

ASPEKTY DOTYCZĄCE OPISU PRZENOSZENIA CIEPŁA PODCZAS IMPREGNACJI PÓŁPRODUKTÓW WŁÓKIENNICZYCH

ASPECTS FOR THE DESCRIPTION OF THE HEAT TRANSFER DURING THE IMPREGNATION OF TEXTILE SEMI FINISHED PRODUCTS

Tworzywa kompozytowe coraz częściej są stosowane jako materiały konstrukcyjne, ponieważ w wielu przypadkach jeden rodzaj materiału nie może spełnić wszystkich wymagań. W zakresie technologii tworzyw sztucznych powszechnie stało się zwłaszcza wzmacnianie tworzyw sztucznych włóknami. Jednakże ta klasa materiałów nie została dotychczas zbadana w wystarczającym stopniu, przy czym brak wyczerpującego opisu dotyczy zwłaszcza przenoszenia ciepła w materiałach kompozytowych tego typu. Tematem niniejszego opracowania jest więc zagadnienie przenoszenia ciepła w tworzywach sztucznych wzmacnianych włóknem w zależności od użytego półproduktu włókienniczego (np. przędzy lub tkaniny). Do opisu zastosowano samodzielnie stworzone narzędzie obliczeniowe. Wyniki tych obliczeń zostaną porównane z wartościami doświadczalnymi.

Słowa kluczowe: *termoplastyczne tworzywa kompozytowe, technologia tekstylii, oprogramowanie symulacyjne, nawijanie włónka, impregnacja*

Composite materials are used as construction materials increasingly since a material alone can not meet frequently the demanded requests. At that established just in the field of the plastic processing the fibre reinforced plastics. This material class is not sufficiently examined up to now, at which the heat transfer of such composites is not sufficient in particular described yet. The heat transfer in fibre reinforced plastics will be described in dependence of the used textile semi finished product (for example textile thread or fabric) in which a self developed calculation tool is used. Definitely the calculated results are compared with experimental values.

Keywords: *thermoplastic composites, textile technology, simulation software, filament-winding, impregnate*

1. Wprowadzenie

Tworzywa sztuczne, a zwłaszcza tworzywa wzmacniane włóknem, które ze względu na swe niezwykle specyficzne właściwości znajdują zastosowanie w produkcji lekkich, wytrzymałych i sztywnych elementów konstrukcyjnych, stały się – obok materiałów metalowych – jedną z najważniejszych kategorii materiałów.

Począwszy od zastosowań w przemyśle stocznym, lotniczym i kosmonautycznym, w ciągu ostatnich lat otwierały się wciąż nowe obszary zastosowania tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknami.

Obecnie w przemyśle motoryzacyjnym i elektrycznym, w budownictwie, lotnictwie i kosmonautyce, w przemyśle sportowym i rozrywkowym, jak również w licznych dziedzinach życia codziennego [4] stosuje się wielkie ilości materiałów zdefiniowanych przez [1]

1. Introduction

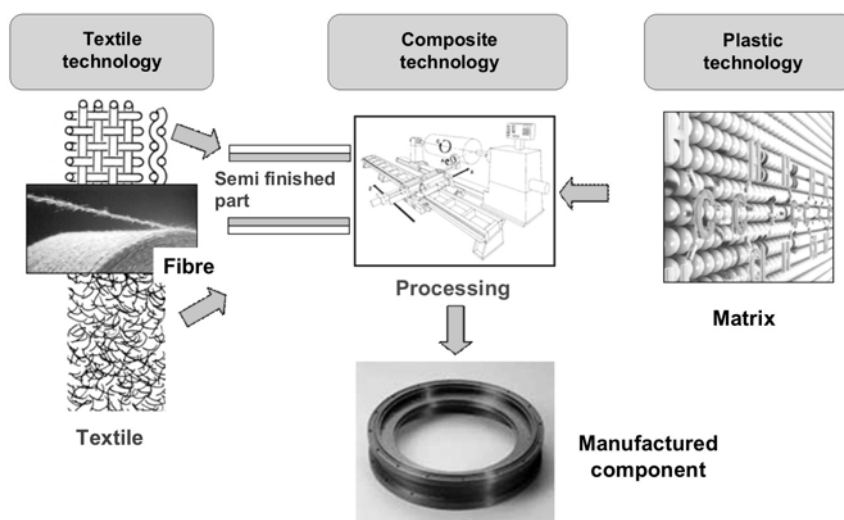
Next to the metallic materials the plastics and in particular the fibre reinforced plastics, which are preferably used for the production of lightweight, high-strength and stiff components due to their excellent specific properties, became one of the most significant material categories.

