

SIMULATION OF RESIN FLOW IN VARTM TECHNOLOGY

POPIS PROUDĚNÍ PLNIVA PŘI VÝROBĚ KOMPOZITŮ TECHNOLOGIÍ VARTM V PODDAJNÉ FORMĚ

Josef ŽÁK¹⁾, František MARTAUS²⁾

Abstrakt

Technology VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) is just a modification of RTM technology, used to make up the composite pieces. Unlike of the „classic“ RTM technology the filling of the mould is assured by the application of vacuum in the interior of the mould. This difference of pressures induces deformation of the flexible mould and thus the fibres are compacted in the mould. The present work describes a simulation of VARTM process during the fabrication of aircraft propeller blades in Výzkumný a zkušební letecký ústav in Praha.

Úvod

Při technologii RTM (Resin Transfer Moulding) probíhá výrobní proces v několika krocích. Základním charakteristickým znakem této technologie je plnění výztuže, vložené do formy, matricí (pryskyřicí) v nevytvrzeném stavu. Na tomto procesu závisí jak kvalita konečného produktu, tak i parametry výroby (např. ekonomické hledisko nebo ekologické požadavky).

Prvním krokem je příprava tzv. předlisku. Tkaná (případně i netkaná) výztuž je vystřižena do požadovaného tvaru. Jednotlivé nástrihy jsou následně navrstveny v požadovaném sledu.

Druhý krok spočívá ve vytvarování celku do tvaru co nejbližšímu tvaru konečné součástky. Pro tuto operaci je třeba ve většině případů používat tzv. „spojovacích prostředků“ (angl. binders); jejich úlohou je udržet předlisk v požadovaném tvaru a zabránit vzájemnému posunutí jednotlivých vrstev. Nejčastěji se používají práškové směsi, vláknité a tekuté spojovací prostředky. Tyto směsi jsou běžně součástí výztuží, určených speciálně pro RTM. Vytvarování předlisku pak probíhá buď ve speciální formě, která může být i vyhřívaná (mnohé spojovací prostředky se působením tepla natavují a po vychladnutí opět tuhnou) nebo i ve formě, určené pro vlastní vstřikování pryskyřice.

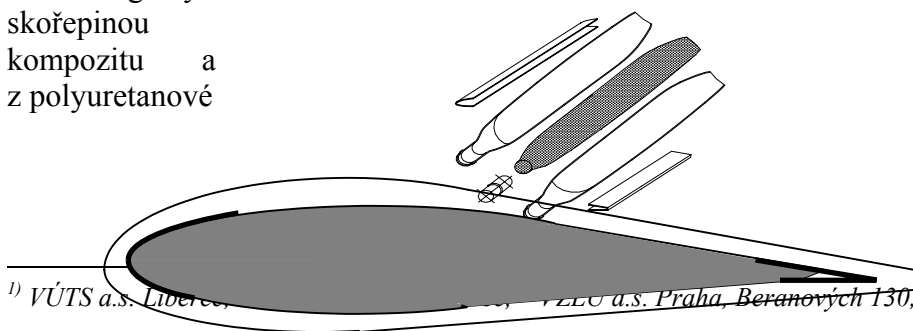
Třetí fází je vložení předlisku do formy a vstřikování pryskyřice. Právě tento proces byl hlavním předmětem našeho výzkumu.

V průběhu čtvrté fáze dochází k vytvrzení pryskyřice; to může probíhat za různých podmínek, podle požadavků na kvalitu hotové součástky.

Skladba vrtulového listu

Technologicky
skořepinou
kompozitu a
z polyuretanové

se jedná o díl, tvořený
z laminovaného
jádreem, vypěněným
pěny:



¹⁾ VÚTS a.s. Liberec, ²⁾ VZLÚ a.s. Praha, Beranových 130, 199 05 Praha 9

Základní matematický popis procesu

Při popisu proudění pryskyřice při plnění formy se obvykle vychází z Darcyho zákona:

$$\vec{v} = -\frac{1}{\mu} \cdot |K| \cdot \text{grad } p$$

Protože pro tlaky, při nichž probíhá plnění forem, lze zanedbat změnu objemu pryskyřice, je možno psát zákon o zachování hmoty v proudovém poli:

$$\nabla \cdot \left(\frac{|K|}{\mu} \cdot \nabla p \right) = 0$$

Vzhledem k charakteru vrtulových listů, vyráběných metodou RTM jsme se omezili na jednorozměrné případy.

