můžeme předejít defektům, jako je zvlnění nebo lokální přetržení vlákna (obr. 36). Přidáním přidržovače nebo např. tenzometru lze celkově optimalizovat celý proces. [54], [55]



Obr. 36 Příklad defektu [55]

Podíl zastoupení programu Aniform v průmyslových odvětvích



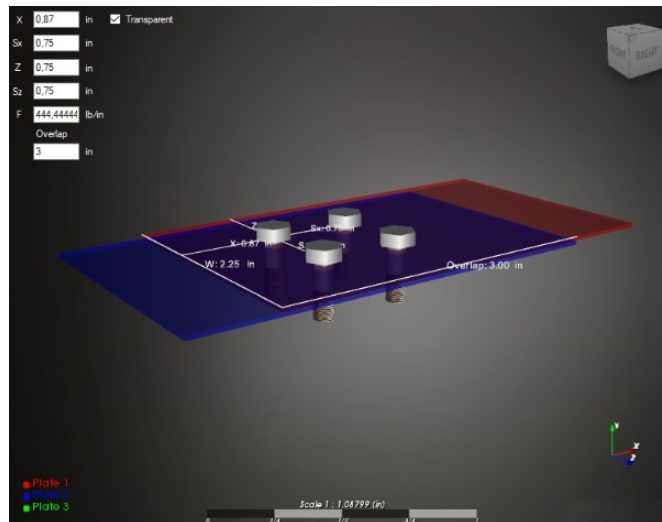
■ Kosmický průmysl ■ Automobilový průmysl ■ Spotřebitelský průmysl

Obr. 35 Graf zastoupení Programu Aniform v průmyslu [55]

Aniform nachází využití v mnoha odvětvích, největší zastoupení zaujímá v kosmickém, automobilním a spotřebitelském průmyslu. [55]

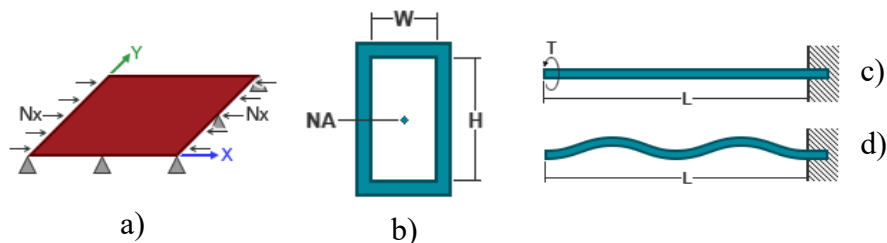
4.2 Autodesk Helius

Pomocí rozsáhlé databáze kompozitních materiálů simuluje Helius Composite materiálové chování kompozitních součástí bez potřeby softwaru pro analýzu konečných prvků. [66]



Obr. 37 Ukázka šroubového spojení

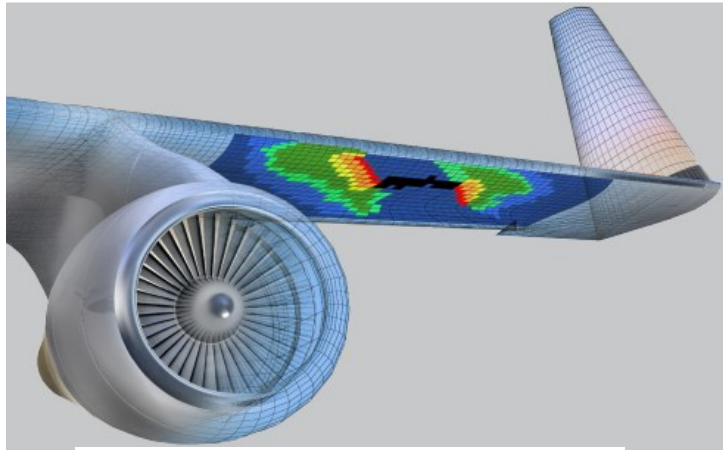
Zadáním vlastností kompozitu (typ matrice a výztuže, počet vrstev, natočení vláken) je možné nasimulovat mechanické vlastnosti materiálů. Laminát je vybrán buď z integrované knihovny programu nebo je plně nadefinován uživatelem. Zadáním geometrie a typu zatížení lze vypočítat tlak nebo tah vůči trubkám, plátům, tyčím nebo sendvičových struktur. Výpočet ohybu prutu, krutu nebo vibrací pomocí tohoto softwaru není překážkou. Dalšími vlastnostmi Programu Helius je výpočet šroubových spojení nebo kalkulace času pro selhání první vrstvy laminátu.



Obr. 38 Modely pro výpočet – a) Stability sendvičové struktury, b) Trubky, c) Krutu, d) Vibrací

4.2.1 Autodek Helius PFA

Autodek Helius PFA je doplňkem pro komerční analýzu konečných prvků. Program je určený ke zvýšení přesnosti, účinnosti a konvergence v kompozitním materiálu pomocí simulace.



Obr. 39 Simulace poškození [67]

Simulací lze zjistit selhání kompozitu již v procesu navrhování před experimentálním ověřováním, což pomáhá zkrátit dobu testování, snížit náklady a pomáhá vyrábět produkty s vysokou jakostí. [67]

Vyvinut speciálně pro kompozitní materiály, Helius PFA nahrazuje tradiční generalizovanou analýzu pokročilými technologiemi pro strukturální analýzy a simulace. Poskytuje mnoho vlastností, včetně účinného multiscale přístupu k analýze materiálové nelinearity, progresivního selhání a složené delaminace jako metody ke snížení citlivosti oka. Helius PFA řeší řadu složených typů analýz, jako je únava, nelineární statika a explicitní simulační scénáře. Podporuje více druhů materiálů včetně sekaných a souvislých jednosměrných, prostých, čtyř, pěti a osmi svazkových vazeb. [67]

Modul Helius PFA nachází zastoupení ve vojenském, leteckém, automobilovém a sportovním průmyslu. [67]

4.3 PAM-COMPOSITES

PAM-COMPOSITES je software pro výrobu kompozitů, který umožňuje definovat a optimalizovat parametry procesu, které minimalizují výrobní vady a zvyšují kvalitu konečného produktu. Obsahuje následující aplikační moduly:

- Tváření za tepla – Analyzuje tváření za tepla suchých textilií a materiálů předběžných úprav (termoset s organickými listy nebo vlákny)
- Tváření tekutých kompozitů – Analyzuje procesy formování tekutých kompozitů (LCM), jako je formování přenosu pryskyřice (RTM)
- Výpočet zbytkových napětí a geometrických deformací – Predikce výrobních indukovaných zbytkových napětí a deformace tvaru kompozitních dílů
- Vytvrzování: Analýzu vytvrzování kompozitních dílů z termosetu [56], [57]

4.3.1 PAM-FORM

PAM-FORM, simulační modul pro vytváření kompozitů v rámci PAM-KOMPOZITŮ, se používá k simulaci procesu předběžného tváření suchých textilií nebo procesu tepelného tváření kompozitních materiálů, vyztužených vlákny vyrobených z termosetových nebo termoplastických pryskyřic (organické listy). Tento software pomáhá odhalit vady na počátku vývojového cyklu, kde je snazší upravit výrobní proces. PAM-FORM umožňuje:

- Analyzovat a optimalizovat jednotlivé výrobní operace
- Propojovat tyto operace přenosem historie materiálu z jedné operace na další (změna orientace vláken, stupeň vytvrzování, distribuce teploty)
- Opravovat, optimalizovat nebo ověřovat procesy, jako je rouhání, tvarování za tepla, RTM, infuze nebo vytvrzování, aby se minimalizovaly výrobní vady, zajistila reprodukovatelnost a snížily se náklady na vývoj [56], [57]

Program lze využít pro širokou škálu kompozitních materiálů se zaměřením na kontinuální vlákna. Může modelovat uhlíková nebo skleněná vlákna, termosetové nebo termoplastické matrice, suché textilie nebo prepregy. PAM-FORM umožňuje modelovat širokou škálu procesů včetně:

- Lisování pomocí dvou tuhých forem
- Formování gumové podložky
- Tepelné zpracování kompozitů
- Simulace formování prepregů
- Formování membrány a jiné

Za pomoci tohoto modulu lze predikovat jevy, jako je orientace vláken, plošná tloušťka, tah, tlak a zvrásnění. Výsledky jsou navíc k dispozici na úrovni laminátu i na vrstvě, což umožňuje předvídat např. vnitřní vrásky. S PAM-FORM jsou odstraněny výrobní vady a kvalita produktu je zlepšena předem v procesu jeho vývoje. Nachází uplatnění v leteckém, automobilovém, vojenském a energetickém průmyslu. [56], [57]



Obr. 40 Příklad simulace v programu PAM-COMPOSITE

4.4 Digimat

Digimat se používá k provádění podrobných analýz materiálů na mikroskopické úrovni a k odvození modelů mikromechanických materiálů vhodných pro víceúrovňové propojení mikroskopické a makroskopické úrovně. Materiálové modely Digimat poskytují prostředky pro kombinaci simulace zpracování se strukturální metodou konečných prvků – přechod k prediktivnější simulaci s přihlédnutím k vlivu podmínek zpracování na výkon vyrobené součásti. [58], [59]

Jako účinný a prediktivní nástroj pomáhá program Digimat uživateli navrhovat a vyrábět inovativní kompozitní materiály a díly s velkou úsporou času a nákladů. Dnes je Digimat považován za referenční na trhu díky svým jedinečným schopnostem pro analýzu vysoce kvalitních materiálů. [58], [59]

4.4.1 Digimat MF

Cílem Digimat-MF je realisticky předpovídat nelineární konstitutivní chování vícefázových materiálů, které mají závislost na teplotě a rychlosti deformace. Složená morfologie jako je obsah výplně, délka, aspekt poměru a orientace mají plný dopad na výsledné chování kompozitu. Tato technologie je zvláště vhodná pro popis kompozitů vyztužených vlákny:

- Plasty vyztužené krátkými vlákny
- Termoplasty s dlouhými vlákny
- Jednosměrné kompozity

- Tkané kompozity

Realisticky lze předpovědět tyto vlastnosti:

- Tuhost
- Porucha výrobku
- Creep
- Únava
- Vodivost (tepelná a elektrická) [58], [59]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je studium tvarovatelnosti a deformovatelnosti tkanin a prepregů. První část se bude zabývat tvarovatelností a deformovatelností 4 typů termoplastických prepregů od firmy Toray, u kterých byl proces tváření nasimulován pomocí programu AniForm Virtual Forming. Po simulaci budou vyhodnocena kritická místa vzniku trhlin, vrásnění a jiných defektů a porovnání těchto simulací.

Druhá část praktické části se zabývala metodou digitální korelace obrazu multiaxiální skleněné tkaniny a poté vyhodnocením získaných dat. Z naměřených dat byly zkonstruovány grafy závislosti zatížení na poměrném prodloužení/zkrácení a změně úhlu natočení vláken.

Cíle diplomové práce jsou:

1. Návrh typického tvaru kompozitní součásti pro technologii tváření/lisování pro automobilový průmysl
2. Volba materiálu pro proces tváření, simulace tváření pro termoplastické skelné prepregy EC6 (8H satén a 4H satén), simulace tváření pro termoplastické uhlíkové prepregy FT300B (5H satén a plátňová vazba)
3. Simulace změny tloušťky zvolených materiálů v programu AniForm Virtual Forming
4. Simulace změny tloušťky zvolených materiálů v programu AniForm Virtual Forming
5. Simulace zatížení vláken zvolených materiálů v programu AniForm Virtual Forming
6. Simulace hloubky průniku zvolených materiálů v programu AniForm Virtual Forming
7. Simulace celkového přemístění materiálu zvolených materiálů v programu AniForm Virtual Forming
8. Simulace změny směru vláken v ose y zvolených materiálů v programu AniForm Virtual Forming
9. Experimentální měření pomocí digitální korelace obrazu na vybraném typu materiálu
10. Sledování prodloužení/zkrácení a natočení vláken pod vlivem tahového namáhání
11. Vyhodnocení naměřených dat, diskuze dosažených výsledků a závěr

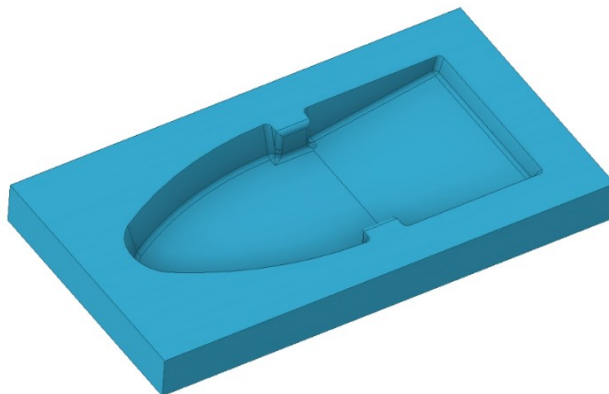
6 SIMULACE TVÁŘENÍ

Aby bylo možné uskutečnit simulaci procesu tváření, bylo nutné splnit určité kroky, jako je volba materiálu a jeho vlastností, geometrie konečného výrobku a volba vhodného podpůrného softwaru.

Pro simulaci tváření byl vybrán program Aniform Prepost, který byl poskytnutý jako bezplatná verze společností Aniform Virtual Forming. Pomocí tohoto softwaru byl nasimulován proces tváření daného výrobku, který bude popsán v kapitole 6.3.

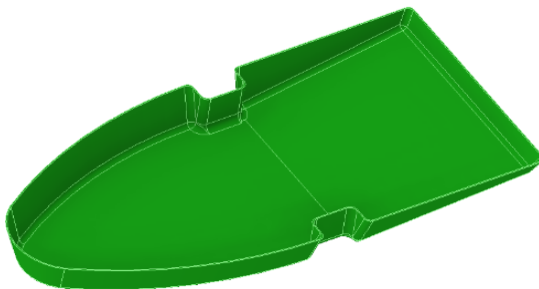
6.1 Návrh výrobku pro simulaci procesu tváření

Kompozity nacházejí uplatnění především v automobilovém, leteckém, sportovním a kosmickém průmyslu. Jako finální výrobek byl zvolen kryt chladicího systému běžně používaného automobilu (obr. 42). Geometrie krytu byla následně modifikována a celý



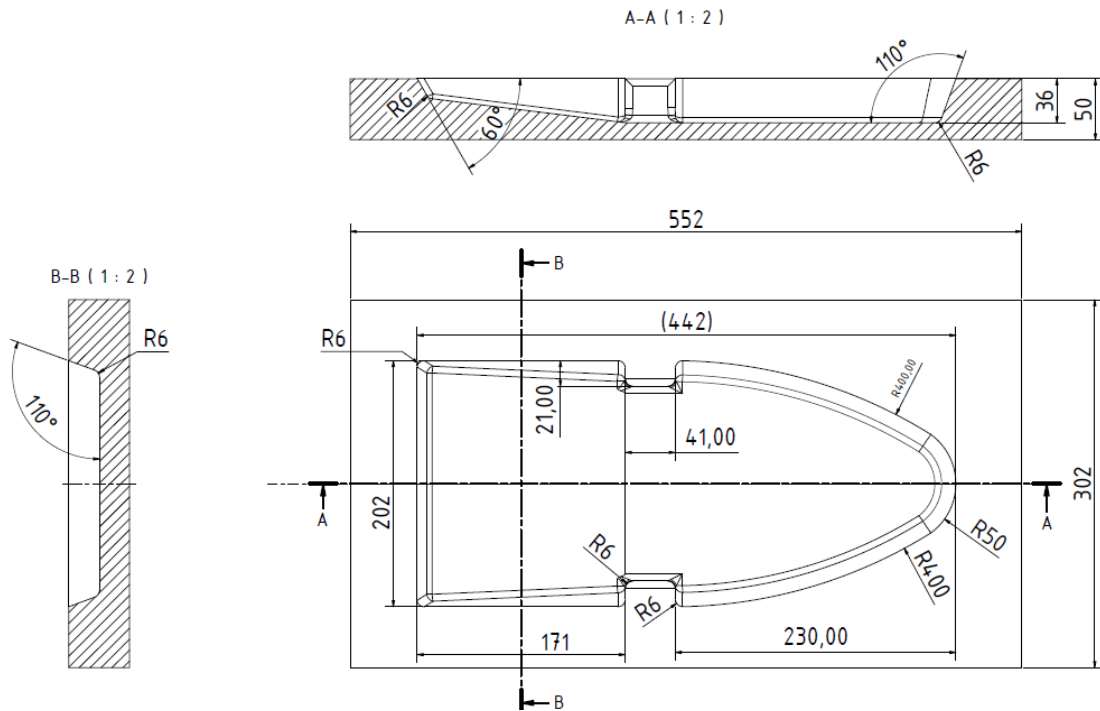
Obr. 41 Model formy

výrobek byl vymodelován v programu Autodesk Inventor. Stejně tak forma (obr. 41), do které bude tvářen polotovár. Forma má základní rozměry 552x302x50 mm s dutinou o základních rozměrech 442x202x36. Nejmenší zaoblení bylo stanoveno na R5, zároveň



Obr. 42 Reálná součást a její modifikovaný model

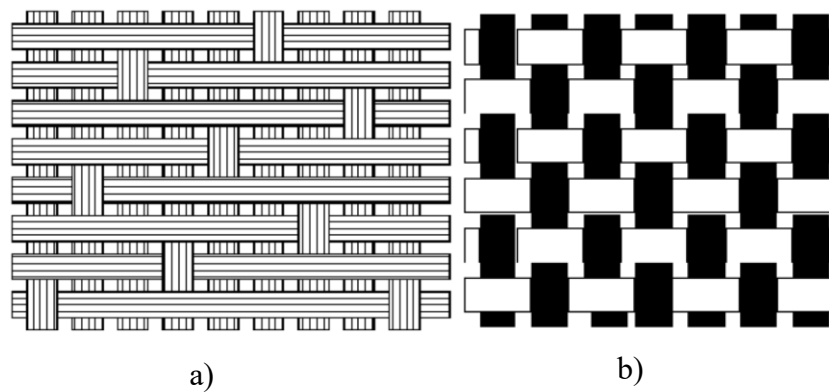
budou tyto oblasti rizikové z důvodu největšího výskytu trhlin nebo zvrásnění. Podrobnější geometrie výrobku je zobrazena na obrázku číslo 43 a v příloze P II. Další zmenšení těchto zaoblení by mohlo vést k nestabilitě celého výrobku. Šířka stěn bude závislá na tloušťce a počtu vrstev tkaniny, které budou použity.



Obr. 43 Základní rozměry formy krytu chladicího systému

6.2 Zvolený materiál

Pro simulaci byly použity čtyři typy termoplastických kompozitů, které mají matici polyetherimidové (PEI) pryskyřice. Jedná se o dva typy uhlíkových prepregů, které mají 5H



Obr. 44 Příklady vazeb tkanin – a) 8H (harness) saténová vazba, b) Plátňová vazba [64], [65]

saténovou a plátňovou vazbu (obr. 44 – b) a o dva typy skelných prepregů s 8h a 4h saténovou vazbou (obr. 44 – a). Materiál byl poskytnut od firmy Toray Advanced Composites. V tabulkách číslo 4 – 7 jsou shrnuty vybrané vlastnosti.

Tabulka 4 – Vybrané vlastnosti EC6 skleněného tkaného prepregu (8H satén)

Vlastnosti	Plošná hmotnost vlákn	Hmotnost na vrstvu	Podíl pryskyřice na váhu	Konsolidovaná tloušťka vrstvy	Hustota	Youngův modul
Jednotky	300 g/m ²	450 g/m ²	33 %	0,24 mm	1,91 g/m ³	27,9 GPa

Tabulka 5 – Vybrané vlastnosti FT300B uhlíkového tkaného prepregu (5H satén)

Vlastnosti	Plošná hmotnost vlákn	Hmotnost na vrstvu	Podíl pryskyřice na váhu	Konsolidovaná tloušťka vrstvy	Hustota	Youngův modul
Jednotky	280 g/m ²	484 g/m ²	42 %	0,32 mm	1,51 g/m ³	57,1 GPa

Tabulka 6 - Vybrané vlastnosti FT300B uhlíkového tkaného prepregu (plátňová vazba)

Vlastnosti	Plošná hmotnost vlákn	Hmotnost na vrstvu	Podíl pryskyřice na váhu	Konsolidovaná tloušťka vrstvy	Hustota	Youngův modul
Jednotky	200 g/m ²	346 g/m ²	42 %	0,23 mm	1,51 g/m ³	55,1 GPa

Tabulka 7 - Vybrané vlastnosti EC6 skleněného tkaného prepregu (4H satén)

Vlastnosti	Plošná hmotnost vlákn	Hmotnost na vrstvu	Podíl pryskyřice na váhu	Konsolidovaná tloušťka vrstvy	Hustota	Youngův modul
Jednotky	220 g/m ²	330 g/m ²	33 %	0,17 mm	1,91 g/m ³	28,3 GPa

Matrice je zvolena z polyetherimidové (PEI) pryskyřice, která je využívána pro svoji houževnatost. Vlastnosti této matrice jsou vyobrazeny v tabulce číslo 8.