Departing from applications in the ship as well as air and space travel technology, new areas of application were opened up in the last years for fibre reinforced plastics (FRP). Today great amounts of the of [Ehr99] as fibre reinforced plastics defined materials are used in the construction of vehicles, the electric industry, the building industry, the aerospace industry, the sport and leisure industry as well as in numerous applications of the daily life [4]. With the aid of this, to be designated as indispensable, FRP it's possible to create customized materials that fit to almost every

jako kompozytowe tworzywa sztuczne wzmocnione włóknami. Za pomocą tychże tworzyw kompozytowych, o których należy powiedzieć, że są niezastąpione, można – w wyniku celowego połączenia materiałów systemu osnowy (np. tworzywo sztuczne) oraz wzmocnienia (np. tworzywo włókiennicze) [3] – wytworzyć materiały dostosowane indywidualnie prawie do każdej potrzeby, co sprawia, że tworzywa kompozytowe są stosowane coraz chętniej jako materiały konstrukcyjne. Z połączenia włókna i matrycy w procesie przetwarzania powstaje materiał, z którego równocześnie formowana jest struktura lub element konstrukcyjny (patrz np. rys. 1).

Jednym z ważniejszych procesów przetwórczych, zwłaszcza w przypadku tych elementów konstrukcyjnych, od których wymaga się symetrii ruchu obrotowego, jest metoda nawijania włókien.

problem through the possibility of targeted combining of matrix system (e.g. plastics) and reinforcement system (e.g. textile fabric) [3] so that FRP are used as construction materials increasingly. In this case the material, represented as in fig. 1, is made from the combination of fibre and matrix in the processing and is shaped simultaneously to the components form. As a significant manufacturing process, in particular for rotationally symmetrical components, the filament winding process can be named.



Rys. 1. Schemat procesu produkcji elementu z tworzywa kompozytowego
Fig. 1. Schematic of the production process of FRP components

2. Nawijanie włókien z zastosowaniem tworzyw termoplastycznych

Według [2] podstawą metody nawijania włókien jest ciągle, wspomagane komputerowo – odbywające się z zadaną prędkością i zgodnie ze zdefiniowanym wzorem – odkładanie włókienniczych półproduktów wzmacniających na obracający się pozytywny rdzeń formy (patrz rys. 1). Forma rdzenia nawojowego umieszczonego pomiędzy konikiem a wrzeciennikiem odpowiada późniejszemu elementowi. W przypadku rur często są używane rdzenie metalowe o lekko stożkowej geometrii (od 1° do 2° nachylenia ułatwiającego oddzielenie od formy). Rdzenie te można – po zakończeniu procesu twerdnienia – oddzielić poprzez ściągnięcie gotowej bryły z rdzenia. Pierwsze miejsce w zakresie produkcji przemysłowej

2. Filament winding with thermoplastics

According to [2] the basis of the filament winding process is the continuous computer-aided deposition of textile reinforcing semi finished products on a rotating positive core, in a predefined pattern and with specified speed (fig. 1). In this case the core between tailstock and headstock is equivalent to the shape of the later component. For tubes often metal cores with slightly conical geometry (1° to 2° draft angle) are used. After curing, the produced hollow part can be demoulded by pulling of the core. In the foreground of the industrial manufacturing is the filament winding process with thermosetting plastics [6] that is the impregnation of the semi finished product between take-off and wind-up on the mandrel with the thermosetting matrix in a waterproofing-bath. Since thermosetting

zajmuje metoda nawijania na mokro z zastosowaniem tworzyw duroplastycznych [6] – półprodukt pomiędzy ściągnięciem i odłożeniem na trzpieniu nawojowym styka się z duroplastycznym materiałem matrycy w kąpieli impregnacyjnej.

Ponieważ duroplasty w porównaniu z termoplastami mają wiele cech niekorzystnych (patrz tabela 1), coraz bardziej wzrasta zainteresowanie nawijaniem z zastosowaniem tych drugich tworzyw.