Vlastní řešení této soustavy bylo provedeno pomocí metody konečných prvků. Matice „tuhosti“ jednorozměrného prvku má pak podobu:

$$k_e = \begin{vmatrix} \int_{l_e} \frac{K(p(x)) \cdot S(p(x))}{\mu} \cdot dx & - \int_{l_e} \frac{K(p(x)) \cdot S(p(x))}{\mu} \cdot dx \\ - \int_{l_e} \frac{K(p(x)) \cdot S(p(x))}{\mu} \cdot dx & \int_{l_e} \frac{K(p(x)) \cdot S(p(x))}{\mu} \cdot dx \end{vmatrix}$$

Hodnoty **K** a **S** jsou v daném okamžiku místně proměnné, hodnota dynamické viskozity závisí v našem zjednodušeném modelu pouze na čase a teplotě.

Vlastní hodnoty **K(p)** a **S(p)** jsou vyjádřeny jako sumy:

$$S(p(x)) = S(p(x))_{45} + S(p(x))_0 + S(p(x))_{pr}$$
$$K(p(x)) = K(p(x))_{45} \cdot \frac{S_{45}}{S_{celk}} + K(p(x))_0 \cdot \frac{S_0}{S_{celk}} + K(p(x))_{pr} \cdot \frac{S_{pr}}{S_{celk}}$$

Stanovení parametrů procesu

Prvním krokem bylo stanovení jednotlivých parametrů, ovlivňujících průběh injektáže pryskyřice. Protože hodnoty propustnosti **K** nejsou běžnou součástí dokumentace k materiálům, byly stanoveny jednak experimentálně, jednak z dostupné literatury.

Pro závislost viskozity na čase a teplotě byly použity vztahy pro Newtonovské kapaliny, konkrétně Arrheniův vztah:

$$\mu_v = \mu_0 \cdot e^{\frac{A_n \cdot (T - T_0)}{T_0}}$$

V tomto vztahu vystupuje vztažná teplota, závislá na stupni vytvrzení **X**; tento je stanoven řešením rovnice:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot e^{-\frac{B}{R \cdot T}} \cdot f(X)$$

$$X(t) = \frac{H(t)}{H(\text{total})}$$

Výsledný vztah pro viskozitu v závislosti na teplotě a stupni vytvrzení pak má podobu:

$$\mu = \alpha \cdot e^{\frac{E_\mu}{R \cdot T}}$$

kde hodnota tzv. aktivační energie je:

$$E_\mu = a + b \cdot X$$

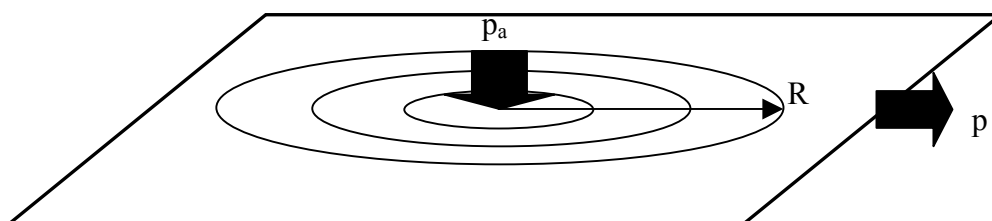
a

$$\alpha = a_0 \cdot e^{-b_0 \cdot X}$$

Materiálové konstanty **a**, **b**, **a₀** a **b₀** byly stanoveny experimentálně. Do kvaziizotropní skladby z tkanin použitých na vlastním listu byla vstřikována daná pryskyřice. Z naměřených hodnot průměru smáčené oblasti v závislosti na čase pak byly stanoveny tyto hodnoty.

Pozn: Pro kruhovou oblast je parciální diferenciální rovnice, vycházející z Darcyho zákona, řešitelná analyticky.

Schema pokusu:

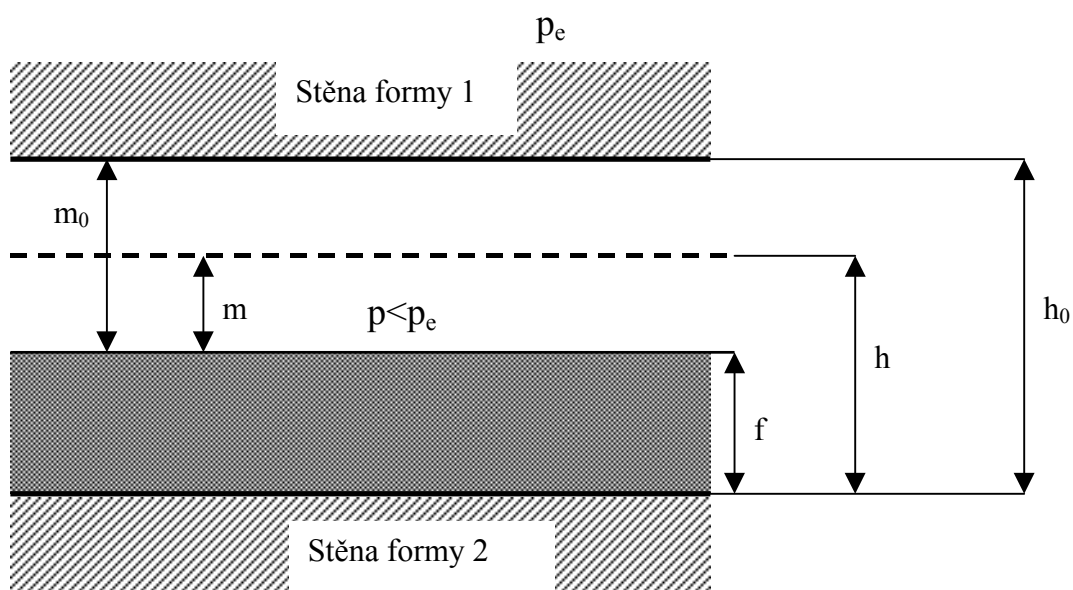


Dalším krokem bylo stanovení závislosti propustnosti **K** a „průtočného“ průřezu **S** na tlaku. Vzhledem k deformaci formy, zmíněné v úvodu, dochází ke změně tloušťky skořepiny a ke zhutňování výztuže. Byla přijata následující hypotéza:

$$m = m_{\min} + (m_0 - m_{\min}) e^{\frac{p-p_e}{p_a}}$$

kde **m_i** jsou dány z definice objemového podílu vláken (jejich fyzikální význam je zřejmý z obrázku):

$$m = f \cdot \left(\frac{1}{V_f} - 1 \right)$$



Hodnoty **m_{min}** (resp. odpovídající **V_{fmax}**) jsou dány geometrií výztuže a je možno je stanovit pokusem a bývají uvedeny i v literatuře. V našem případě je pro tkaninu v plátňové vazbě **V_{fmax}** = 0,7 a pro jednosměrný roving 0,9.

V literatuře je pro závislost propustnosti na objemovém podílu výztuže **V_f** udáván empirický vztah:

$$\ln K = A + B \cdot V_f$$

Hodnoty **A** a **B** byly pro jednotlivé tkaniny opět stanoveny pomocí uvedeného experimentu. Za předpokladu platnosti zmíněné hypotézy pak závislost **S** na tlaku je:

$$S(p) = S_0 \cdot \frac{f + m}{f + m_0} = S_0 \cdot \left(f + m_{\min} + (m_0 - m_{\min}) e^{\frac{p-p_e}{p_a}} \right)$$

Řešení metodou konečných prvků bylo provedeno v MS Excelu98. Celková matice „tuhosti“ pro 25 prvků byla sestavena a zapsána ručně, pro řešení v časových krocích bylo použito programování makrojazyka.

Výsledky

V průběhu experimentu bylo postupně vyrobeno pět vrtulových listů.

Výr. číslo	Teplota [°C]	Tlak na vstupu [atm]	Tlak na čele [atm]	Doba do prvního průtoku pojiva [min]	Celková doba plnění [min]
7	29	1	0,5-0,4	15	25
8	34	1	0,5	10	15
9	34	1	0,5	15	15
10	40	1	0,02	6	6
11*	29	1	0,5	10	15