Tabulka 8 – Vlastnosti polyetherimidové (PEI) matrice

Vlastnosti	Hustota	Teplota skelného přechodu	Teplota tání	Teplota zpracování
Jednotky	1,27 g/m ³	217 °C	Amorfní	320–350 °C

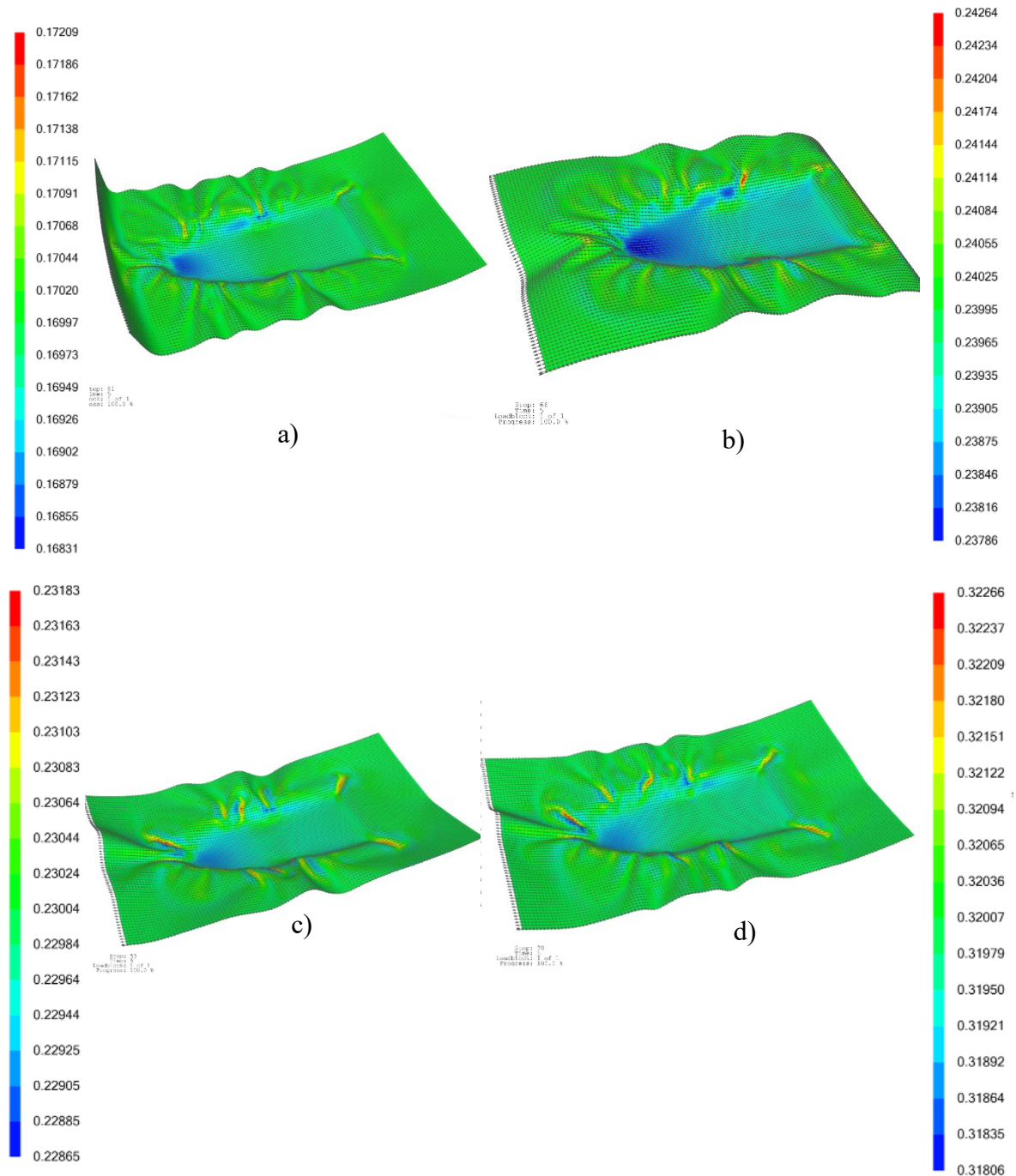
6.3 Porovnání simulací

V programu Aniform byly vyhotoveny simulace tváření výše uvedených materiálů. Každý z nich byl nejprve testován s jednou vrstvou, následně se dvěma a poté se čtyřmi vrstvami. Úhel natočení vláken byl u jedné vrstvy 0°, u dvou vrstev 0° a 90° a u 4 vrstev 0°, 45°, -45° a 0°. Veličiny, které byly posuzovány jsou tloušťka, zatížení vláken, hloubka průniku, přemístění vláken, smyková rychlost a směr vláken v ose y. Po zadání tlaku lisu 150 kg/cm² a parametrů materiálu byla spuštěna simulace technologie tváření kompozitů.

6.3.1 Simulace změny tloušťky

Na obrázku číslo 45 je simulace změny tloušťky výrobku při tváření 1 vrstvy všech čtyř zmíněných materiálů. Konsolidované tloušťky vrstev jsou udány v tabulkách číslo 4 – 7.

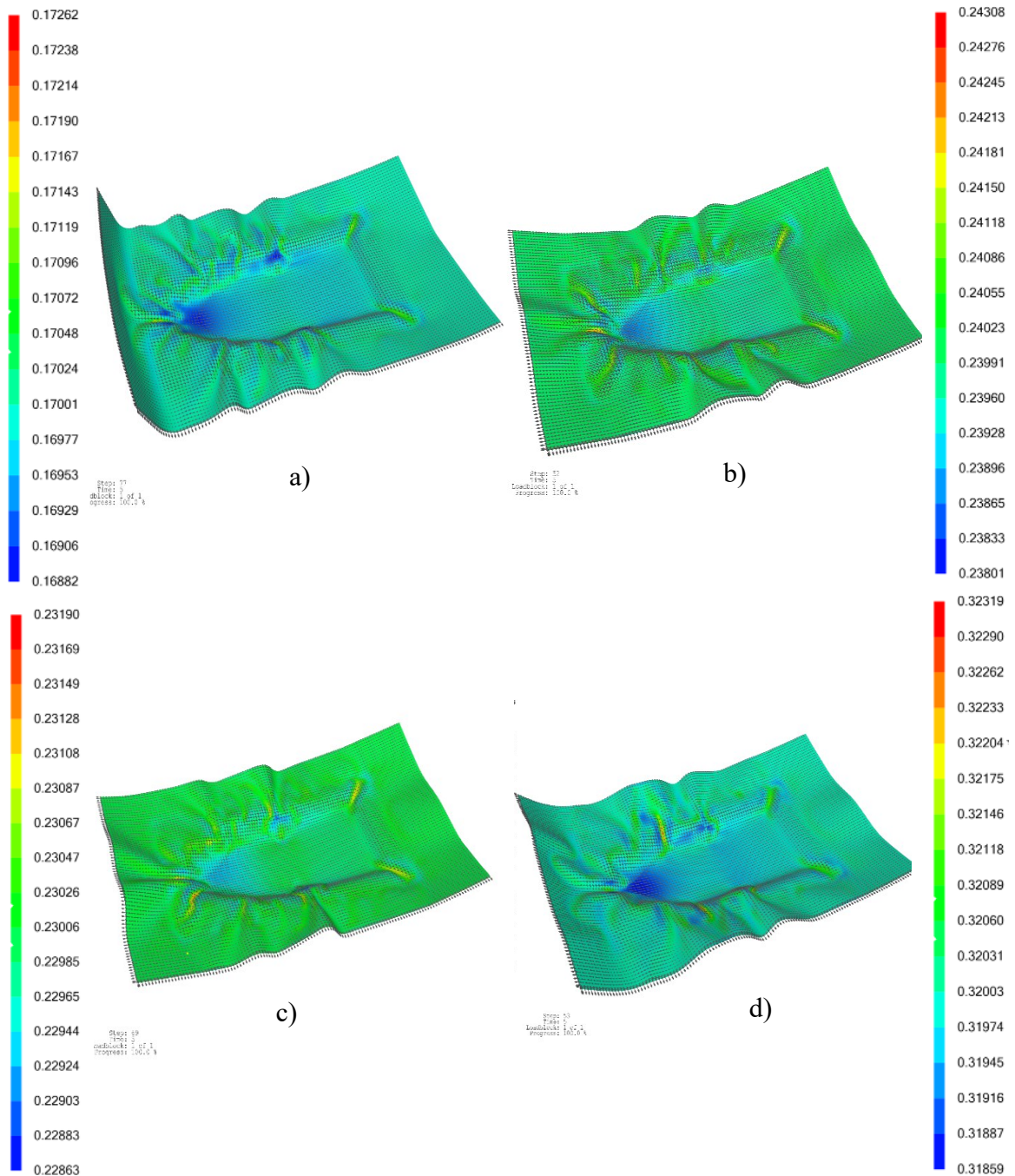
Tloušťka [mm]



Obr. 45 Simulace změny tloušťky jedné vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 46 je simulace změny tloušťky výrobku při tváření 2 vrstev všech čtyř zmíněných materiálů. Konsolidované tloušťky vrstev jsou udány v tabulkách číslo 4 – 7.

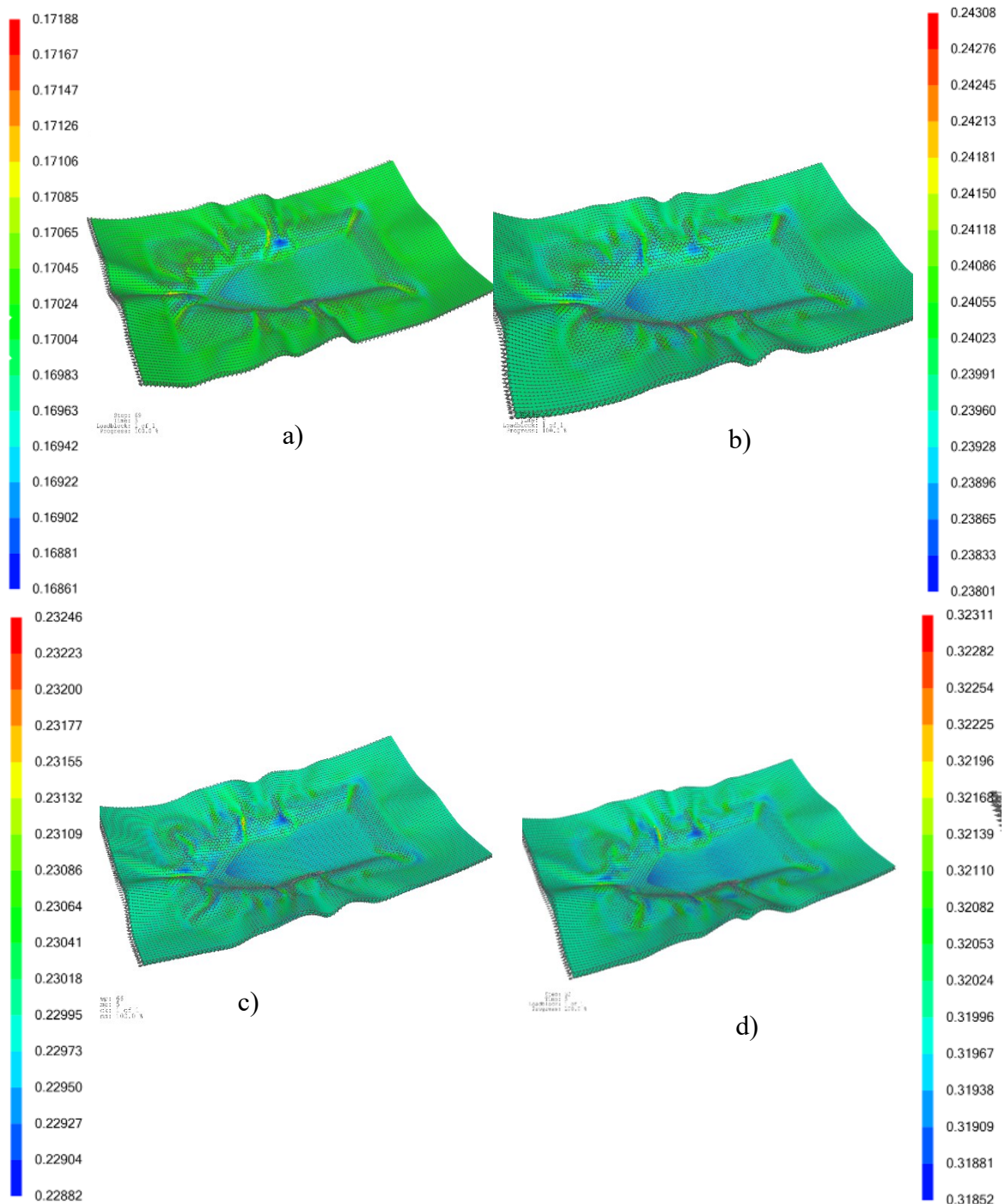
Tloušťka [mm]



Obr. 46 Simulace změny tloušťky dvou vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 47 je simulace změny tloušťky výrobku při tváření 4 vrstev všech čtyř zmíněných materiálů. Konsolidované tloušťky vrstev jsou udány v tabulkách číslo 4 – 7.

Tloušťka [mm]



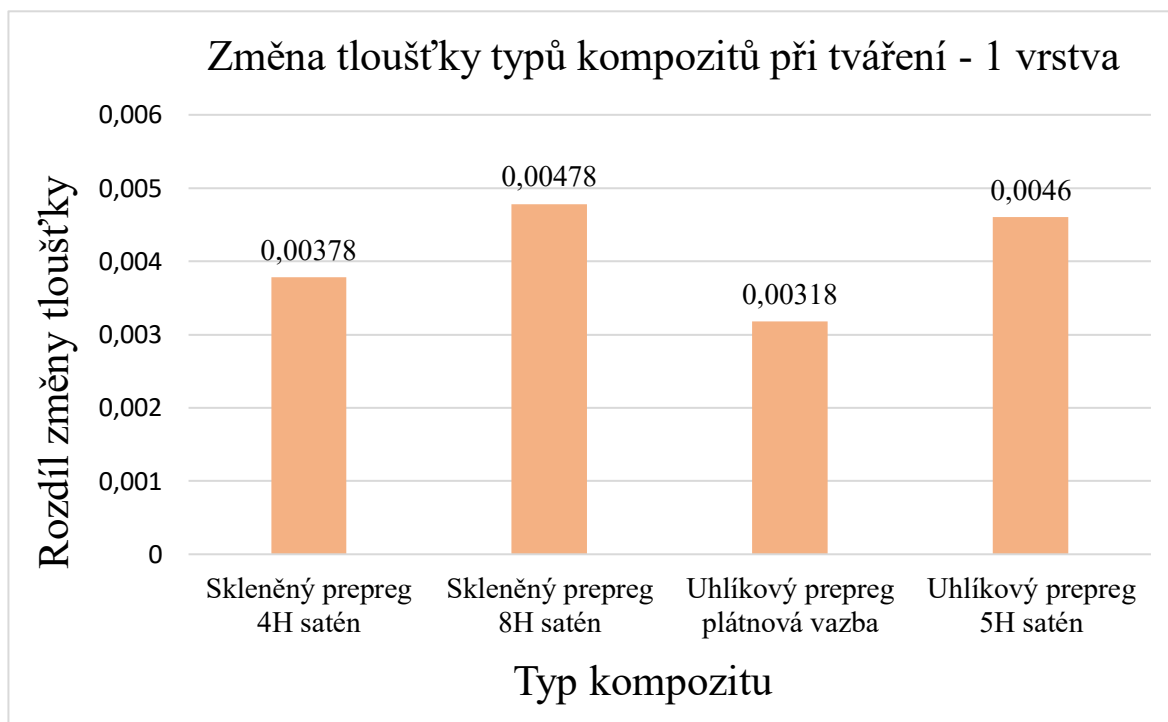
Obr. 47 Simulace změny tloušťky čtyř vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

6.3.2 Vyhodnocení simulace změny tloušťky

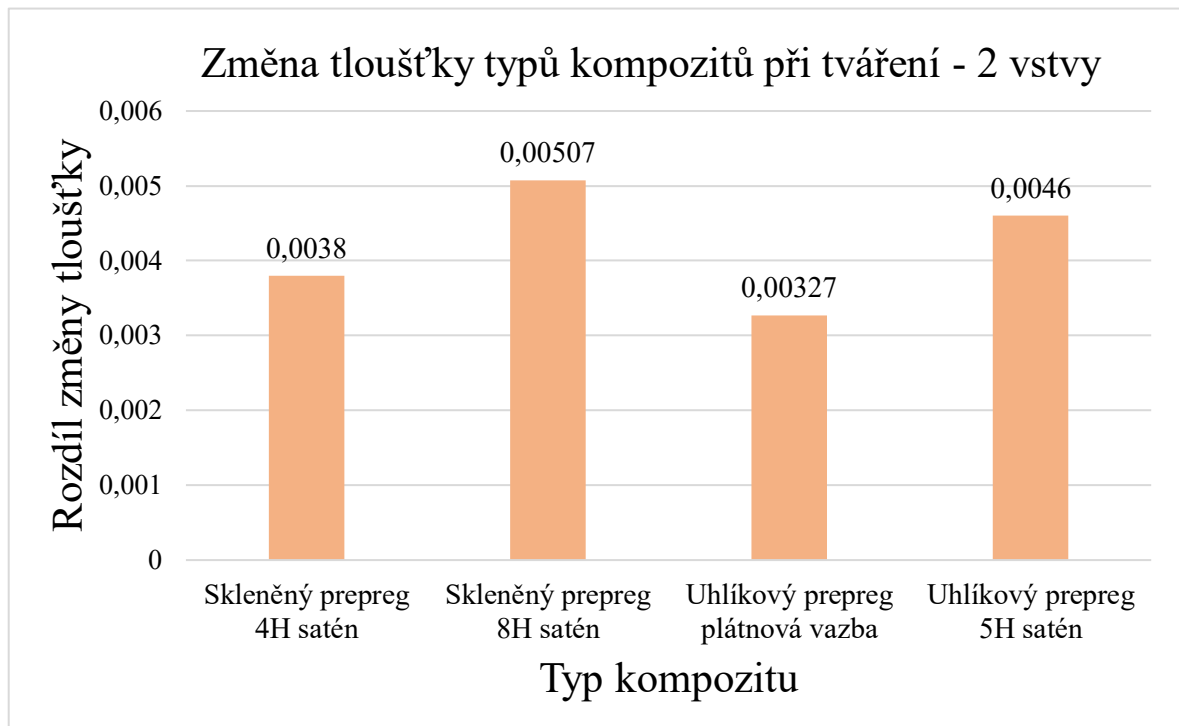
Při tváření kompozitních výrobků je důležité zachovat konstantní tloušťku po celém objemu součásti. Dle výše vytvořených simulací jsou kritická místa změny tloušťky v zaoblených oblastech, a čím menší hodnota poloměru zaoblení je, tím větší je riziko ztenčení nebo nahromadění nechtěného materiálu. Dalším kritickým místem je dno výrobku, na které bezprostředně působí síla vrchní části lisovacího nástroje. Výběžky výrobku a všeobecně komplikovanější tvary jsou také příčinou změn tloušťky.

Z obrázků číslo 48–50 je patrné, že uhlíkový prepreg má menší tendenci měnit svoji tloušťku při procesu tváření. Uhlíkové tkaniny mají obvykle větší Youngův modul pružnosti, což má vliv na změnu tloušťky. Nejmenší změnu tloušťky lze vidět u prepregu z uhlíkového vlákna s prostou vazbou, největší zase u skleněného prepregu s 8H satén.

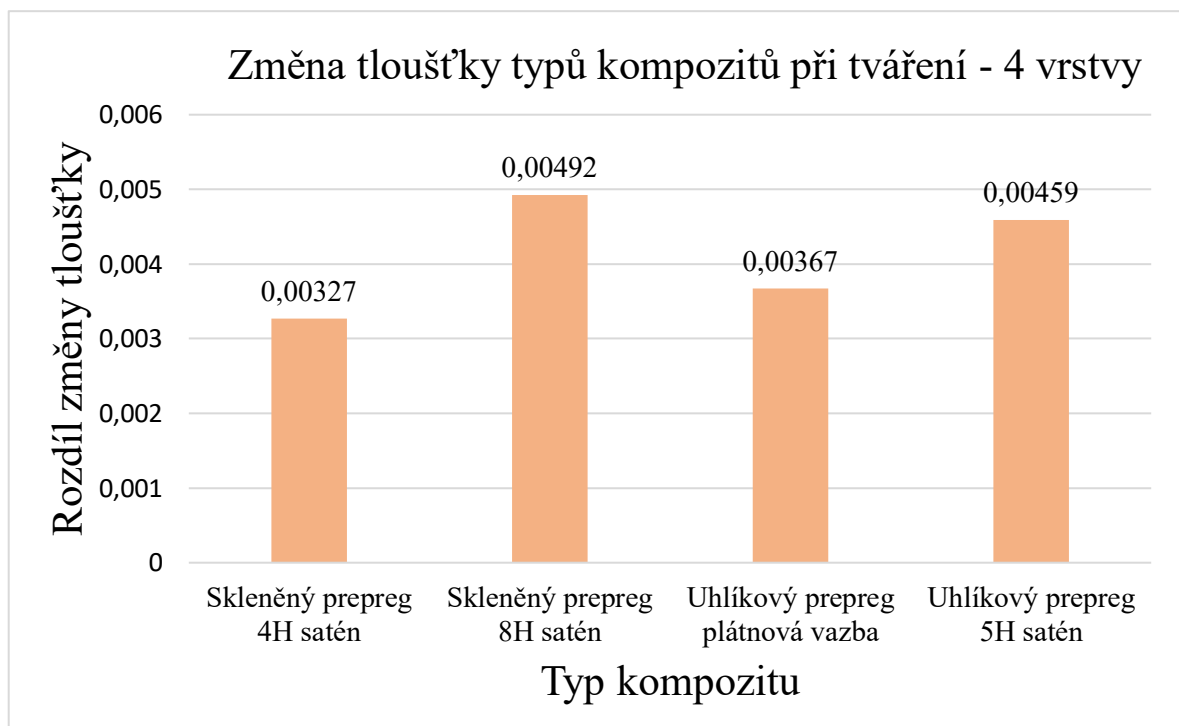
Změnu tloušťky lze optimalizovat vhodným výběrem přidržovače a tažidla a kvalitně je opracovat, aby maximálně plnily svoji funkci. Úhlem natočení vláken v kompozitu a vhodným počtem vrstev je možné celý proces zkvalitnit.