Według [7] „twardnienie” matryc termoplastycznych następuje – inaczej niż w przypadku utwardzania kompozytów z zastosowaniem matryc termoplastycznych (wywoływanego przez sieciowanie chemiczne związków nienasyconych w łańcuchu molekularnym lub jeszcze nie wysyconych, zdolnych do reakcji grup końcowych bądź pobocznych) – w wyniku:

- topienia się polimeru,
- konsolidacji pod wpływem ciepła,
- jak też ochłodzenia matrycy.

Wadą w przypadku nawijania z użyciem matrycy termoplastycznej jest jednakże z jednej strony znacznie wyższa temperatura obróbki, a z drugiej strony – lepkość wyższa o kilka dziesiątych wykładników potęgi. Aby uzyskać mimo to dobre wyniki pod wzglę-

show also some disadvantages in comparison with thermoplastics (see Tab. 1) the winding with last-named plastics is increasingly interesting.

According to [7] the curing of thermoplastic matrix systems is carried out by

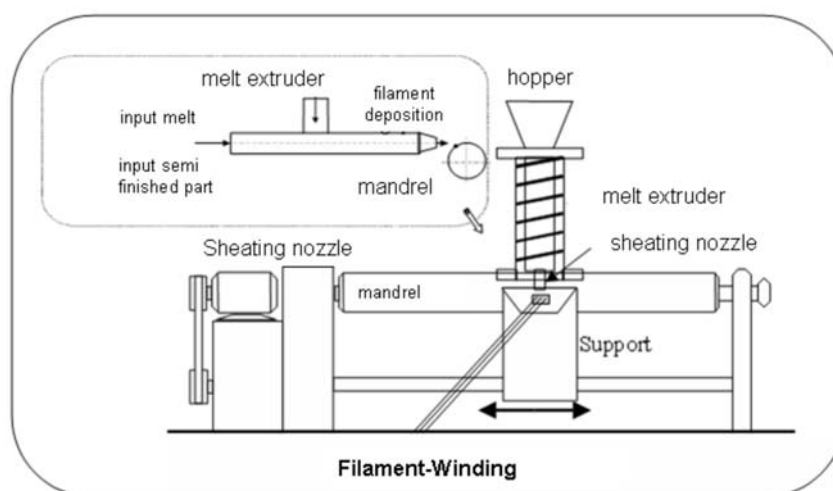
- the melting of the polymer,
- the consolidation under heat influence,
- as well as the cooling down of the matrix

unlike the curing of thermosetting materials results from chemical cross linking of unsaturated bonds in the molecular chain or not yet more saturated reactive groups.

Disadvantageous while winding with thermoplastic matrix is on the one hand the clearly higher processing temperature as well as on the other hand the around some 10er powers higher viscosity. However to achieve good results in terms of the impregnation of the fibres in filament winding the winding process with impregnation nozzle is combined with the extrusion technology (fig. 2). At that the textile semi finished product in the nozzle is contacted first of all with the polymer melt and passes then a thermal compensation stretch in that differences between melt temperature and filament temperature are compensa-

Tab. 1: Właściwości termoplastycznych tworzyw kompozytowych
Tab. 1. Properties of thermoplastic FRP

Wady / Disadvantages	Zalety / Advantages
<i>Właściwości / Properties</i>	
- Duża lepkość stopu / High melt viscosity - Złe właściwości układania w temperaturze pokojowej / Bad drape ability at room temperature	- Duża wytrzymałość na rozciąganie / High percentage elongation after fracture - Wysoka udarność / High impact strength - Wysoka wytrzymałość resztkowa w przypadku obciążenia udarowego / High residual strength at impact - Wysoka wytrzymałość na ściskanie w przypadku podwyższonej temperatury lub wilgotności / High pressure resistance at increased temperature / humidity - duża zdolność pochłaniania energii / High energy consumption property
<i>Trwałość / Resistance</i>	
- Mała trwałość powierzchni / Small surface hardness - Skłonność matrycy do pełzania / Inclination to creep of the matrix	- Dobra odporność chemiczna / Good chemical resistance - Niewielkie wchłanianie wilgoci / Small moisture absorption - Dobra palność / Good fire performance - Biokompatybilność / Biocompatibility - Możliwość późniejszego kształtowania / Subsequent plastic deformation - Prostota łączenia w wyniku procesu spawania / Simple joining through welding - Możliwość ponownego wykorzystania / Possibly for recycling
<i>Przetwarzanie / Processing</i>	
- Wysokie temperatury przetwarzania / High processing temperatures - konieczność kontrolowanego stygnięcia (w przypadku termoplastów częściowo krystalicznych) / Necessity of controlled Cooling's down (for semi crystalline thermoplastics)	- Brak konieczności reakcji polimeryzacji / No polymerization reaction necessary - Potencjalnie szybsza produkcja / Potentially faster manufacturing - mniejsze obciążenie miejsca pracy wzgl. obciążenia środowiska podczas produkcji / Smaller job and/or. environmental pollution during the manufacturing - Możliwość nawijania niegeodezyjnego / No geodesic deposition possible - Możliwość nawijania nieciągłego / Discontinuous deposition possible