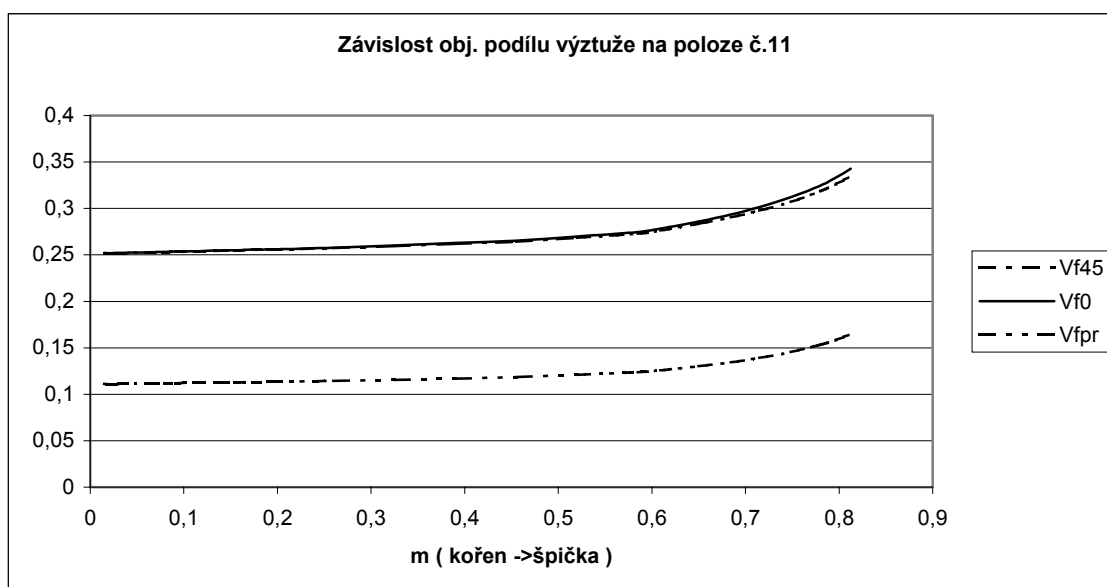
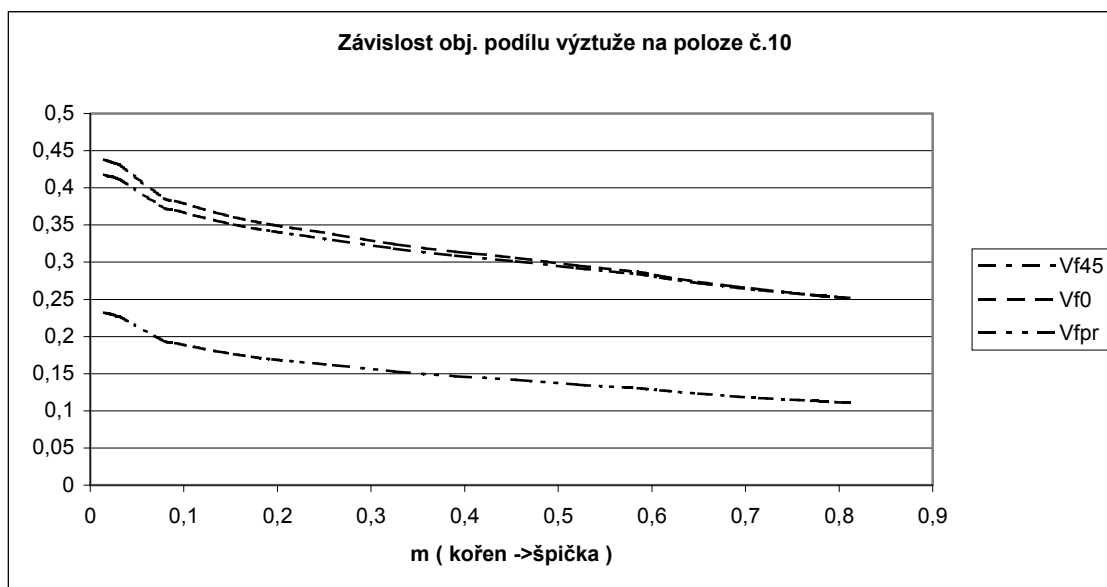
V další tabulce je uvedeno srovnání skutečné a vypočtené doby plnění:

Výrobní číslo	Skutečná doba plnění [min]	Teoretická doba plnění [min]
7	15 - 25	19,8
8	10 - 15	15,2
9	15	15,2
10	6	5,95
11	10 - 15	6,01

Pozn: List výr. č. 11 byl plněn od kořene ke špičce, na rozdíl od ostatních

Provedené výpočty nám dále umožnily předem odhadnout objemový podíl vláken, dosažitelný pro dané podmínky. V následujících grafech je V_f v jednotlivých oblastech listu pro listy výr. č. 10 a výr. č. 11 v okamžiku úplného zaplnění formy:

Pozn: V okamžiku uzavření formy dochází k zániku tlakového spádu. Následně pak dojde uvnitř uzavřené formy k přerozdělení dosud nevytvrzené pryskyřice a k určitému „zprůměrování“ hodnot objemového podílu. Pro list č. 10 byl např. průměrný objemový podíl výztuže, zjištěný vážením jednotlivých složek, stanoven na 41%.



Závěr

Z předchozích výsledků je zřejmé, že pomocí použité technologie je dosahováno jen průměrných objemových podílů výztuže. To ve svém důsledku snižuje mechanické vlastnosti výsledného kompozitu (při $V_f = 0,6$ je $E = 29000\text{Mpa}$, pro $V_f = 0,4$ pak jen $E = 22000\text{Mpa}$ pro kvaziizotropní skladbu skleněné výztuže). Analogicky se snižují i pevnostní a frekvenční charakteristiky výrobku. Řešením pro rozměrnější díly bude použití více vtokových míst, ovšem za cenu komplikovanějšího systému dodávek pryskyřice.