Obr. 48 Změny tloušťky různých typů prepregů – 1 vrstva



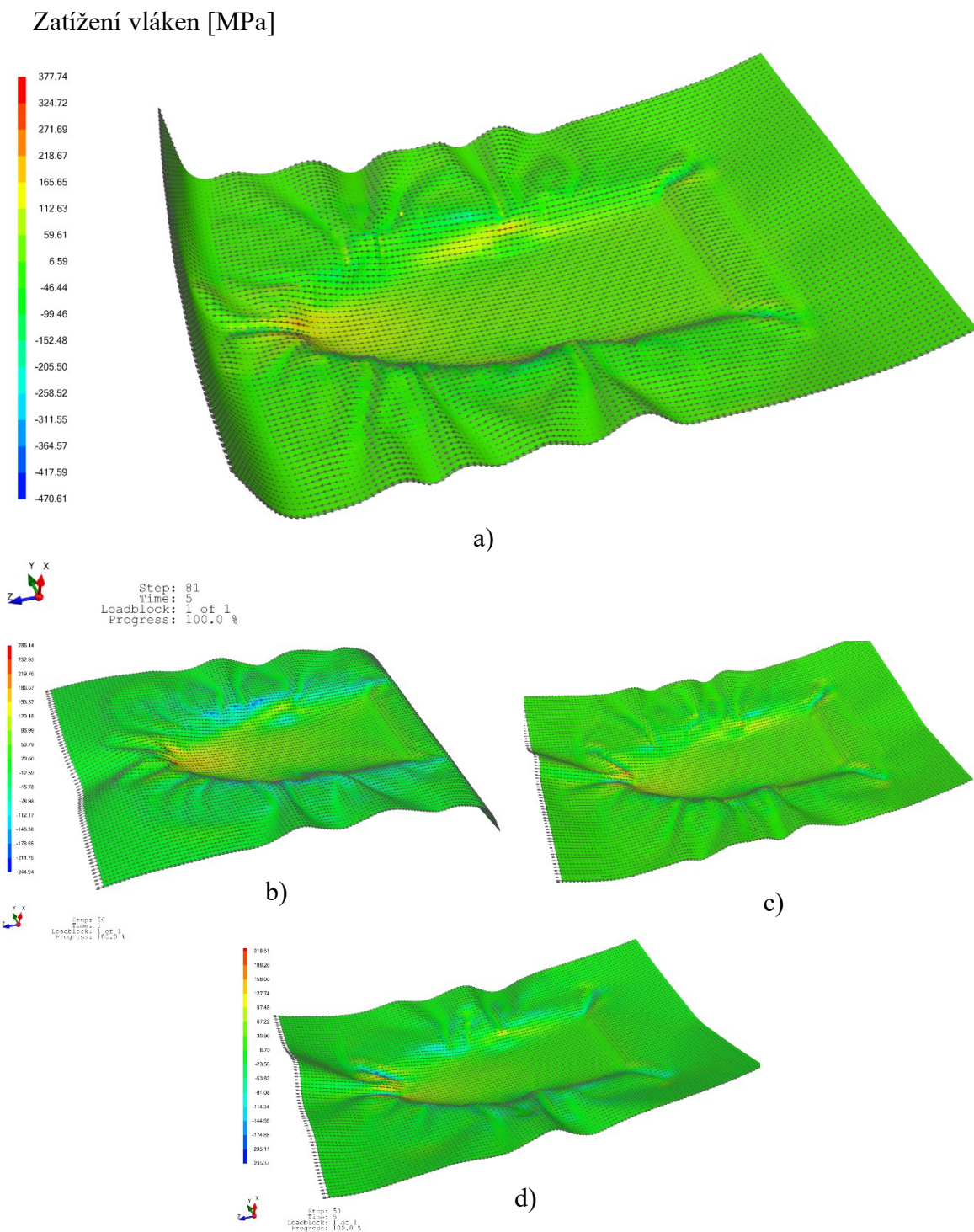
Obr. 49 Změny tloušťky různých typů prepregů – 2 vrstvy



Obr. 50 Změny tloušťky různých typů prepregů – 4 vrstvy

6.3.3 Simulace zatížení vláken

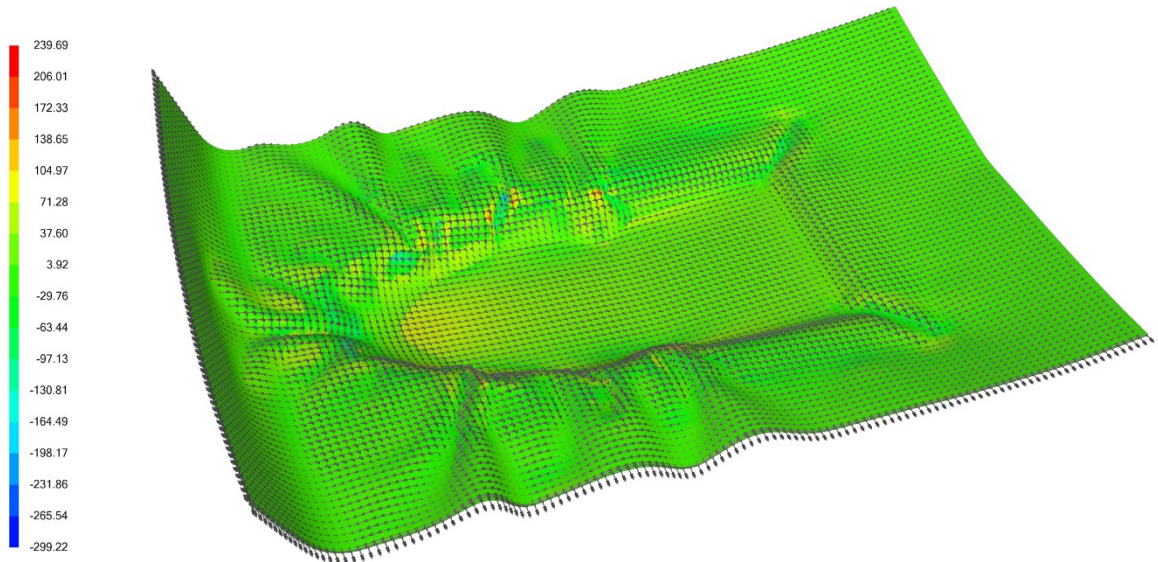
Na obrázku číslo 51 byly vyobrazeny simulace změny zatížení vláken při procesu tváření kompozitů. V tomto případě je použita 1 vrstva tkaniny.



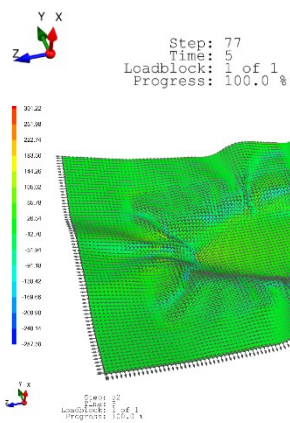
Obr. 51 Simulace zatížení vláken 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátnová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 52 byly vyobrazeny simulace změny zatížení vláken při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 2 vrstvy tkaniny.

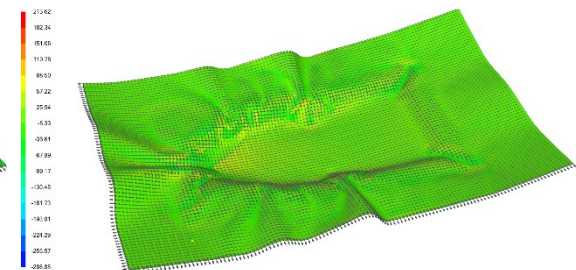
Zatížení vláken [MPa]



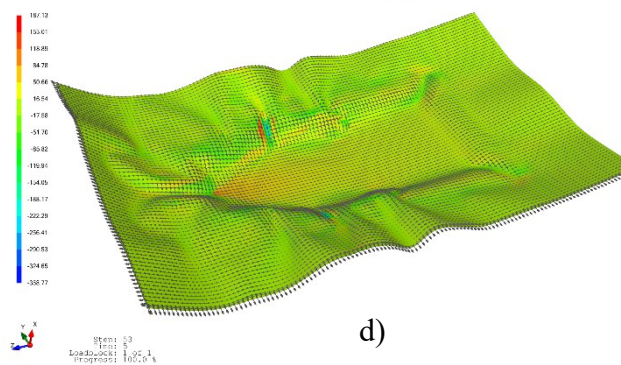
a)



b)



c)

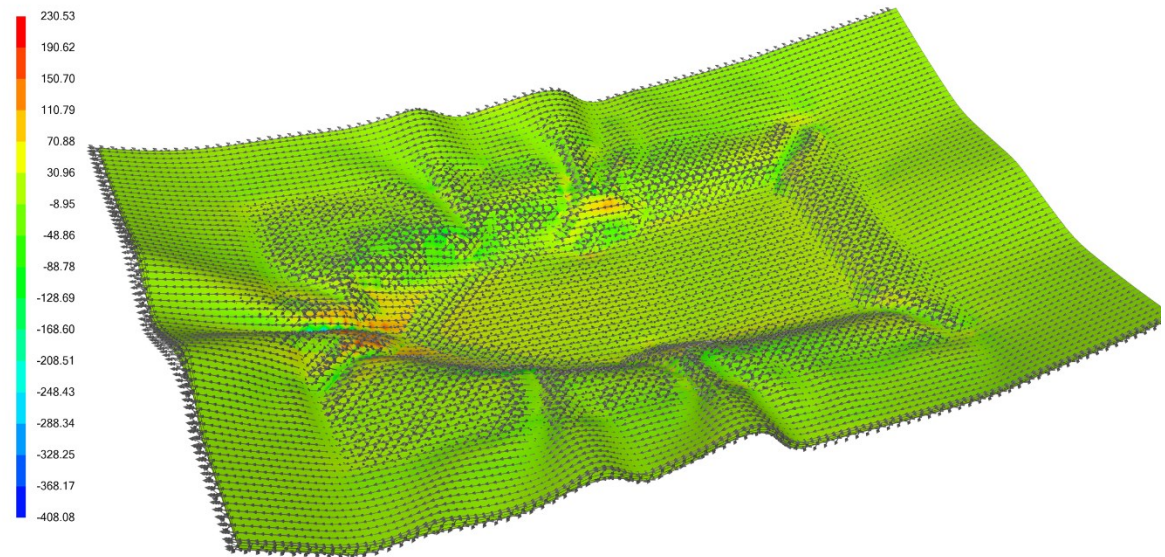


d)

Obr. 52 Simulace zatížení vláken 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

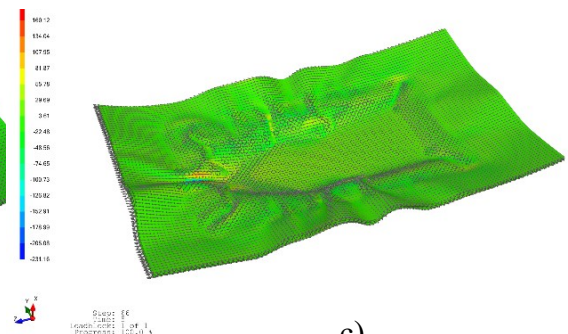
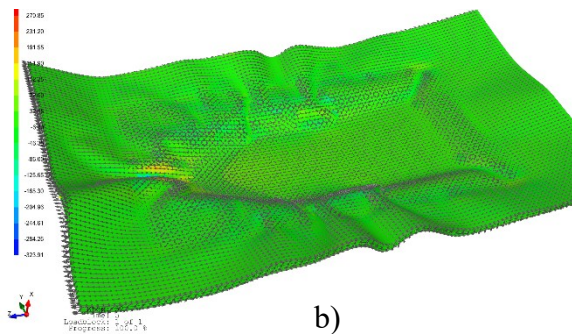
Na obrázku číslo 53 byly vyobrazeny simulace zatížení vláken při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 4 vrstvy tkaniny.

Zatížení vláken [MPa]



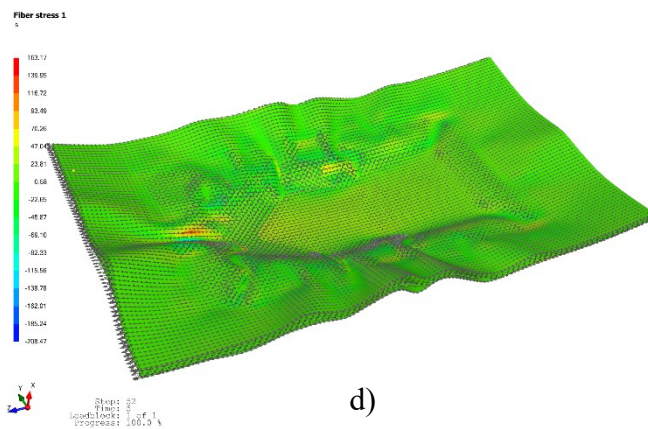
Step: 69
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %

a)



b)

c)



d)

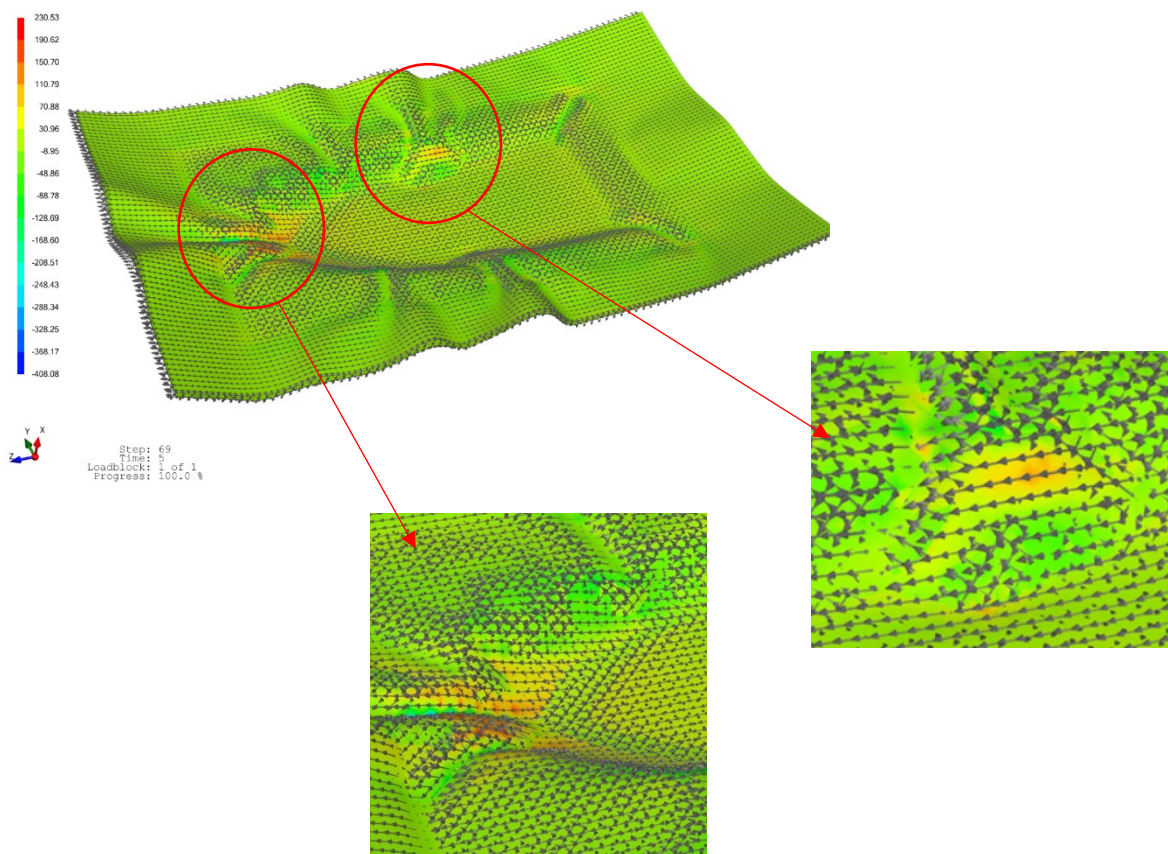
Obr. 53 Simulace zatížení vláken 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

6.3.4 Vyhodnocení simulace zatížení vláken

Na výše zobrazených snímcích byla vyhotovena simulace zatížení vláken při technologii tváření kompozitu krytu motoru. Z analýzy lze usoudit, že kritickými místy výskytu defektů (obr. 54) a největšího zatížení jsou výběžky na výrobku, zaoblení v rozích a velké zaoblení na přední straně výrobku. Koncentrace napětí v určitých místech může způsobit zvrásnění povrchu nebo trhliny, které znehodnotí výrobek.

S přibývajícimi vrstvami tkaniny je výrobek více stabilní a v místech vysoké koncentrace napětí je nižší pravděpodobnost, že dojde k defektu. Pro zlepšení průběhu procesu je možné zvětšit zaoblení dolní i horní části formy, přidat přidržovač polotovaru nebo regulovat rychlost a velikost síly horní části formy.

Zatížení vláken [MPa]

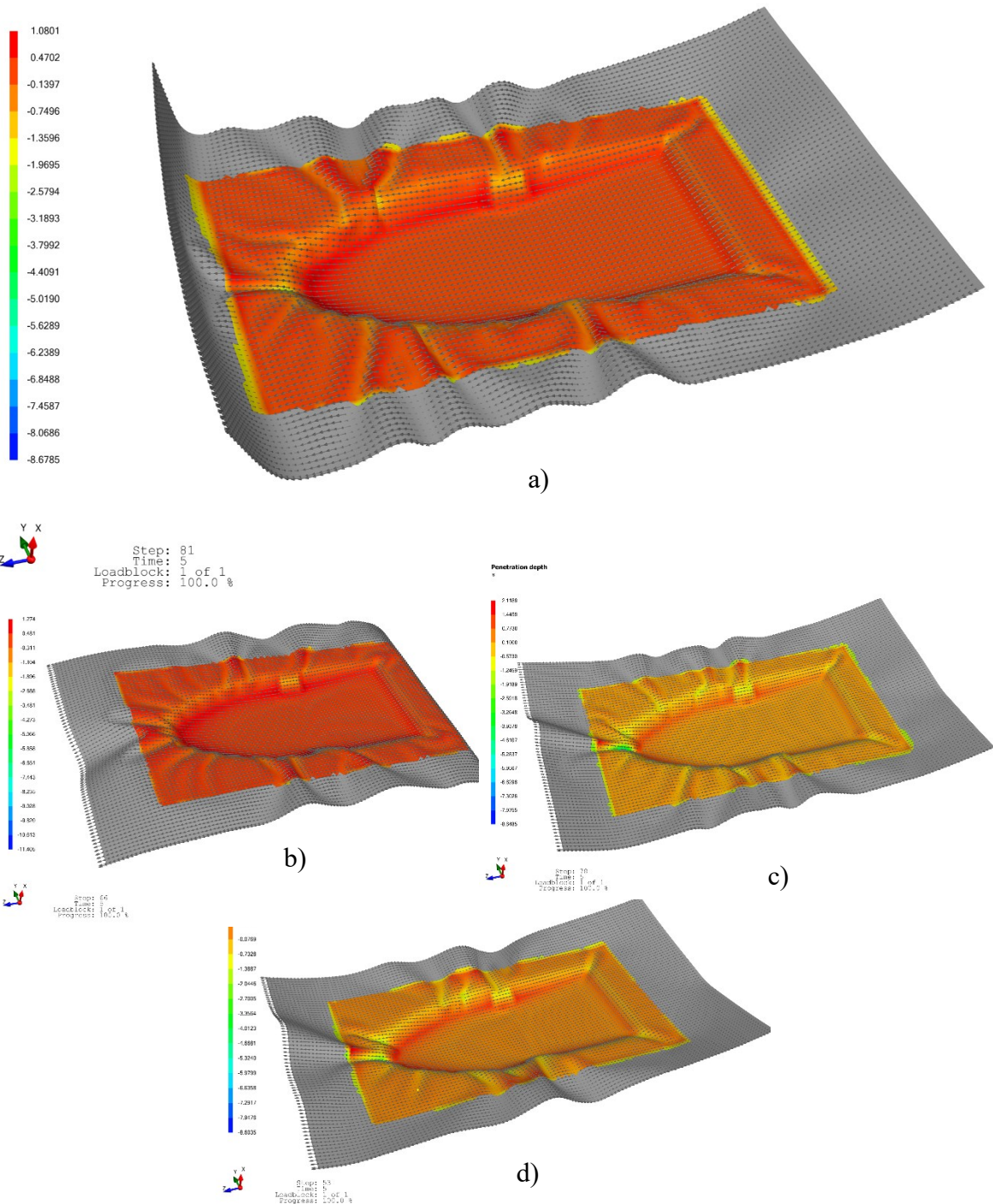


Obr. 54 Kritická místa výskytu nejvyššího napětí vláken

6.3.5 Simulace hloubky průniku

Na obrázku číslo 55 byly vyobrazeny simulace hloubky průniku při procesu tváření kompozitů. V tomto případě je použita 1 vrstva tkaniny.

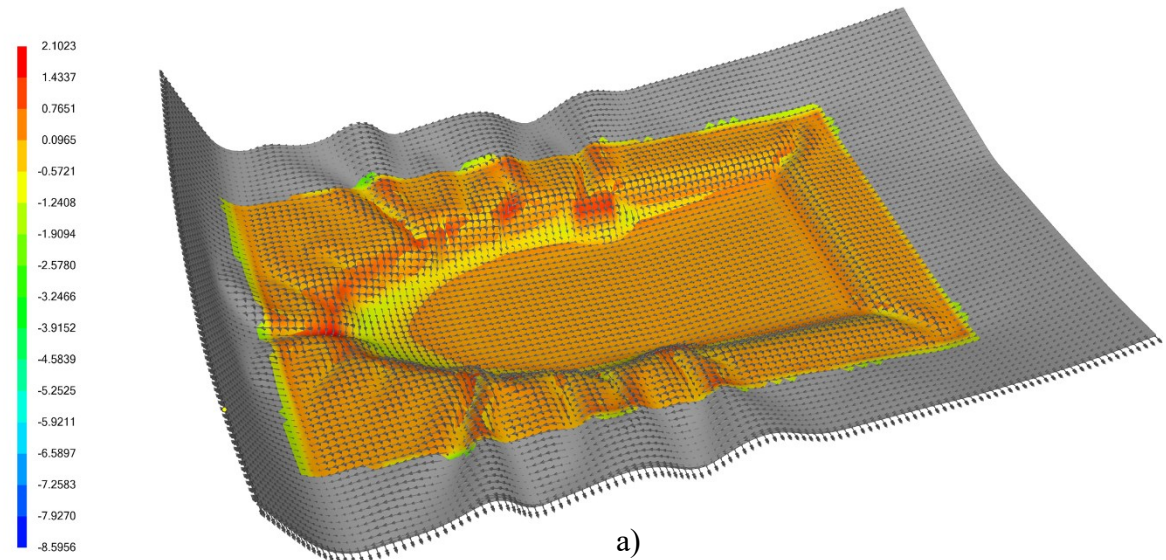
Hloubka průniku [mm]



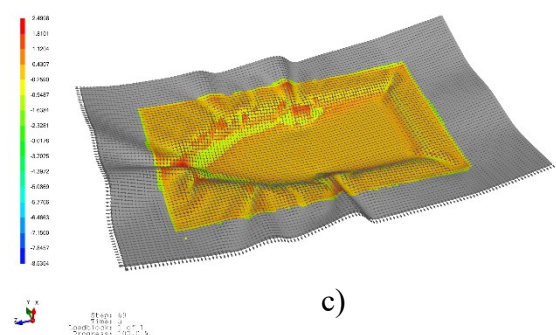
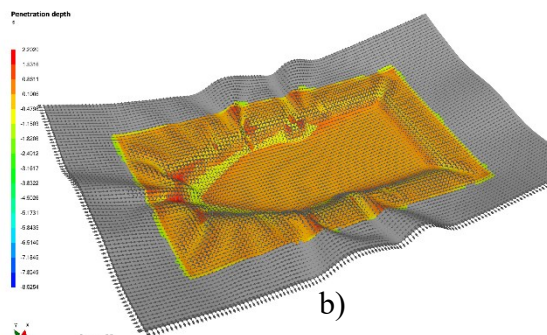
Obr. 55 Simulace hloubky průniku 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátnová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 56 byly vyobrazeny simulace hloubky průniku při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 2 vrstvy tkaniny.

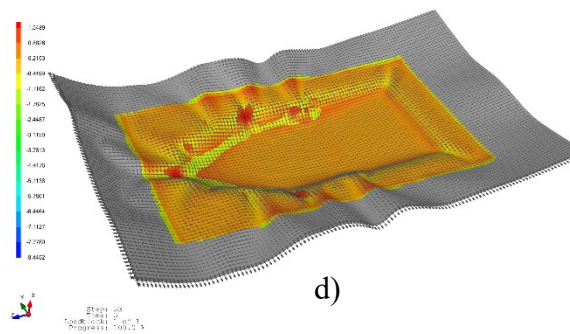
Hloubka průniku [mm]



Step: 77
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



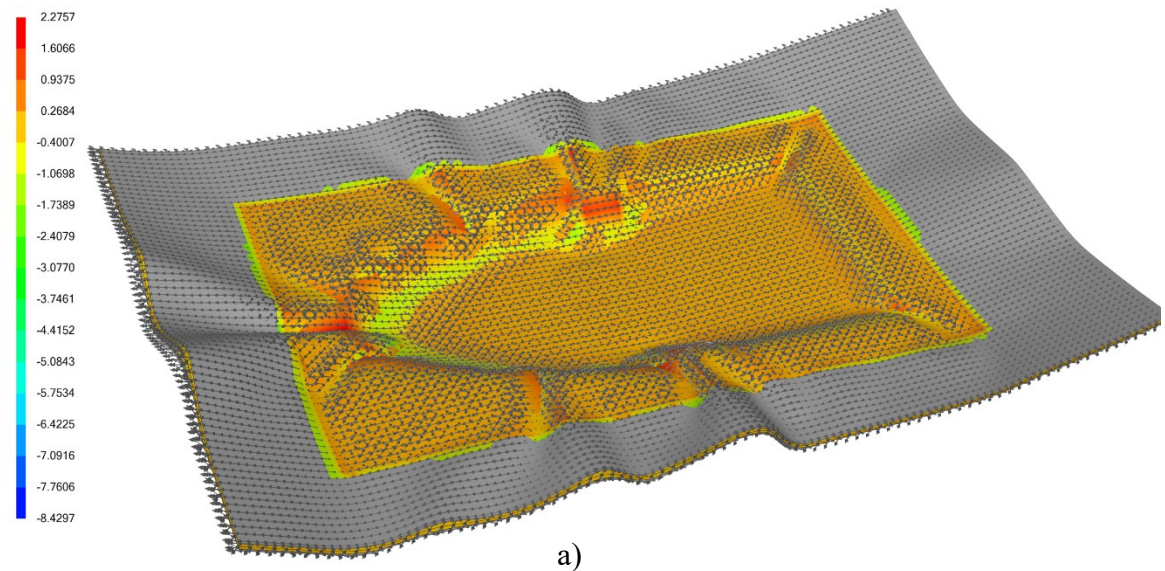
Step: 57
Time: 2
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



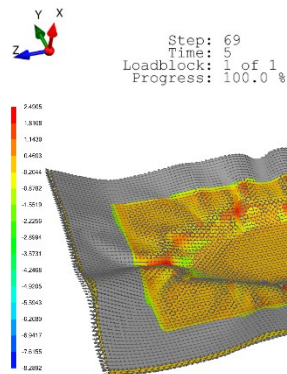
Obr. 56 Simulace hloubky průniku 2 vrstev – a Skleněný prepreg 4H satén,
b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový
prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 57 byly vyobrazeny simulace hloubky průniku při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 4 vrstvy tkaniny.

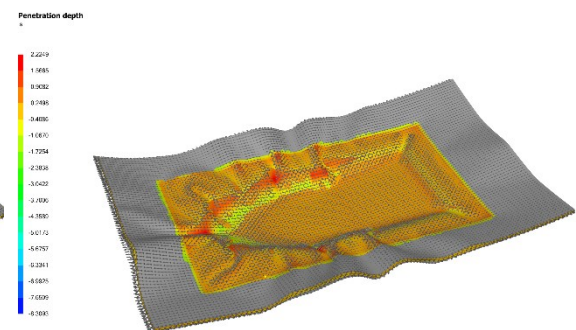
Hloubka průniku [mm]



a)



b)



c)



d)

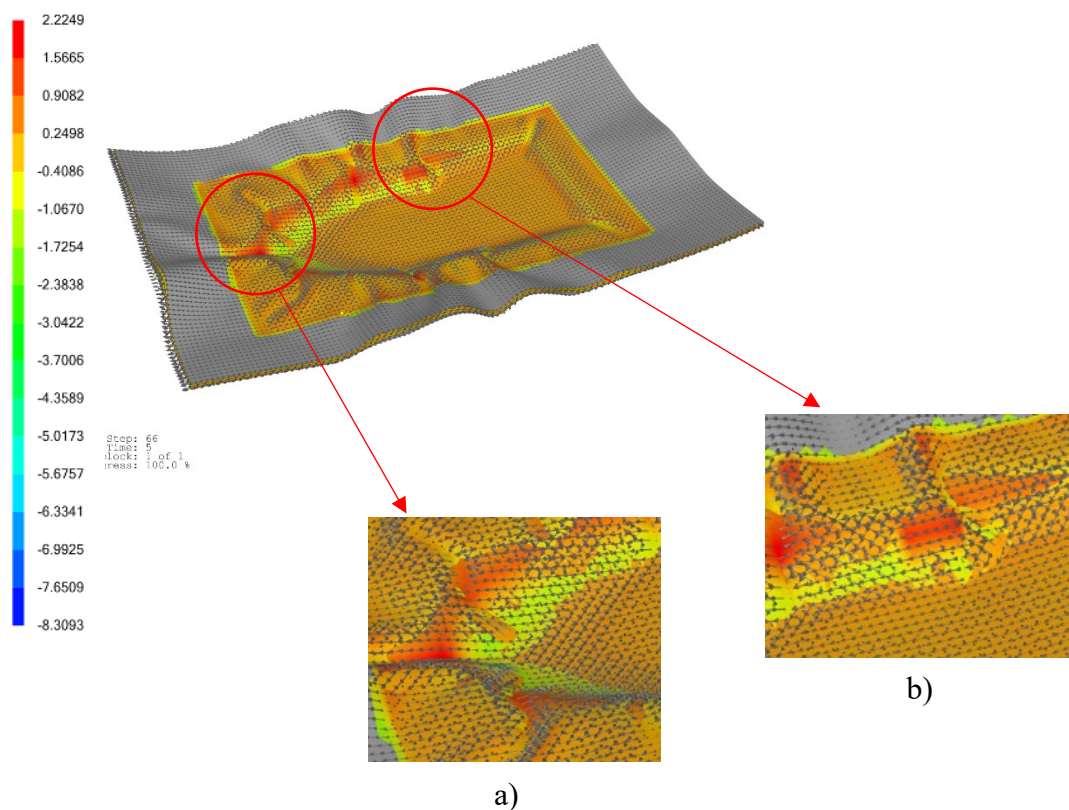
Obr. 57 Simulace hloubky průniku 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

6.3.6 Vyhodnocení simulace hloubky průniku

Na snímcích uvedených výše byla vyhotovena simulace hloubky průniku při technologii tváření kompozitů. Ideálním stavem by bylo proniknutí vrchní formy na všechna potřebná místa a dodržení daných rozměrů výrobku. Z obrázků uvedených výše vyplývá, že při tváření kompozitu z jedné vrstvy tkaniny je lehčí dosáhnout požadovaného tvaru a geometrie. S přibývajícimi vrstvami tkaniny a zvětšení četnosti propletení plátna je těžší dosáhnout daných rozměrů a materiál klade větší odpor.

Kritickými místy (obr. 58) výrobku jsou místa vnějšího zaoblení a výběžků, kde dochází až k 3x větší penetraci, než je norma v tomto případě. Naopak u dvouvrstvého a čtyřvrstvého kompozitu je v místech vnitřního zaoblení penetrace zhruba 2x menší, než bylo zamýšleno.

Hloubka průniku [mm]

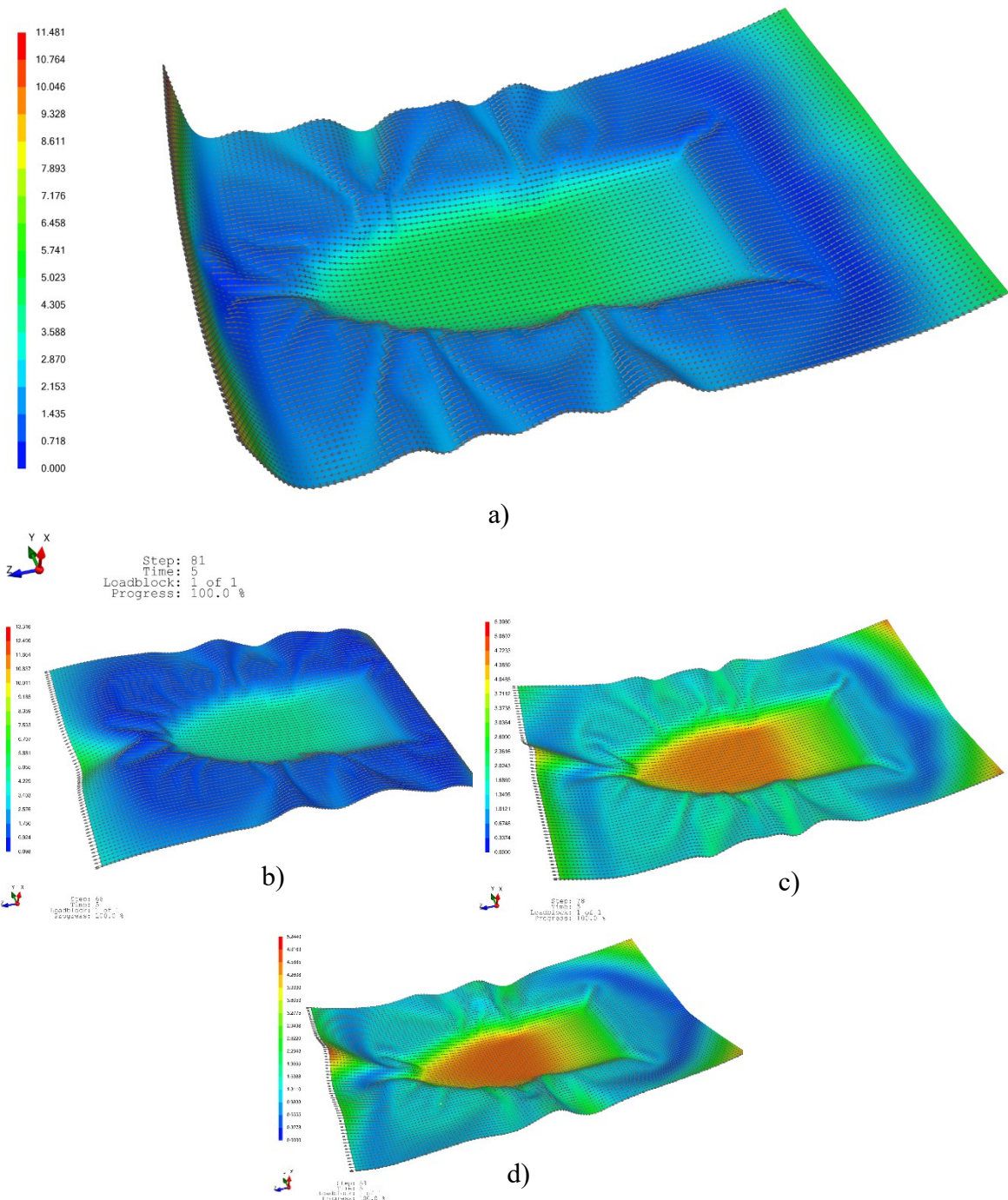


Obr. 58 Kritická místa – a) nejmenší penetrace, b) největší penetrace

6.3.7 Simulace celkového přemístění materiálu

Na obrázku číslo 59 byly vyobrazeny simulace přemístění materiálu při procesu tváření kompozitů. V tomto případě je použita 1 vrstva tkaniny.

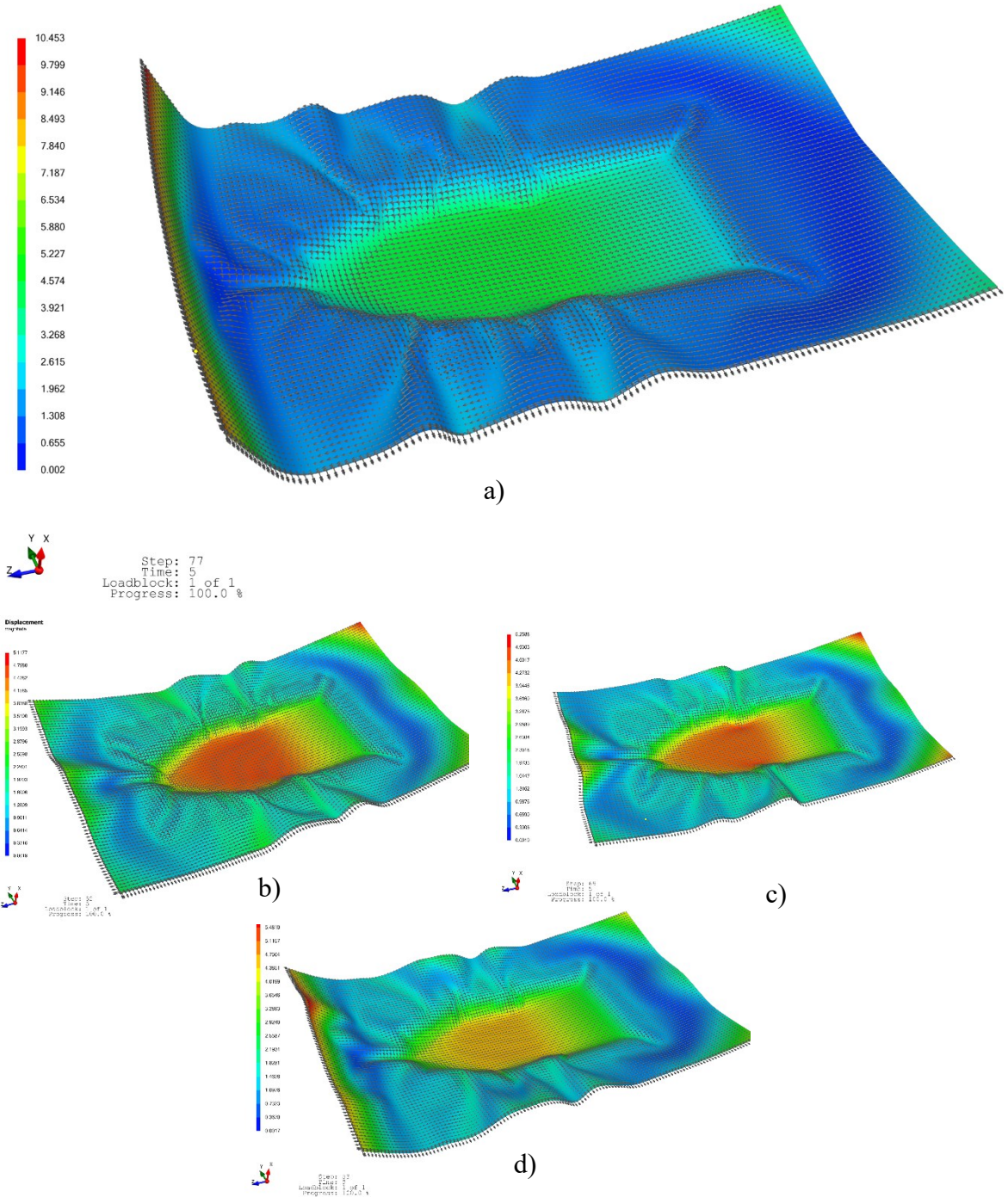
Celkové přemístění materiálu



Obr. 59 Simulace přemístění materiálu 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 60 byly vyobrazeny simulace přemístění materiálu při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 2 vrstvy tkaniny.

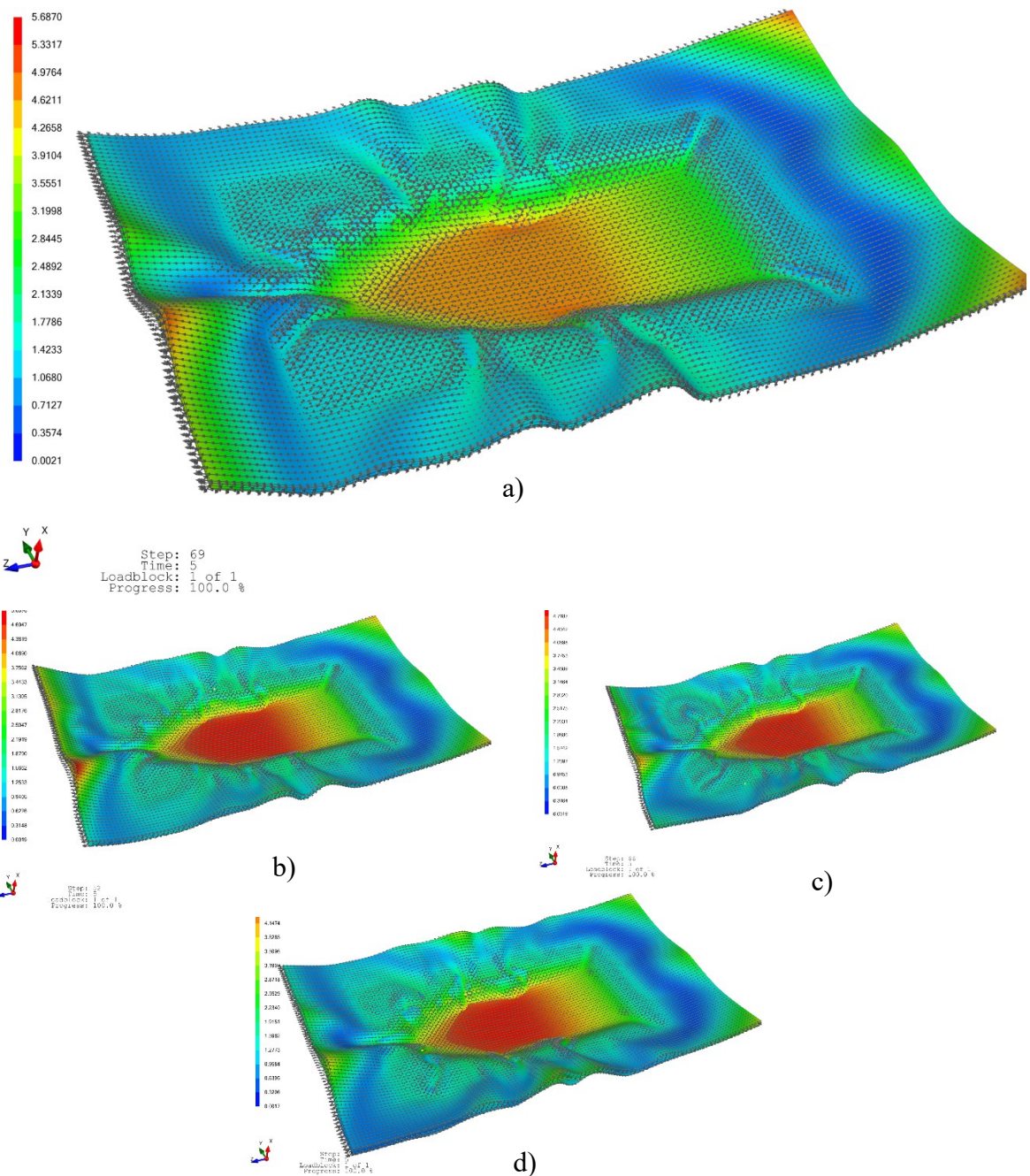
Celkové přemístění materiálu



Obr. 60 Simulace přemístění materiálu 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

Na obrázku číslo 61 byly vyobrazeny simulace přemístění materiálu při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 4 vrstvy tkaniny.

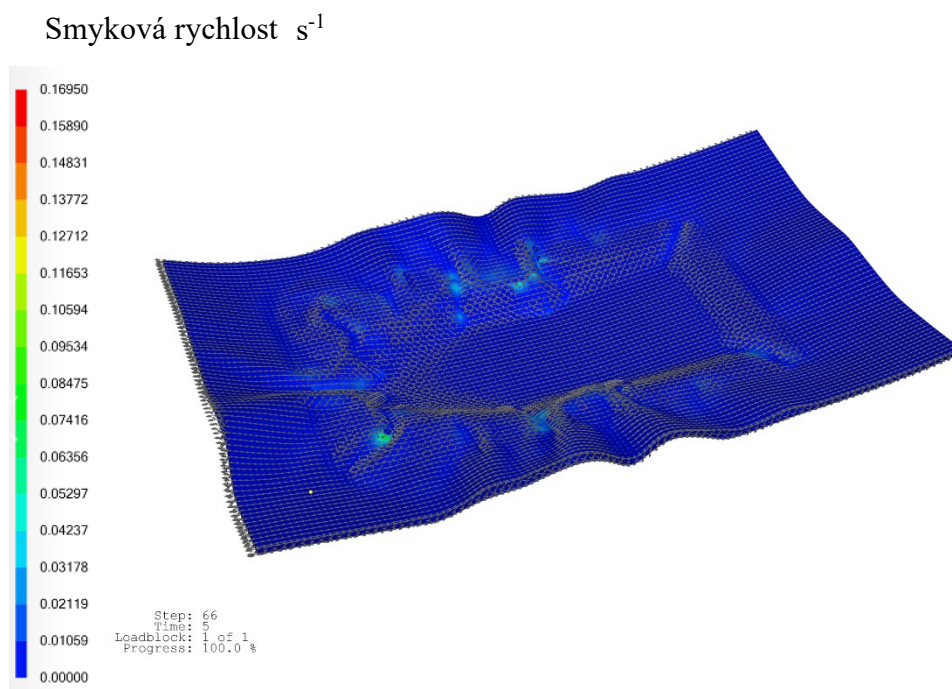
Celkové přemístění materiálu



Obr. 61 Simulace přemístění materiálu 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

6.3.8 Vyhodnocení simulace přemístění materiálu

Na snímcích vyobrazených výše byla provedena simulace přemístění materiálu. Je patrné, že největší přemístění materiálu proběhlo na dně výrobku, kde dosedlo tažidlo horní formy. Tímto jevem bylo také způsobeno vrásnění na okraji součásti, které zhoršuje mechanické vlastnosti vlákna. Další příčinou zvrásnění je téměř nulová smyková rychlost, vyobrazena na obrázku 62. Smyková rychlost byla ve všech případech typů tkanin obdobná.



Obr. 62 Simulace smykové rychlosti skleněného prepregu ze dvou vrstev

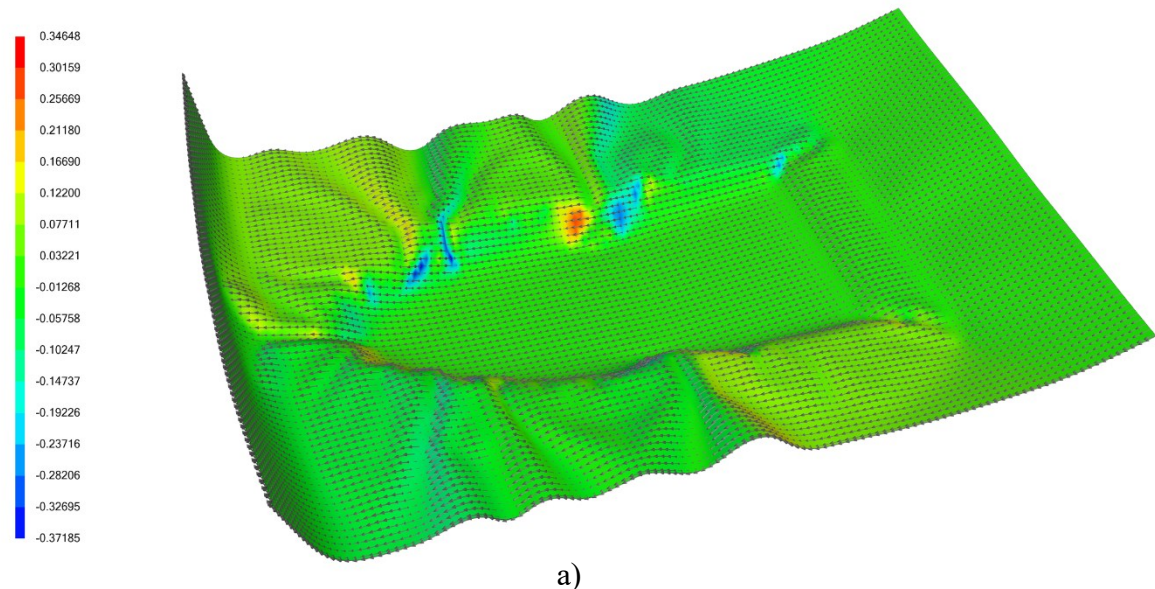
Dle výše uvedených simulací je zřejmé, že u uhlíkových tkanin, ať už s prostou nebo plátovou vazbou, se materiál přemísťuje lépe než u tkanin skelných. Důkazem je také to, že zvrásnění po obvodu výrobku není tak velké.

Pro optimalizaci zvrásnění a přemísťování materiálu lze aplikovat přídržovač nebo napínače laminátu. Změnou tvaru polotovaru na vhodnější geometrii se zkvalitní celý průběh procesu.

6.3.9 Simulace změny směru vláken v ose y

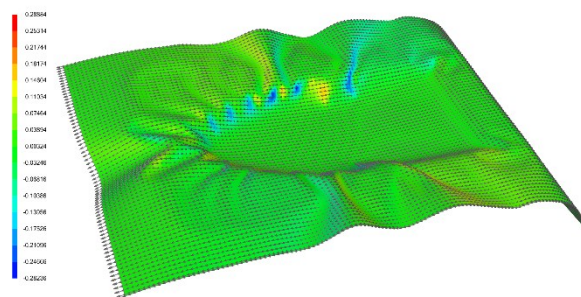
Na obrázku číslo 63 byly vyobrazeny simulace změny směru vláken v ose y při procesu tváření kompozitů. V tomto případě je použita 1 vrstva tkaniny.

Směr vláken v ose y



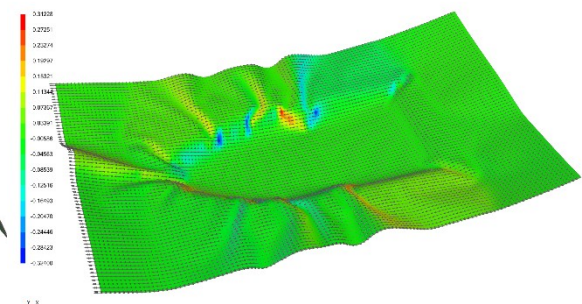
a)

Y X
Z
Step: 81
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



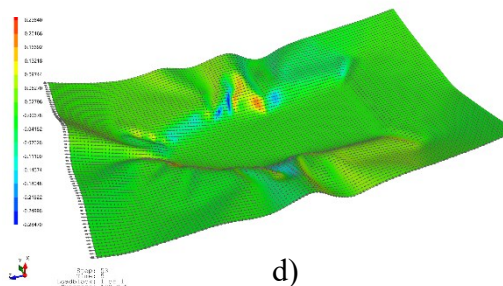
b)

Y X
Z
Step: 81
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



c)

Y X
Z
Step: 81
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



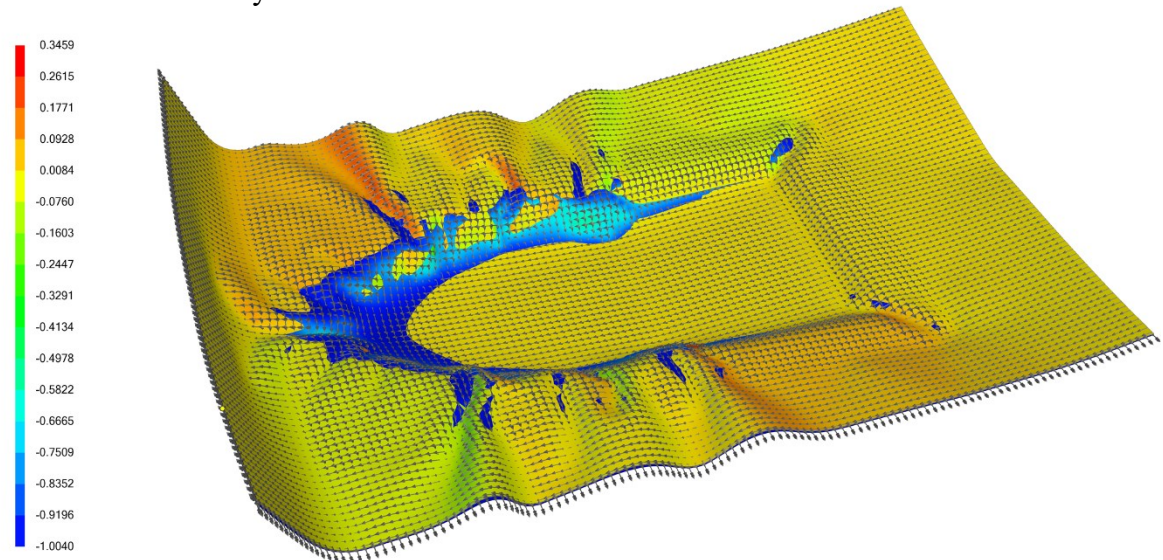
d)

Y X
Z
Step: 81
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %

Obr. 63 Simulace změny směru vláken v ose y u 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátnová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

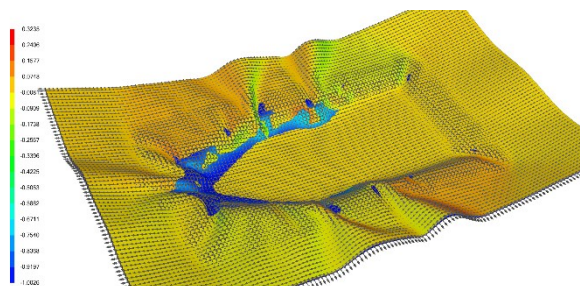
Na obrázku číslo 64 byly vyobrazeny simulace změny směru vláken v ose y při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 2 vrstvy tkaniny.

Směr vláken v ose y



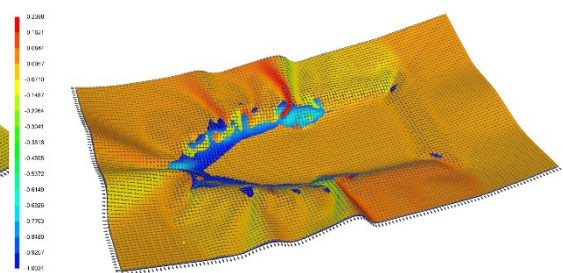
a)

Y X
Z
Step: 77
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



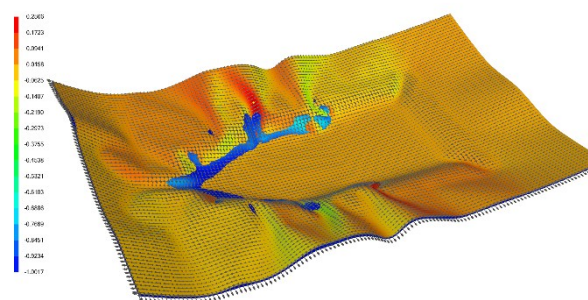
b)

Y X
Z
Step: 77
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



c)

Y X
Z
Step: 77
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



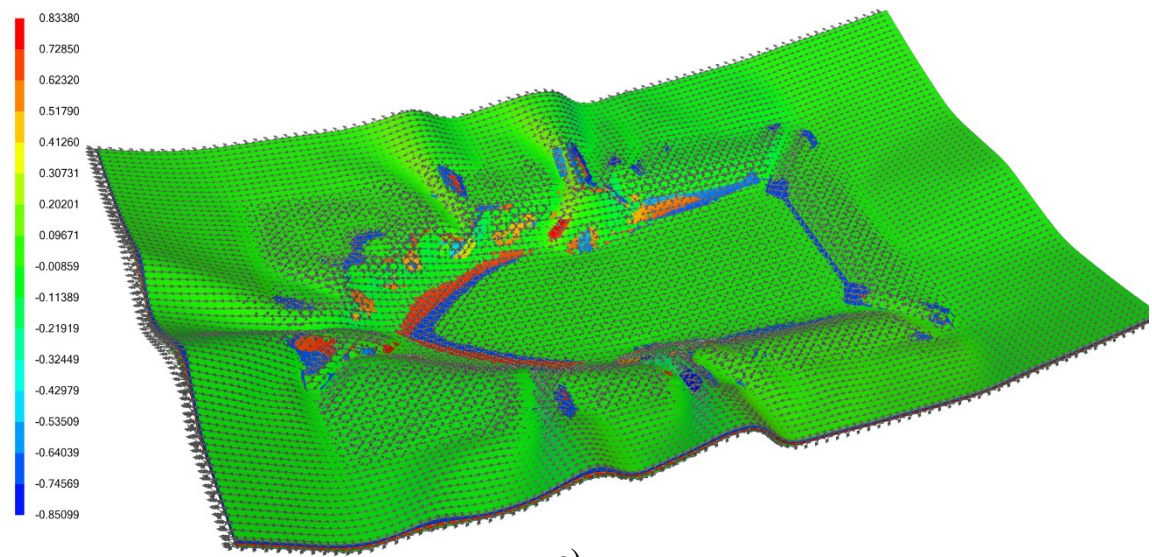
d)

Y X
Z
Step: 77
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %

Obr. 64 Simulace změny směru vláken v ose y u 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

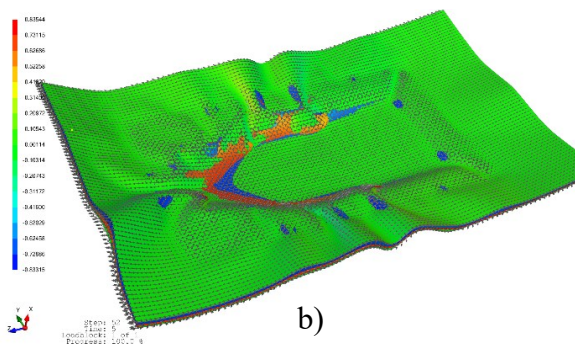
Na obrázku číslo 65 byly vyobrazeny simulace změny směru vláken v ose y při procesu tváření kompozitů. V tomto případě jsou použity 4 vrstvy tkaniny.

Směr vláken v ose y



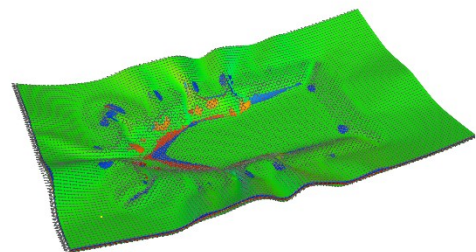
a)

Y X
Z
Step: 69
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



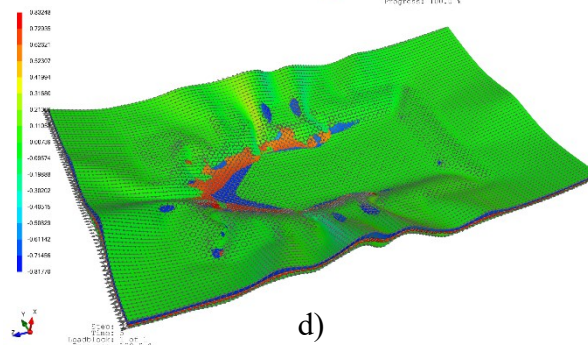
b)

Y X
Z
Step: 66
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



c)

Y X
Z
Step: 66
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %



d)

Y X
Z
Step: 66
Time: 5
Loadblock: 1 of 1
Progress: 100.0 %

Obr. 65 Simulace změny směru vláken v ose y u 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátnová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén

6.3.10 Vyhodnocení simulace změny směru vláken v ose y

Na snímcích uvedených výše byla provedena simulace změny směru vláken v ose y. Pokud se jedná o jednu vrstvu textilie s rotací vlákna 0 stupňů, není změna směru vlákna tak patrná a prakticky se mění pouze na některých kritických místech, jako jsou výběžky na krajích krytu motoru.

V případě dvou vrstev o úhlu natočení vláken 0 a 90 stupňů se u první vrstvy jedná o stejný případ, změna směru vláken není patrná. U druhé vrstvy o úhlu natočení 90 stupňů nastává větší změna v místech vnitřního zaoblení a kolem výstupků na krajích výrobku. Stejně tak v místech zvrásnění je patrná změna směru vlákna.

Třetí variantou jsou čtyři vrstvy s úhly natočení 0/45/-45/0. Stejně jako v předchozích případech, změna směru vlákna o natočení 0 stupňů není patrná. V případech natočení 45/-45 stupňů je změna razantní v místech kritických, tj. v zaoblení po celém vnitřním obvodu, ve výstupcích a v místech, kde se vyskytuje zvrásnění kompozitu.

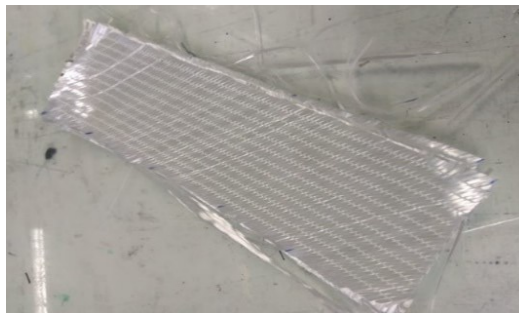
Dle simulací nemá typ tkaniny vliv na změnu směru vláken v ose y.

7 MĚŘENÍ POMOCÍ DIGITÁLNÍ KORELACE OBRAZU

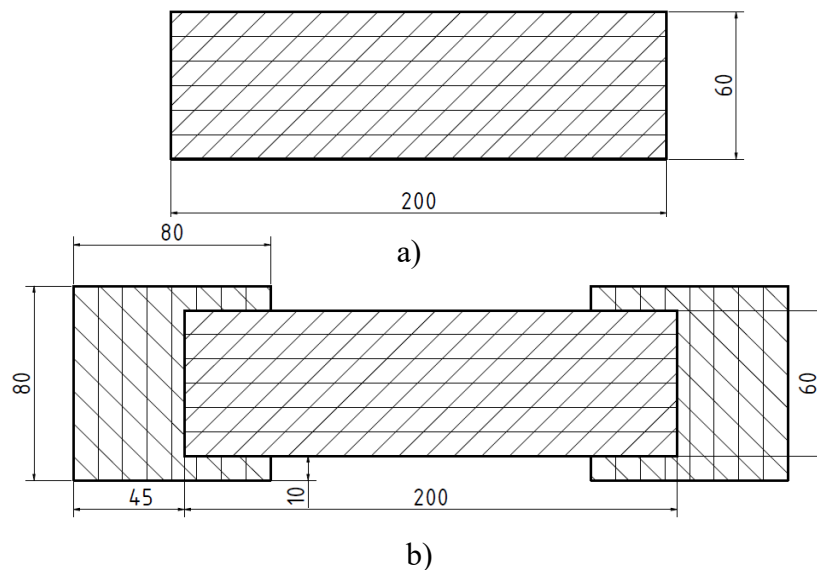
V následující kapitole bude rozebrán postup měření na zařízení pro digitální korelaci obrazu, které byly prováděny v laboratoři. Nejprve bylo nutné připravit vzorky pro měření z dané tkaniny a upravit je tak, aby je bylo možné upevnit do stroje pro trhací zkoušku. Po samotném měření se jednotlivá data upraví a vyhodnotí.

7.1 Příprava zkušebních vzorků

Ze tkaniny z multiaxiálního skelného vlákna (obr. 67) s natočením 0/45/0 stupňů od společnosti SAERTEX byly vyříznuty vzorky o velikosti 200x60 mm (obr. 66). Aby bylo možné tkaninu vhodně upevnit do stroje na trhací zkoušky, byly vyříznuty 4 příložky o rozměrech 80x80 mm ze stejného materiálu, které byly přiloženy na oba konce z obou stran a zalaminovány do pryskyřice.



Obr. 67 Ukázka vzorku multiaxiální tkaniny



Obr. 66 Základní rozměry vzorku – a) Pásek bez příložek, b) S příložkami

7.1.1 Příprava formy

Samotný průběh laminování se skládal z několika kroků. Nejprve bylo nutné připravit formu, na které celý proces proběhl. Bylo nezbytné všechny dílčí kroky dělat poctivě, měly vliv na výslednou kvalitu vzorků. Formou v tomto případě byla deska z tvrzeného skla tvaru obdélníku. Sklo bylo technickým lihem vyčištěno od veškerých nečistot. Po vyčištění byla na desku nanесena tlustá vrstva separační pasty (od společnosti TR INDUSTRIES – MOLD RELEASE), která se pomocí ubrousku rozleštila, dokud nebylo sklo úplně průhledné. Separální vrstva zabraňuje přilnutí vláken k formě a umožňuje lehké odlepení po vytvrzení pryskyřice. Po zhruba 5i minutách, kdy necháme pastu působit, celý proces 2x zopakujeme.

7.1.2 Proces laminování

Následovala příprava matrice, která byla aplikována na vzorky s multiaxiální tkaniny. Do nádoby byla nalita pryskyřice a tužidlo od firmy Havel Composites v poměru 10:4, přesně tak, jak bylo napsáno na pokynech etikety. Směs se zamíchala dřevěnou tyčinkou a aplikovala se štětcem nejprve na formu. Poté byly umístěny příložky, opět aplikována namíchaná směs a poté přiloženy pásy tkaniny. Bylo potřeba dávat pozor, aby pryskyřice nekápala na část vzorku, která poté podstoupila měření. Nakonec byly spojeny vrchní vrstvou příložek a opět nanесena pryskyřice (obr. 68). Bylo nutno pracovat rychle z důvodu zgelovatění a zatvrdnutí namíchané směsi. Forma se vzorky se přikryla separační folií, aby nedošlo k nalepení na závaží, zatížena a pod tlakem se nechá na nejméně 24 hodin vytvrdit. Po odlehčení a vyjmutí vzorků byly nůžkami příložky upraveny tak, aby nebyly ostré a mohly se vhodně upevnit do čelistí stroje na trhací zkoušky.



Obr. 68 Vyrobené vzorky

7.2 Měření vzorků na DIC

Digitální korelace obrazu (DIC) (obr. 30) umožňuje plně určit pole posunutí a měřit posunutí bodů na povrchu tělesa na povrchu načtené struktury. Cílem tohoto měření bylo vyzkoušet měření pomocí DCI a určit sílu a zkrácení či prodloužení, při kterém se vzorek přetrhne.

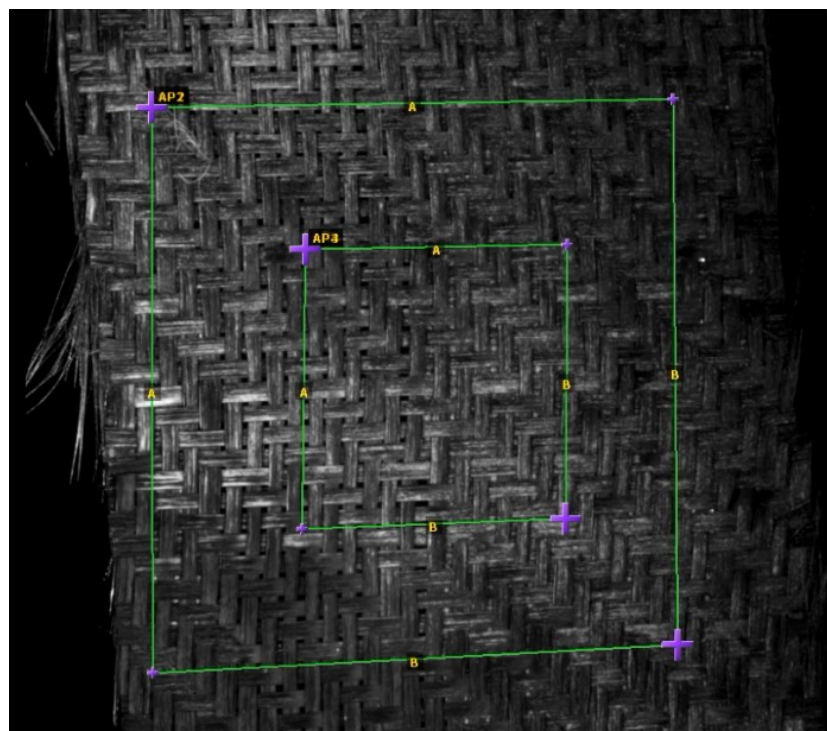
7.2.1 Příprava měření

Upravené vzorky byly testovány na zařízení tahové zkoušky, který byl situován v laboratořích na fakultě technologické ve Zlíně. Bylo nutné pořádně upevnit vzorky do mechanických čelistí, aby při zkoušce nevypadly a nedošlo k znehodnocení celého procesu. Čelisti se rozevíraly rychlostí 20 mm/min při pokojové teplotě 24°C. Měření metodou DIC proběhlo na kamerovém systému (obr. 69), který je stejně tak přítomen na fakultě technické. Vzorové rozestavení je zobrazeno na obrázku číslo 53 v teoretické části diplomové práce.

Pro započítání měření pomocí DIC musela být určena referenční šablona, tedy podmnožina, kde byl vzorek snímán a bylo pozorováno absolutní prodloužení/zkrácení a změna úhlu natočení vláken. Referenční šablona je vyobrazena na obrázku 70.



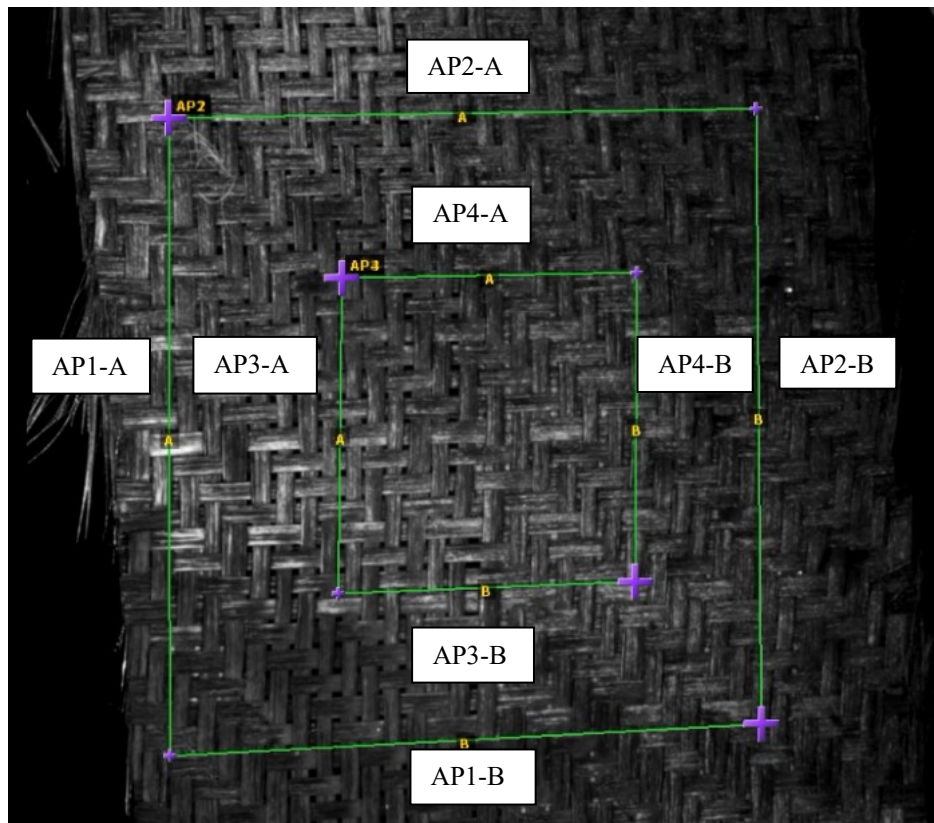
Obr. 69 Kamerový systém na měření DIC



Obr. 70 Zvolená referenční šablona

Druhým krokem bylo zvolení bodů a sekcí, ve kterých byly zmíněné změny veličin pozorovány. Šablona byla rozdělena na následující sekce (obr. 71):

- AP1-A: Levá (svislá) strana velkého čtverce
- AP1-B: Spodní (vodorovná) strana velkého čtverce
- AP2-A: Horní (vodorovná) strana velkého čtverce
- AP2-B: Pravá (svislá) strana velkého čtverce
- AP3-A: Levá (svislá) strana malého čtverce
- AP3-B: Spodní (vodorovná) strana malého čtverce
- AP4-A: Horní (vodorovná) strana malého čtverce
- AP4-B: Pravá (svislá) strana malého čtverce

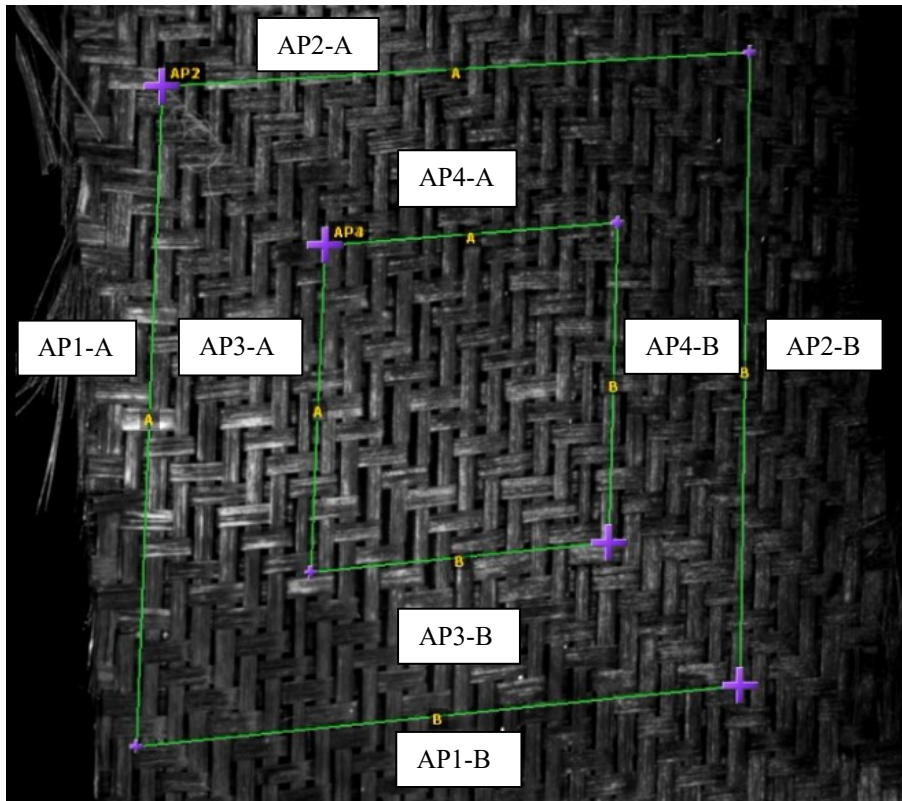


Obr. 71 Zvolené sekce

Po zvolení sekcí následovala samotná měření. Po uvedení stroje na trhací zkoušky do chodu se sledovalo chování tkaniny na počítači.

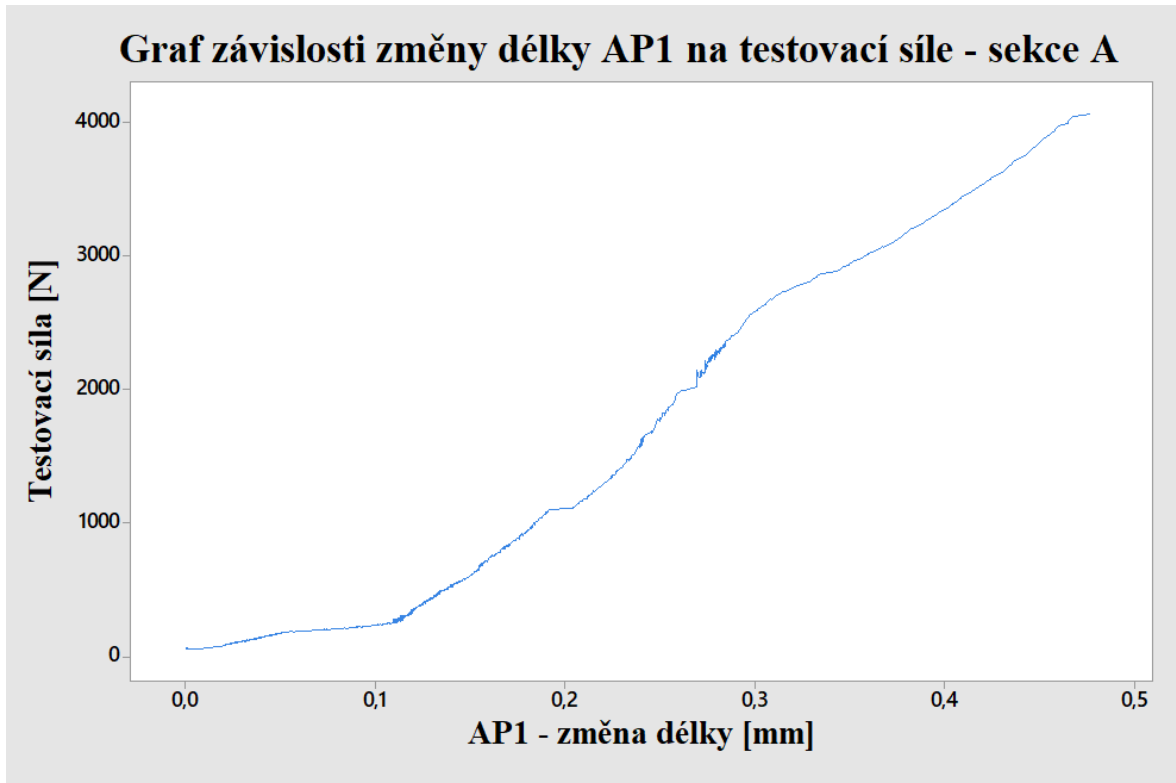
7.2.2 Vyhodnocení výsledků měření na DIC

Měření probíhalo přibližně 1 minutu, po kterou zatěžovací síla vzrostla od 0 N do 4500 N a během kterých bylo naměřeno přibližně 1226 hodnot. Hodnoty byly upraveny pomocí programu Minitab a z těchto výsledků byly zhotoveny grafy závislosti působící síly a změny délky/úhlu vláken do jejich přetržení. Na obrázku číslo 72 je znázorněna šablona na vzorku těsně před přetržením.

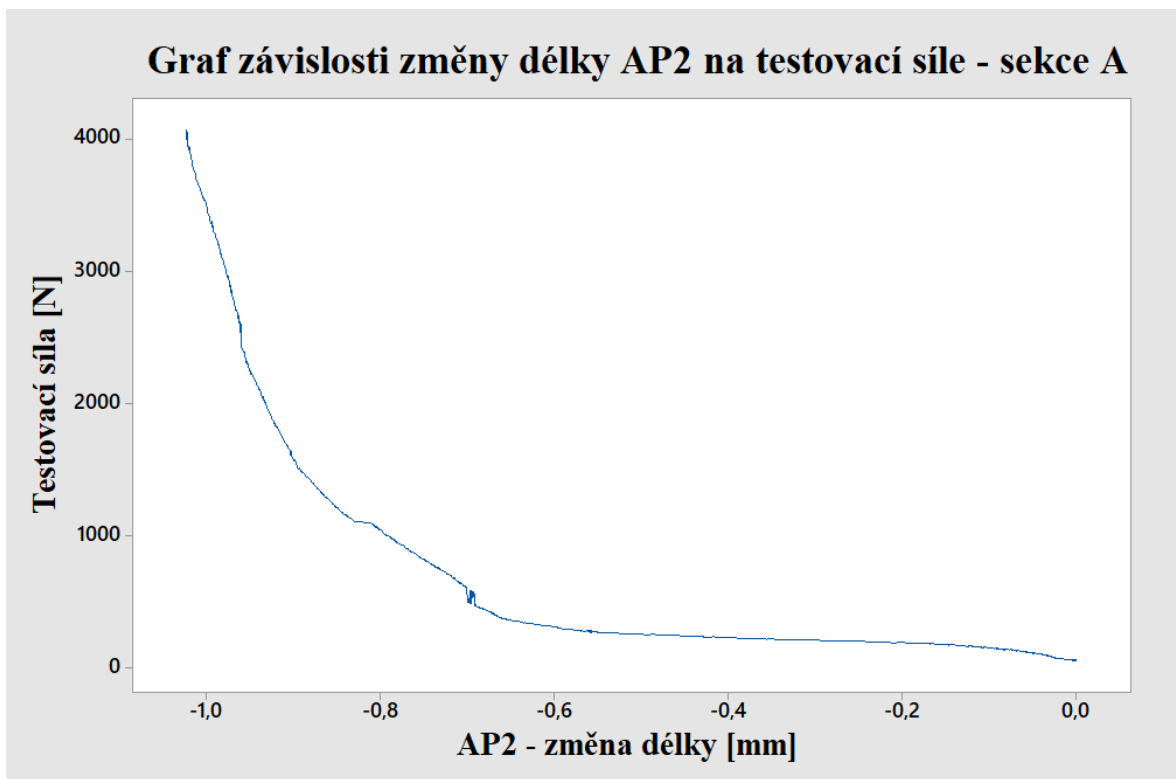


Obr. 72 Šablona těsně před přetrhnutím vláken

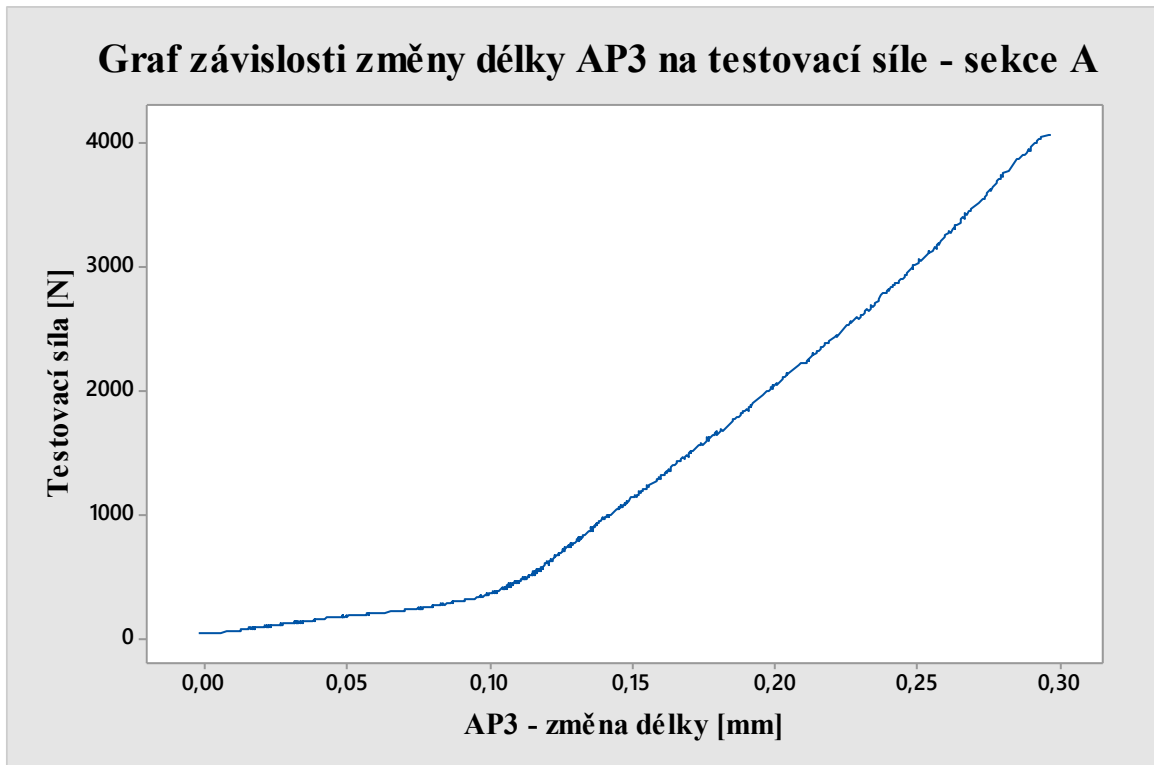
Z obrázku je patrné, že se všechny jednotlivé sekce posunuly ve směru působící síly a je zaznamenán jednoznačný posuv a mírné natočení vláken. Graficky jsou tyto veličiny znázorněny na grafech číslo 73–84.



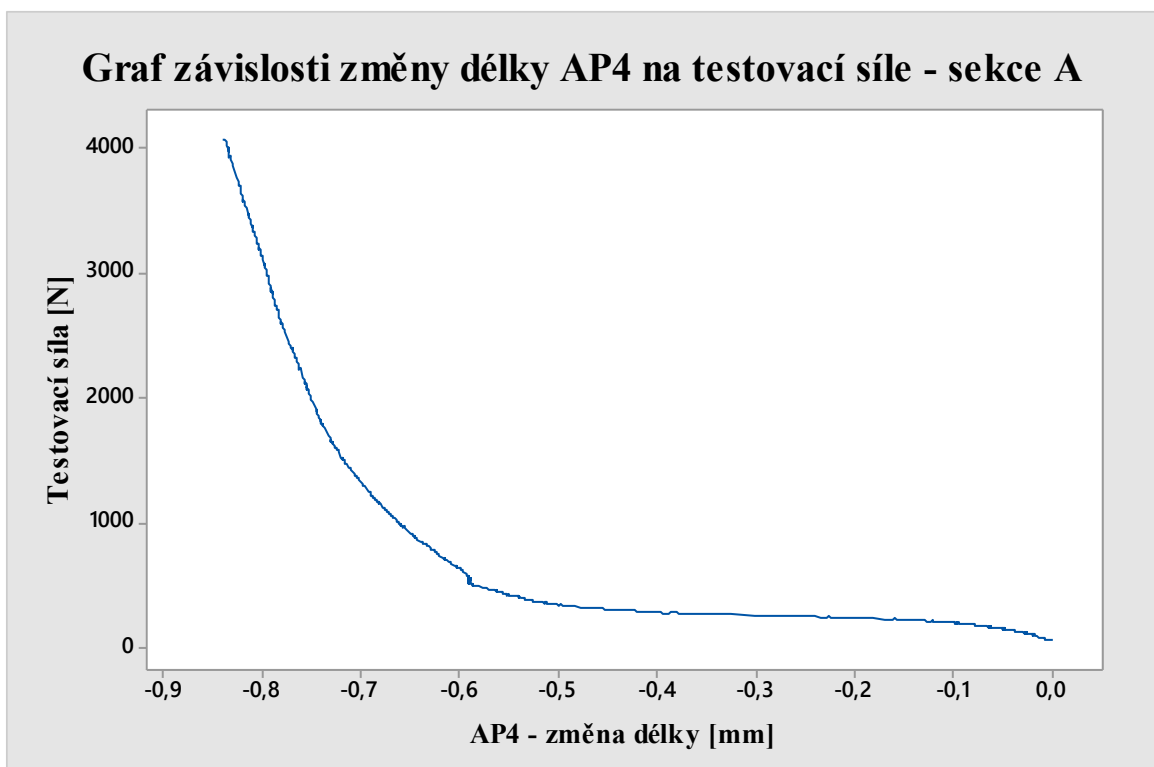
Obr. 73 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP1



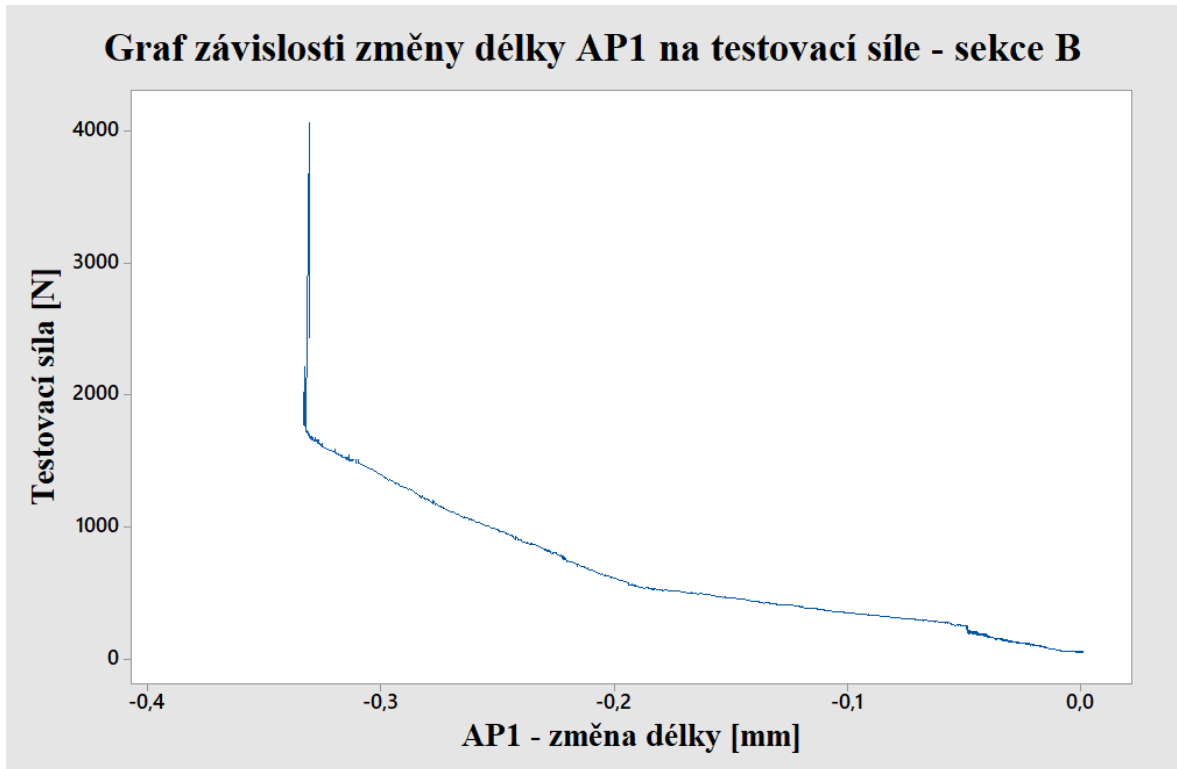
Obr. 74 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP2



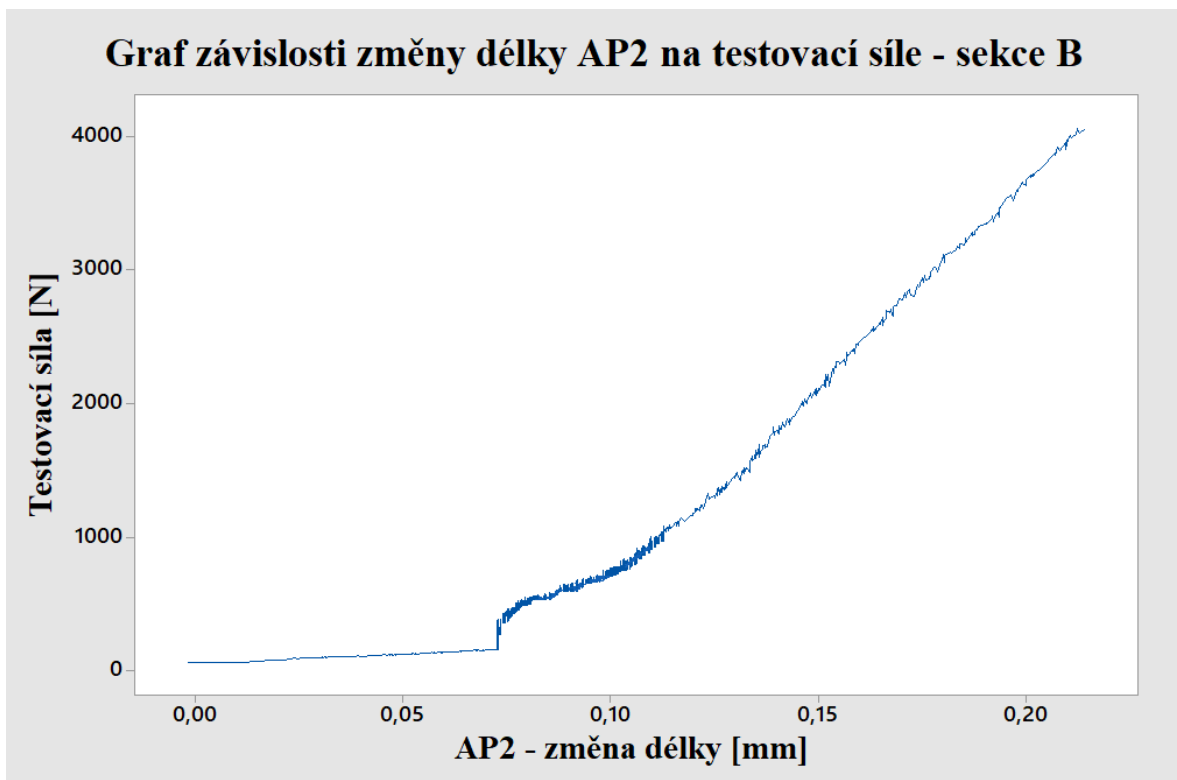
Obr. 75 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP3



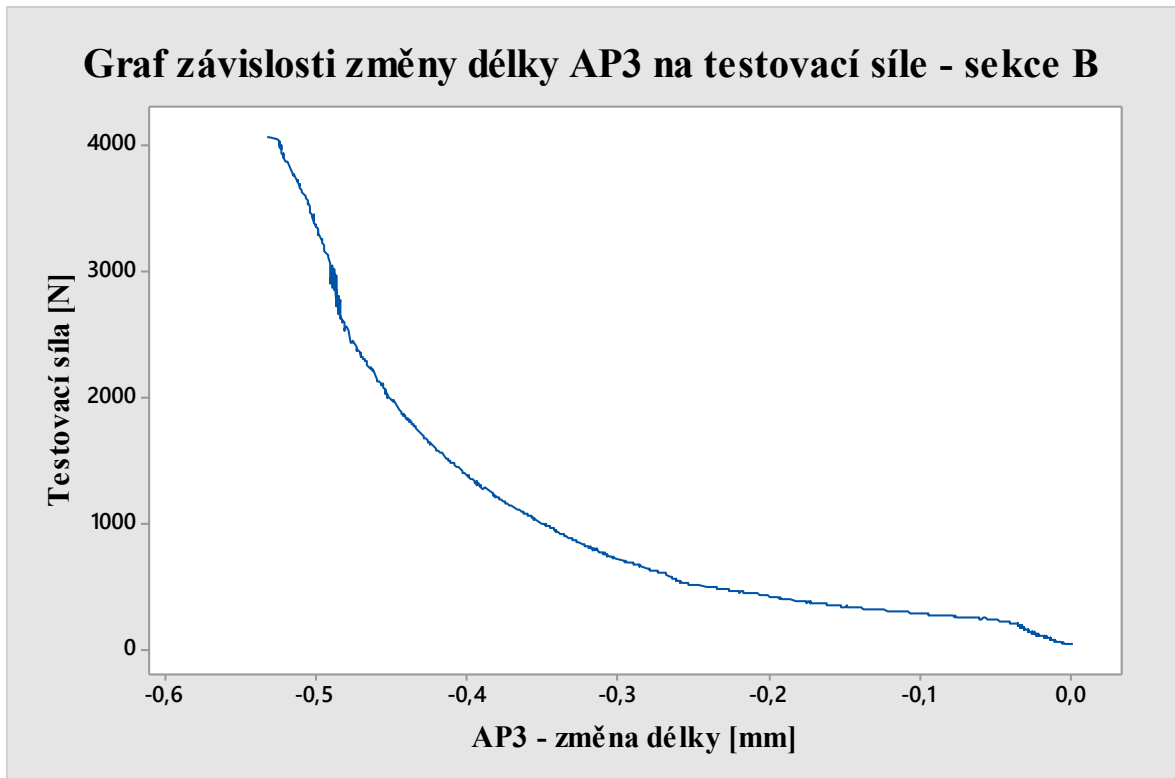
Obr. 76 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP4



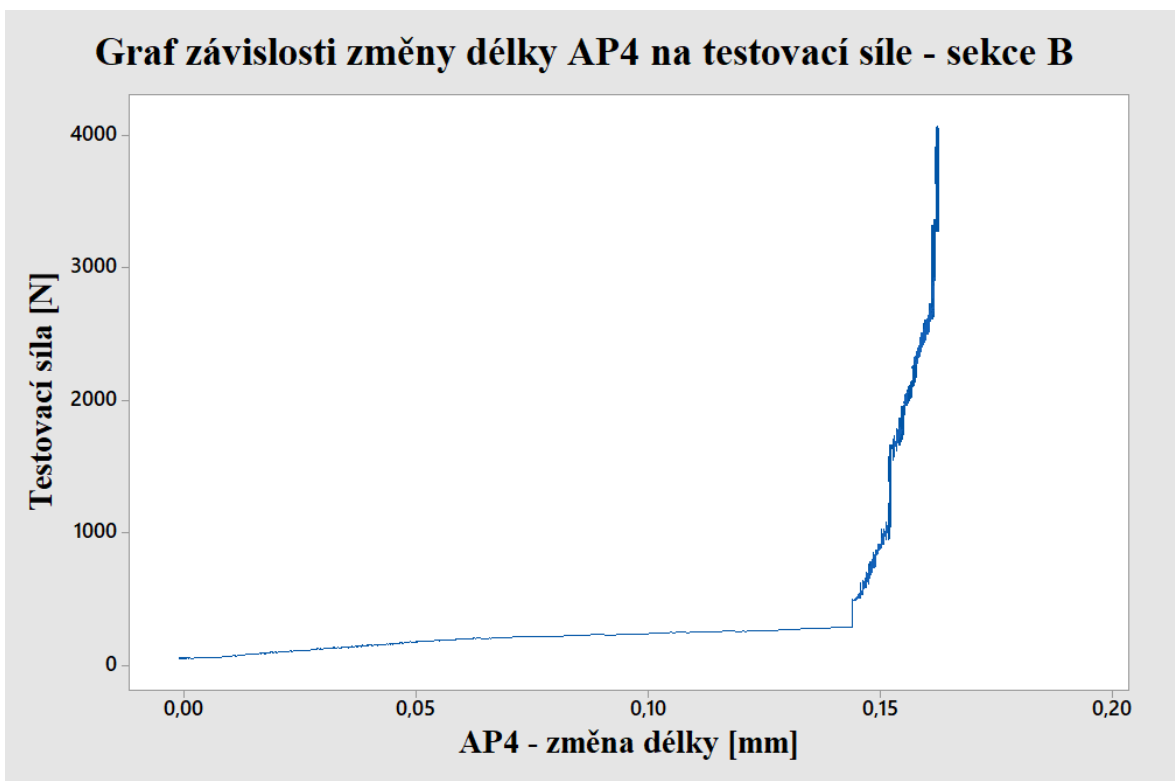
Obr. 77 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP1



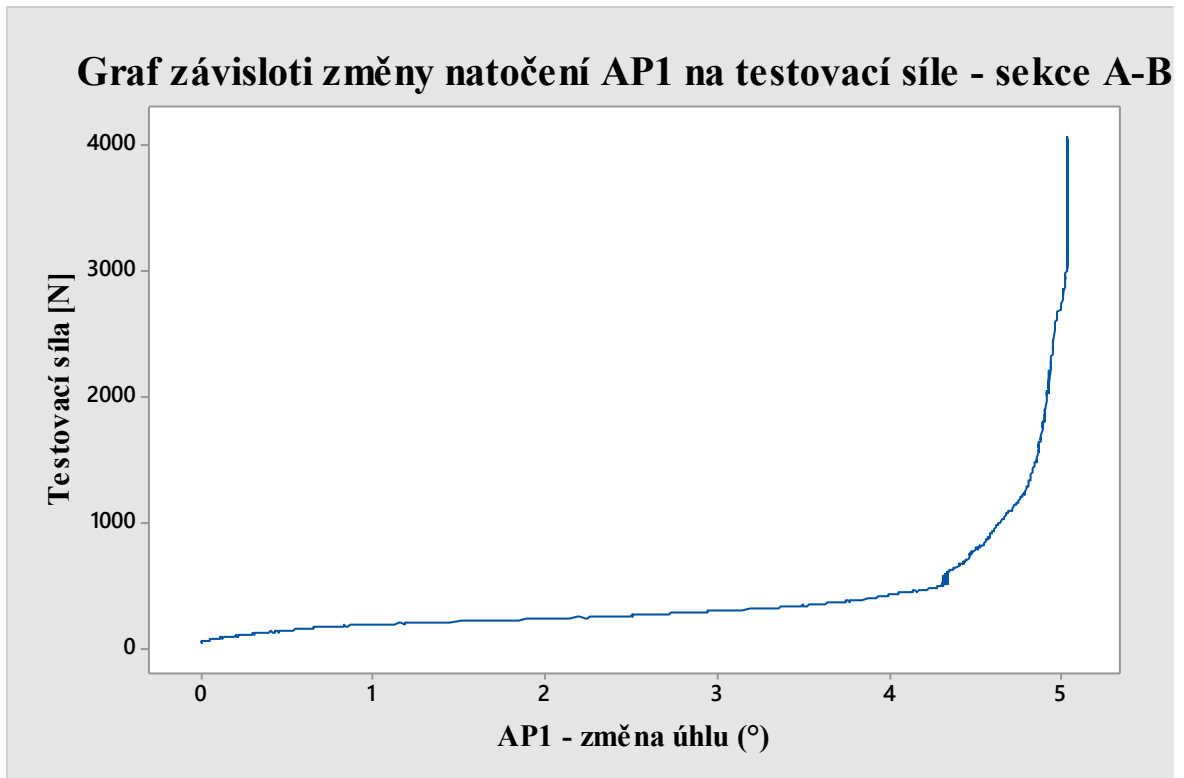
Obr. 78 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP2



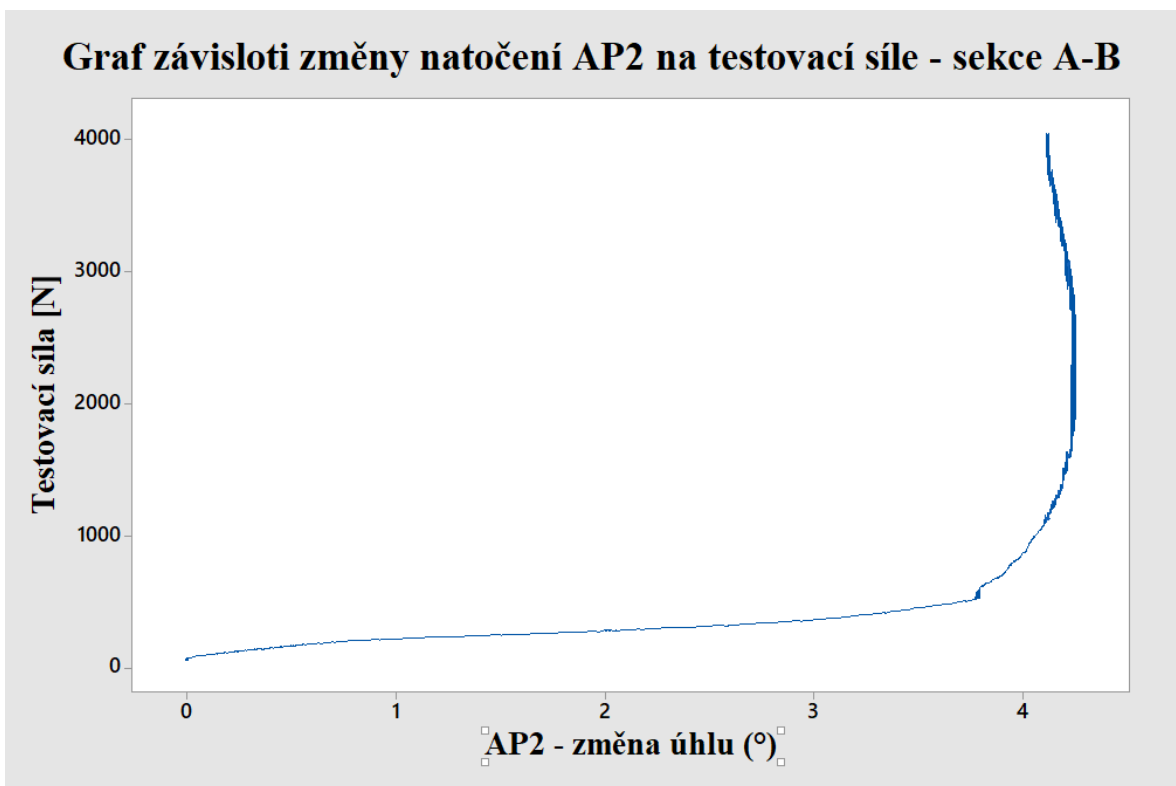
Obr. 79 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP3



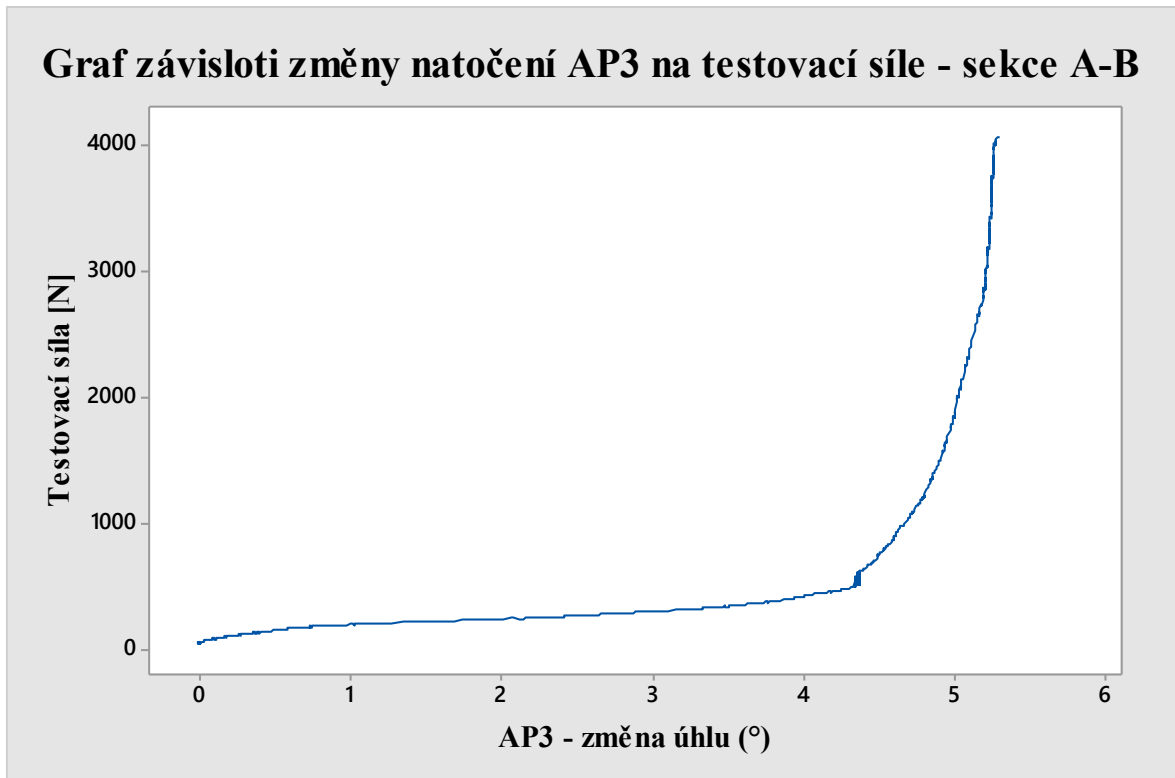
Obr. 80 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP4



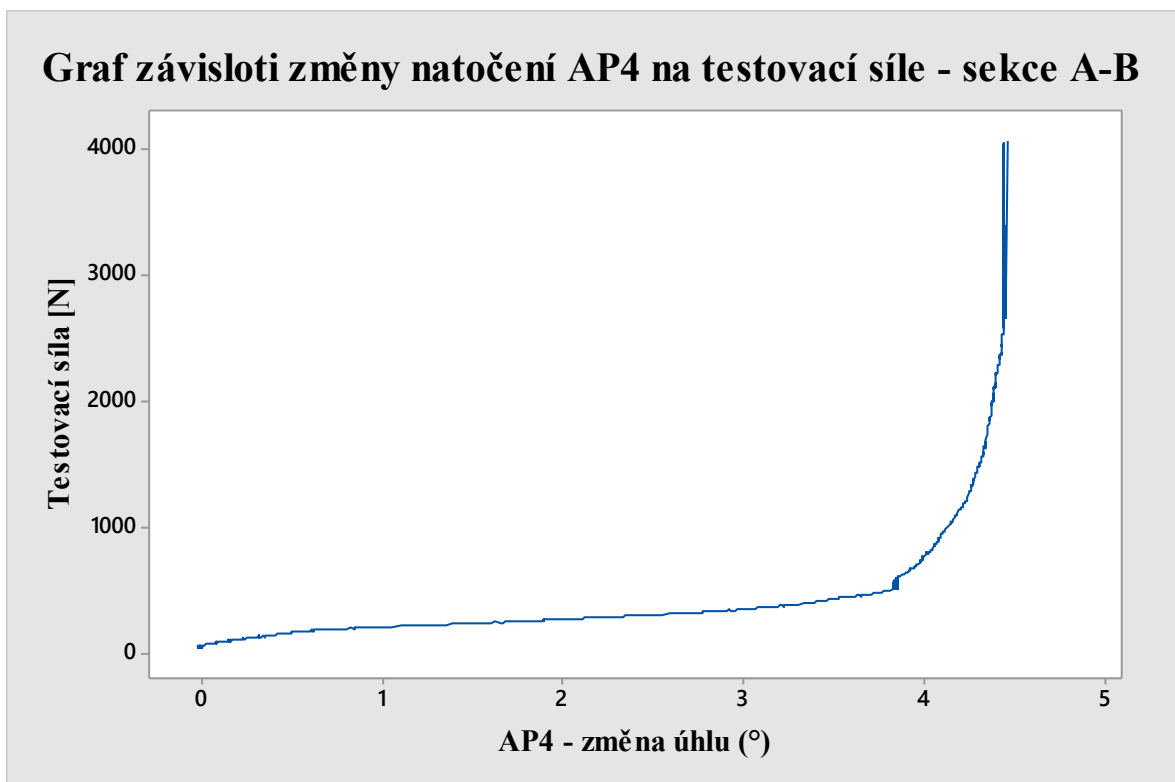
Obr. 81 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A-B – AP1



Obr. 82 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A-B – AP2



Obr. 83 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A–B – AP3



Obr. 84 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A–B – AP4

Z výše uvedených grafů a obrázku šablony lze vypočítat, že svislé sekce podmnožiny (AP1 – A, AP3 – A, AP2 – B a AP4 – B) se natahují ve směru působení síly, a proto vykazují mnohem větší prodloužení. Sekce (AP2 – A, AP4 – A, AP1 – B a AP3 – B), které jsou kolmé na směr silového působení vykazují posunutí vlákna ve směru síly minimální. Natočení vláken ve všech sekcích je téměř stejné, vykazuje to o homogenitě materiálu.

Shrnutí výsledků bylo zaneseno do následujících tabulek, které zobrazují velikost síly zatížení 4550 N a změny délky/natočení vláken v určitých sekcích v čase těsně před přetrhnutím.

Tabulka 9 – Změny délek sekce A

	Sekce A			
	AP1	AP2	AP3	AP4
Změna délky [mm]	0,4768	-1,0241	0,297	-0,8397

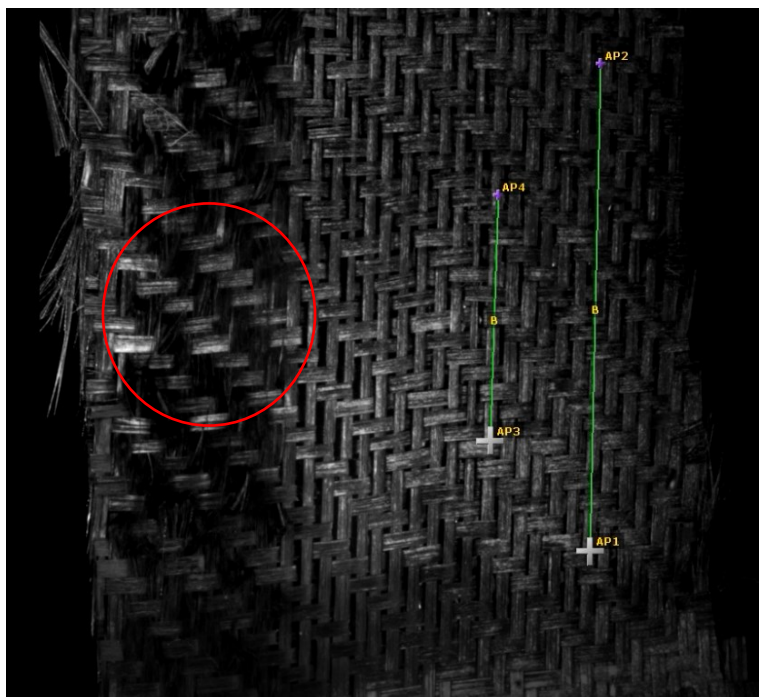
Tabulka 10 – Změny délek sekce B

	Sekce B			
	AP1	AP2	AP3	AP4
Změna délky [mm]	-0,3282	0,2124	-0,5322	0,1623

Tabulka 11 – Změny natočení v sekcích A–B

	Sekce A–B			
	AP1	AP2	AP3	AP4
Změna úhlu [°]	5,0362	4,1221	5,2916	4,4609

K přetrhnutí došlo bezprostředně po tom, co testovací síla přesáhla hranici 4550 N. Na obrázku číslo 85 lze vidět sekci vzorku, kde vlákna již neodrážela světlo a zčernaly. Tento jev je ukázkou přetrhnutí zkoušeného materiálu.



Obr. 85 Přetrhnutí svazku vláken

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prozkoumat tvarovatelnost a deformovatelnost prepregů a tkanin. Za pomoci programu Aniform Virtual Simulation bylo provedeno dvanáct typů simulací tváření prepregů, a to simulace změny tloušťky, zatížení vláken, hloubky průniku, přemístění materiálu a změny orientace vlákna v ose y. Byly testovány dva typy skelných prepregů (8H satén a 4H satén) a dva typy uhlíkových prepregů (5H satén a plátňová vazba). Simulace procesu tváření byla nejdříve provedena s jednou, následně s dvěmi a poté se čtyřmi vrstvami. Natočení bylo zvoleno u jedné vrstvy 0° , u dvou vrstev 0° a 90° a u čtyř vrstev 0° , 45° , -45° a 0° . Materiál byl dodán společností Toray Advanced Composites. Byly následně vyhodnoceny změny vlastností tloušťky, zatížení vláken, hloubky průniku, přemístění materiálu a změna směru vláken v ose y. V druhé části bylo provedeno měření prodloužení/zkrácení a natočení vláken zvolené multiaxiální tkaniny pomocí metody digitální korelace obrazu.

Simulací změny tloušťky při procesu tváření bylo zjištěno, že nejmenší změnu tloušťky vykazoval uhlíkový prepreg s plátňovou vazbou.

V případě simulace zatížení vláken došlo u všech typů prepregů k přibližně stejné velikosti zatížení. Za kritická místa jsou považována zaoblení po obvodu a výběžky po stranách výrobku.

Ze simulací vyplynulo, že hloubka průniku vrchní formy záleží na počtu vrstev prepregu. U skelných prepregů polotovar po procesu nedoléhal v zaobleních po obvodu. U uhlíkových prepregů docházelo ke stejnému jevu, stupeň nedoléhání je ale nižší. Optimalizací vnitřního zaoblení a zaoblení na vrchní části formy je možné snížit odpor materiálu proti síle, kterou působí právě vrchní část formy.

Ze zhotovených simulací celkového přemístění materiálu lze vyčíst, že nejvyšší stupeň byl zaznamenán na dně výrobku. V případě čtyř vrstev byl tento rozdíl největší. Nejvyšší stupeň přemístění byl u uhlíkových prepregů všech možných počtů vrstev.

Kritická místa v případě simulací změny směru vláken v ose y byla u vnějšího zaoblení výrobku a u výběžků po stranách. U jedné vrstvy nebyl rozdíl znatelný. V případě natočení vláken 45° , -45° a 90° bylo přemístění markantně větší a bylo rozmístěno po celé délce vnitřního zaoblení.

Pomocí simulací lze predikovat a identifikovat defekty ještě před samotným procesem tváření. Může být odhadnuta tvarovatelnost a deformovatelnosti výrobku, což vyústí k vhodné optimalizace procesu a volbě materiálu. Pomocí vyhotovení simulací je možné snížit celkovou zmetkovitost.

Z měření pomocí digitální korelace obrazu vyplynulo, že se vlákna ve směru natahovací síly natáhla až o 0,5 mm, zatímco u vláken kolmých na směr působení síly bylo zaznamenáno zkrácení až o 1 mm. Změna natočení vláken byla téměř stejná, v intervalu od 4° až do 5°.

Do budoucna by bylo vhodné provést podrobnější analýzu více typů prepregů s různými natočeními a větším počtem vrstev. Pomocí DIC by bylo možné naměřit mechanické vlastnosti více typů tkanin a vzájemně je porovnat.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály.: *Definice a rozdělení* [online]. Technologická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magis-tri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
- [2] VRBKA, Jan. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. In: . 2008, s. 94 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: file:///C:/Users/jasem/OneDrive/Plocha/Diplomka/Literatura/FSI-UMT-ucebni%20text-Mechanika%20kompozit%C5%AF-121217.pdf3.
- [3] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005 [cit. 2020-05-03]. ISBN 80-708-0568-4.
- [4] *Kompozitní materiály* [online]. In: . Praha: České vysoké učení technické, s. 53 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [5] VOLPE, Valentino a Sofia LANZILLO. Open Access Article Lightweight High-Performance Polymer Composite for Automotive Applications. *Polymers* [online]. Basel, Switzerland, 2019, 2019 [cit. 2020-05-05]. DOI: 10.3390. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/2/326/htm>
- [6] OLIVARES-RAMIREZ, J.M. a A. DECTOR. Composite Materials Based on Henequen Fiber as a Thermal Barrier in the Automotive Sector. In: *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2019, s. 10 [cit. 2020-05-05]. DOI: 10.1155/2019/9421289. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2019/9421289/7>.
- [7] *Hendrickson* [online]. USA: Hendrickson, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://eu.hendrickson-intl.com/Leaf-Spring/COMPOSITE-SPRINGS>
- [8] *Prefa kompozity* [online]. Brno: Prefa kompozity, 2018 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/produkty/zakladni-vyrobky/kompozitni-poklopy-a-zakryti/>
- [9] VRBKA, Jan. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. In: . 2008, s. 94 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: file:///C:/Users/jasem/OneDrive/Plocha/Diplomka/Literatura/FSI-UMT-ucebni%20text-Mechanika%20kompozit%C5%AF-121217.pdf3.

- [10] *Kompozitní materiály* [online]. Plzeň, ČR: Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [11] CHAWLA, K.K. *Glass Fibers* [online]. Elsevier B.V., 2015, 2016 [cit. 2020-05-06]. ISSN 978-0-12-803581-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/glass-fiber>
- [12] Glass fibre sizing: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. Elsevier B.V, 2020, December 2019, (127) [cit. 2020-05-06]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619>. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X19303689?via%3Dihub>
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-808-6960-296.
- [14] *Aramid Fiber: The Versatile Polymer Reinforcing Fiber* [online]. California: Dotdash, 2018 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/aramid-fibers-definition-820379>
- [15] *Yellow Plain ARAMID FIBER FABRIC* [online]. IndiaMART InterMESH, 1996 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/aramid-fiber-fabric-21447990797.html>
- [16] *ARAMID FIBERS* [online]. CROW, 2015 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Fibers/Aramid.html>
- [17] *UHLÍKOVÉ VLÁKNO* [online]. Velká nad Veličkou, Česká republika: Kordcarbon, 1950 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- [18] *Carbon Fiber* [online]. Advameg, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html>
- [19] *How Is Carbon Fiber Made?* [online]. Dotdash, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/how-is-carbon-fiber-made-820391>
- [20] *WHAT IS CARBON FIBER?* [online]. White Salmon, WA: Innovative Composite Engineering, 2015 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.innovativecomposite.com/what-is-carbon-fiber/>

- [21] *Banggood* [online]. Banggood, 2006 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.banggood.com/cs/3K-200gsm-Carbon-Fiber-Cloth-Setting-Fabric-Car-Industrial-Material-Carbon-Fiber-Board-36x32-Inch-p-1323597.html?cur_warehouse=CN
- [22] *How is Carbon Fiber Made?* [online]. Bridgeton, MO: ZOLTEK, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>
- [23] *Reaktoplastové polymerní matrice* [online]. SlidePlayer.cz, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3099074/>
- [24] *THERMOSET POLYMER MATRIX COMPOSITES* [online]. In: . BME Polimer-technika Tanszék, 2014, s. 12 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://pt.bme.hu/~nagy/mateng/silab/comp.pdf>
- [25] *Thermoset Composites* [online]. Endeavor Business Media, 2002 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/materials/article/21812683/thermoset-composites>
- [26] *3W Distributing LLC* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.3wdistributing.com/product/front-spoiler/>
- [27] *JL-JX EDITION AERO FOG LIGHT COVERS IN CARBON FIBER* [online]. Venomrex, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://venomrex.com/products/jeep-carbon-fiber-fog-light-covers>
- [28] SHEN, Xiao-Jun a Chen-Yang DANG. The reinforcing effect of oriented graphene on the interlaminar shear strength of carbon fabric/epoxy composites. *Materials & Design* [online]. 2020, 2020, (185) [cit. 2020-05-06]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108257>. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519306951?via%3Dihub>
- [29] DIXIT, D. Lightweight composite materials processing. BHATNAGAR, Ashok. *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications* [online]. 2. Elsevier: Woodhead Publishing, 2016, 2016, s. 10 [cit. 2020-05-06]. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03657-X>. ISBN 978-0-08-100406-7. ISSN 978-0-08-100406-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/phenolic-resins>

- [30] *Thermoplastic Resins Composition and Selection* [online]. Paris: SpecialChem, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/resin-selection-for-thermoplastic-composites>
- [31] *Thermoplastic vs. Thermoset Resins* [online]. California: Dotdash, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>
- [32] BIRON, Michel. Long Fiber Reinforced Plastics: LFRT and BMC. BIRON, Michel. *Thermosets and Composites* [online]. 2. Elsevier, 2014 [cit. 2020-05-06]. ISBN 978-1-4557-3124-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/long-fibre-reinforced-thermoplastic>
- [33] *Automated Dynamics* [online]. USA: Automated Dynamics, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.automateddynamics.com/article/thermoplastic-composite-basics/types-of-thermoplastic-composites/short-fiber-reinforcement>
- [34] *PlastiComp* [online]. Winona, MN: PlastiComp, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.plasticomp.com/long-fiber-benefits/>
- [35] *Fibreglast* [online]. Brookville, OH: Fibre Glast Developments, 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center
- [36] *AZO Materials* [online]. Manchester UK: AZoNetwork UK, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353>
- [37] WARDLE, Marilyn. Polymer Matrix Composites. *Comprehensive Composite Materials* [online]. Elsevier: Pergamon, 2000 [cit. 2020-05-06]. ISBN 978-0-08-042993-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/prepreg>
- [38] *Compositelab* [online]. USA: American Composites Manufacturers Association, 2016 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/>
- [39] *Composites Manufacturing* [online]. Bombay: Indian Institute of Technology Bombay [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/courses/ME338/comp.pdf>

- [40] Slideshare [internet]. San Francisco, CA: LinkedIn Corporation; c2014. Manufacture of Composites; 2016 March 3 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/gauravkumarkarnawat/manufacture-of-composites>
- [41] *An introduction to vacuum bag moulding* [online]. Elsevier, 2012 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.materialstoday.com/composite-processing/features/an-introduction-to-vacuum-bag-moulding/>
- [42] *NetComposites* [online]. Chesterfield: NetComposites, 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/vacuum-bagging/>
- [43] ZOLLER, Alexander a Pierre ESCALÉ. *Pultrusion of Bendable Continuous Fibers Reinforced Composites With Reactive Acrylic Thermoplastic ELIUM® Resin* [online]. 2019, 2019, (6) [cit. 2020-05-06]. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00290>. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00290/full>
- [44] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. 1. Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2016 [cit. 2020-05-06]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [45] *Fibreglast* [online]. Brookville, OH: FIBRE GLAST DEVELOPMENTS, 2010 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center
- [46] *CSIR-NAL* [online]. Bangalore, India: CSIR - National Aerospace Laboratories, 2018 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.nal.res.in/en/techniques/vacuum-enhanced-resin-infusion-technology>
- [47] *BFG* [online]. Kingdom of Bahrain: BFG International, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://www.bfginternational.com/what-we-do/rtm>
- [48] MEHDIKHANI, Mahoor. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials* [online]. 2019, 2019, **12**(53), 91 [cit. 2020-05-05]. DOI: 10.1177/0021998318772152. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0021998318772152>

- [49] Slideshare [internet]. San Francisco, CA: LinkedIn Corporation; c2014. Autoclave molding; 2018 May 29 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ManojK55/autoclave-molding>
- [50] OUARHIM, Wafa. Mechanical performance of natural fibers–based thermosetting composites. JAWAID, Mohammad. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* [online]. Elsevier: Woodhead Publishing, 2019 [cit. 2020-05-05]. ISBN 978-0-08-102292-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/autoclave>
- [51] HALLEY, P.J. Rheology of thermosets: the use of chemorheology to characterise and model thermoset flow behaviour. HALLEY, P.J. *Thermosets* [online]. Woodhead Publishing, 2012 [cit. 2020-05-05]. ISBN 978-0-85709-086-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/autoclave-molding>
- [52] MOBASHER, B. Textile fiber composites: Testing and mechanical behavior. TRIANTAFILLOU, Thanasis. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering* [online]. Elsevier: Woodhead Publishing, 2016 [cit. 2020-05-05]. ISBN 978-1-78242-446-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/digital-image-correlation>
- [53] YONEYAMA, Satoru a Go MURASAWA. EXPERIMENTAL MECHANICS. *Encyclopedia of Life Support Systems: Digital Image Correlation* [online]. Paris, 2019, s. 10 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-194-04.pdf>
- [54] *Aniform* [online]. Enschede: Aniform Virtual Forming, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://aniform.com/features>
- [55] *Introducing AniForm* [online]. Enschede: AniForm Engineering B.V., 2018 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://aniform.com/>
- [56] *PAM-RTM - Composites Molding Simulation Software* [online]. Paris, FR: ESI Group, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/composites/pam-composites/pam-rtm-composites-molding-simulation-software>
- [57] *PAM-FORM – Composites Forming Simulation Software* [online]. Paris, FR: ESI Group, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/software->

[solutions/virtual-manufacturing/composites/pam-composites/pam-form-composites-forming-simulation-software](#)

- [58] *Hexon Exstream engineering* [online]. Luxembourg: Hexagon AB, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.e-xstream.com/products/digimat/about-digimat>
- [59] *Hexon Exstream engineering* [online]. Luxembourg: Hexagon AB, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://d2f709itdech1g.cloudfront.net/cdn/farfuture/Juq5VUV3VESVZILYpVryCZmAdcjItn7uUzGFt9WWgRQ/mtime:1553075971/sites/default/files/general_software_brochure_2019.0.pdf
- [60] AMJAD, Khurram. Computationally efficient method of tracking fibres in composite materials using digital image correlation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2020, 15 [cit. 2020-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105683>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X19304324#!>
- [61] LOMOV, Stepan. Full-field strain measurements in textile deformability studies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2007, s. 15 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X07001820>
- [62] BOISSE, P. a N. HAMILA. *Modelling the development of defects during composite reinforcements and prepreg forming* [online]. 2016 [cit. 2020-05-05]. DOI: 10.1098/rsta.2015.0269. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4901244/>
- [63] P.-H. BELNOUE, Jonathan a Stephen R. R. HALLETT. A rapid multi-scale design tool for the prediction of wrinkle defect formation in composite components. *Materials & Design* [online]. 2020, s. 13 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: [https://www-sciencedirect-com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/S0264127519308263?via%3Dihub](https://www.sciencedirect-com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/S0264127519308263?via%3Dihub)
- [64] *Survivability of Affordable Aircraft Composite Structures. Volume 1: Overview and Ballistic Impact Testing of Affordable Woven Carbon/Epoxy Composites* [online]. Tuskegee University, 2003 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/312222222>

[chgate.net/publication/235072263_Survivability_of_Affordable_Aircraft_Composite_Structures_Volume_1_Overview_and_Ballistic_Impact_Testing_of_Affordable_Woven_CarbonEpoxy_Composites](https://www.researchgate.net/publication/235072263_Survivability_of_Affordable_Aircraft_Composite_Structures_Volume_1_Overview_and_Ballistic_Impact_Testing_of_Affordable_Woven_CarbonEpoxy_Composites)

- [65] *Influence of warp interlock parameters on the ballistic behavior of a structure* [online]. Destech Publications, 2010 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/259463582_Influence_of_warp_interlock_parameters_on_the_ballistic_behavior_of_a_structure
- [66] *What is Helius Composite* [online]. Autodesk, 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/helius-composite/overview?plc=ACMPDS&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- [67] *Powerful tools for composite nonlinear analysis* [online]. Autodesk, 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://www.3dtech.com.my/downloads/autodesk-simulation/Helius%20PFA%20Brochure.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

8H – 8 Harness

A – Tažnost [%]

Al₂O₃ – Keramická matrice

AP1 – A – Levá (svislá) strana velkého čtverce

AP1 – B – Spodní (vodorovná) strana velkého čtverce

AP2 – A – Horní (vodorovná) strana velkého čtverce

AP2 – B – Pravá (svislá) strana velkého čtverce

AP3 – A – Levá (svislá) strana malého čtverce

AP3 – B – Spodní (vodorovná) strana malého čtverce

AP4 – A – Horní (vodorovná) strana malého čtverce

AP4 – B – Pravá (svislá) strana malého čtverce

CF – Carbon fiber (uhlíkové vlákno)

DIC – Digital image correlation (digitální korelace obrazu)

E – Youngův model pružnosti v tahu [MPa]

Hm. % - Hmotnostní procento [%]

Nkk – Normalizovaná křížová korelace

PA12 – Nylon 12

PA6 – Nylon 6

PBT – Polybutylen tereftalát

PEEK – polyéteréterketon

PEI – Polyethylenimin

PEKK – Polyetherketoneketon

PP – Polypropylen

PPS – Polyfenylensulfid

R_m – Mez pevnosti v tahu [MPa]

SiC – Keramické vlákno

t – čas [s]

T_g – Teplota skelného přechodu [°C]

T_m – Teplota tání [°C]

η – Viskozita [Pa · s]

ρ – Hustota [kg.m⁻³]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady výrobků z kompozitu [7], [8]	8
Obr. 2 Synergické chování složek kompozitu [3].....	10
Obr. 3 Schématický diagram struktury skla [11]	11
Obr. 4 a) Souvislá skleněná vlákna b) nasekaná skleněná vlákna [13].....	12
Obr. 5 Struktura aromatického polyamidu [13].....	12
Obr. 6 Aramidová vlákna [15].....	13
Obr. 7 Uhlíkové vlákno [21].....	14
Obr. 8 Rozdělení uhlíkových vláken (ve stav bezprostředně po výrobě) HT – standartní, IM – středně-, HM – vysoko, UHM – ultravysokomodulová [13].	15
Obr. 9 Výrobky z uhlíkových vláken v automobilovém průmyslu [26], [27].....	16
Obr. 10 Viskozita termosetů a termoplastů při prosycování vyztužujících vláken [13]	17
Obr. 11 Exotermní vytvrzování nenasyčeného polyesteru – G – želatinace, H – vytvrzování [24].....	18
Obr. 12 Chemická struktura fenolů. [29].....	19
Obr. 13 Mikrosnímek krátkých vyztužujících vláken [33].....	21
Obr. 14 Vliv délky vlákna na kvalitě vlastností [34]	22
Obr. 15 Páska [33].....	22
Obr. 16 Prepreg [35].....	23
Obr. 17 Postup technologie ručního kladení – 1) Nanášení antiadhezního činidla, 2) Tenká gelová vrstva, 3) Aplikace vrstev pryskyřice a výztuže, 4) Vytvrzení, 5) Vyjmutí výrobku [39].....	25
Obr. 18 Schéma ručního nastřikování [38].....	25
Obr. 19 Schéma vakuového lisování ve vacích [42].....	26
Obr. 20 Schéma vakuové infuze [46].....	27
Obr. 21 Schéma reakčního vstřikování [47]	28
Obr. 22 Schéma technologie pultruze [39]	29
Obr. 23 Autokláv [49]	30
Obr. 24 Schéma výroby součástí v autoklávu [51]	30
Obr. 25 Vznik vrásnění [63]	32
Obr. 26 Vrásnění při různých hodnotách ohybové tuhosti [62].....	32
Obr. 27 Příklad „přezky“ [62].....	33

Obr. 28 Prokluz mezi přízí [62]	33
Obr. 29 Vzor segmentace vzorků – a) Před segmentací, b) Po segmentaci [60].....	34
Obr. 30 Postup DIC technologie [60].....	35
Obr. 31 DIC – a) Měřené místo (s podmnožinou), (b) Schéma podmnožiny referenčního snímku a deformovaného snímku [52]	36
Obr. 32 Rozestavení zařízení pro měření pomocí digitální korelace obrazu [53]	36
Obr. 33 Příklady výstupního grafu 3D digitální korelace obrazu – směr vláken [61]	37
Obr. 34 Proces tváření laminátu [54]	38
Obr. 35 Graf zastoupení Programu Aniform v průmyslu [55]	39
Obr. 36 Příklad defektu [55].....	39
Obr. 37 Ukázka šroubového spojení	40
Obr. 38 Modely pro výpočet – a) Stability sendvičové struktury, b) Trubky, c) Krutu, d) Vibrací.....	40
Obr. 39 Simulace poškození [67].....	41
Obr. 40 Příklad simulace v programu PAM-COMPOSITE	43
Obr. 41 Model formy.....	47
Obr. 42 Reálná součást a její modifikovaný model	47
Obr. 43 Základní rozměry formy krytu chladicího systému.....	48
Obr. 44 Příklady vazeb tkanin – a) 8H (harness) saténová vazba, b) Plátňová vazba [64], [65].....	48
Obr. 45 Simulace změny tloušťky jedné vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	51
Obr. 46 Simulace změny tloušťky dvou vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	52
Obr. 47 Simulace změny tloušťky čtyř vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	53
Obr. 48 Změny tloušťky různých typů prepregů – 1 vrstva	54
Obr. 49 Změny tloušťky různých typů prepregů – 2 vrstvy	55
Obr. 50 Změny tloušťky různých typů prepregů – 4 vrstvy	55

Obr. 51 Simulace zatížení vláken 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén.....	56
Obr. 52 Simulace zatížení vláken 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén.....	57
Obr. 53 Simulace zatížení vláken 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén.....	58
Obr. 54 Kritická místa výskytu nejvyššího napětí vláken	59
Obr. 55 Simulace hloubky průniku 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	60
Obr. 56 Simulace hloubky průniku 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	61
Obr. 57 Simulace hloubky průniku 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	62
Obr. 58 Kritická místa – a) nejmenší penetrace, b) Největší penetrace	63
Obr. 59 Simulace přemístění materiálu 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	64
Obr. 60 Simulace přemístění materiálu 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	65
Obr. 61 Simulace přemístění materiálu 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén	66
Obr. 62 Simulace smykové rychlosti skleněného prepregu ze dvou vrstev	67
Obr. 63 Simulace změny směru vláken v ose y u 1 vrstvy – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén.....	68

Obr. 64 Simulace změny směru vláken v ose y u 2 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén.....	69
Obr. 65 Simulace změny směru vláken v ose y u 4 vrstev – a) Skleněný prepreg 4H satén, b) Skleněný prepreg 8H satén c) Uhlíkový prepreg plátňová vazba, d) Uhlíkový prepreg 5H satén.....	70
Obr. 66 Základní rozměry vzorku – a) Pásek bez příložek, b) S příložkami	72
Obr. 67 Ukázka vzorku multiaxiální tkaniny.....	72
Obr. 68 Vyrobené vzorky	73
Obr. 69 Kamerový systém na měření DIC	74
Obr. 70 Zvolená referenční šablona	74
Obr. 71 Zvolené sekce.....	75
Obr. 72 Šablona těsně před přetrhnutím vláken.....	76
Obr. 73 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP1.....	77
Obr. 74 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP2.....	77
Obr. 75 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP3.....	78
Obr. 76 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce A – AP4.....	78
Obr. 77 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP1.....	79
Obr. 78 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP2.....	79
Obr. 79 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP3.....	80
Obr. 80 Graf závislosti testovací síly a změny délky sekce B – AP4.....	80
Obr. 81 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A–B – AP1.....	81
Obr. 82 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A–B – AP2.....	81
Obr. 83 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A–B – AP3.....	82
Obr. 84 Graf závislosti testovací síly a změny úhlu sekce A–B – AP4.....	82
Obr. 85 Přetrhnutí svazku vláken.....	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Mechanické a fyzikální vlastnosti aramidových vláken [13]	13
Tabulka 2 – Rozdělení uhlíkových vláken podle struktury [13]	15
Tabulka 3 – Termoplasty využívané v kompozitech [30]	20
Tabulka 4 – Vybrané vlastnosti EC6 skleněného tkaného prepregu (8h satén)	49
Tabulka 5 – Vybrané vlastnosti FT300B uhlíkového tkaného prepregu (5h satén)	49
Tabulka 6 – Vybrané vlastnosti FT300B uhlíkového tkaného prepregu (plátnová vazba)	49
Tabulka 7 – Vybrané vlastnosti EC6 skleněného tkaného prepregu (4h satén)	49
Tabulka 8 – Vlastnosti polyetherimidové (PEI) matrice	50
Tabulka 9 – Změny délek sekce A	83
Tabulka 10 – Změny délek sekce B	83
Tabulka 11 – Změny natočení v sekcích A–B	83

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Ilustrační výkres modelu krytu na chladicí systém automobilu

PŘÍLOHA P I:

Ilustrační výkres prototypové formy krytu na chladicí systém automobilu