Rys. 2. Metoda nawijania z bezpośrednią impregnacją stopem
 Fig. 2. Filament-Winding-Process with direct melt impregnation

dem impregnacji włókien podczas nawijania, zgodnie z rys. 2 połączono metodę nawijania za pomocą dyszy impregnującej z techniką wytłaczania.

W tym przypadku półwyrob włókienniczy w dyszy styka się najpierw ze stopem, a następnie przechodzi przez odcinek wyrównawczy, w którym stop i materiał włókienniczy wyrównują swoją temperaturę. Ponadto materiał przechodzi przez stożek, w którym następuje konsolidacja, tzn. wniknięcie stopu do półwyrobu włókienniczego.

Oprócz opisu właściwości przepływowych duże znaczenie dla późniejszej jakości kompozytu ma – w przypadku opisu przedstawionego tu procesu – zwłaszcza przenoszenie ciepła. Jako że opis procesów przepływu oraz własności wytrzymałościowych przedstawiono już w sposób wyczerpujący w innym miejscu [4], w dalszej kolejności należy dokładniej przeanalizować przechodzenie ciepła oraz jego obliczanie.

Przedstawiany jest przy tym w szczególności model, za pomocą którego w prosty sposób można opisać przewodzenie ciepła w tworzywie kompozytowym w zależności od półproduktu włókienniczego.

3. Opis narzędzia obliczeniowego

Ponieważ przewodnictwo cieplne w kompozytowych tworzywach wzmocnianych włóknem zależy zarówno od zastosowanego włókna i użytej matrycy, jak też od orientacji włókien, w celu prostej prognozy przewodzenia ciepła w polimerach zostało stworzone narzędzie obliczeniowe na podstawie arkusza roboczych programu Excel®. Uwzględniono przy tym zwłaszcza wzmocnienie tworzywa przez różne półprodukty włókiennicze, np. rovingi, przędzę (półprodukty włókniste), a także tkaniny i maty (pół-

ted. Furthermore the material ran through a cone in that the consolidation, that is the intrusion of the melt into the textile semi finished product occurred.

Next to the description of the flow behaviour also the heat transfer represents a significant role for the later compound quality in the here presented process.

While the description of the flow processes as well as the strength behaviour were already fully described at other places [4], the heat transfer and the calculation of the same will be examined more closely in the following.

In particular a model is presented that offers the possibility to describe in a simple and easy way the thermal conductivity depending on the used textile semi finished part.

3. Description of the calculation tool

As the thermal conductivity in fibre reinforced plastics (FRP) is depending both on the used fibres, the used matrix system and fibre orientation, a calculation tool based on Excel® worksheets was developed for easy prediction of the thermal conductivity in polymers.

In particular thoughts have been given to the strengthening of the plastic by different textile semi finished products, that is roving, yarns (fibre semi

produkty powierzchniowe). Podstawę dla narzędzia obliczeniowego stanowi ustalenie profilu temperatury; można w tym celu wykorzystać dwie metody.

Z jednej strony rozwiązanie analityczne (równ. 1) z zastosowaniem funkcji błędu Gaussa (równ. 2) do wyznaczania rozkładu temperatury ciała półnieskończonego jednorodnego, którego temperatura powierzchni zmienia się nagle z T_0 do T_1 , jak też liczbowe wyznaczanie wg równania 3. Rysunek 3 przedstawia siatkę służącą do wyznaczania dwuwymiarowego przepływu ciepła, przy czym równ. 3 określa rozszerzenie do przypadku wielowymiarowego.

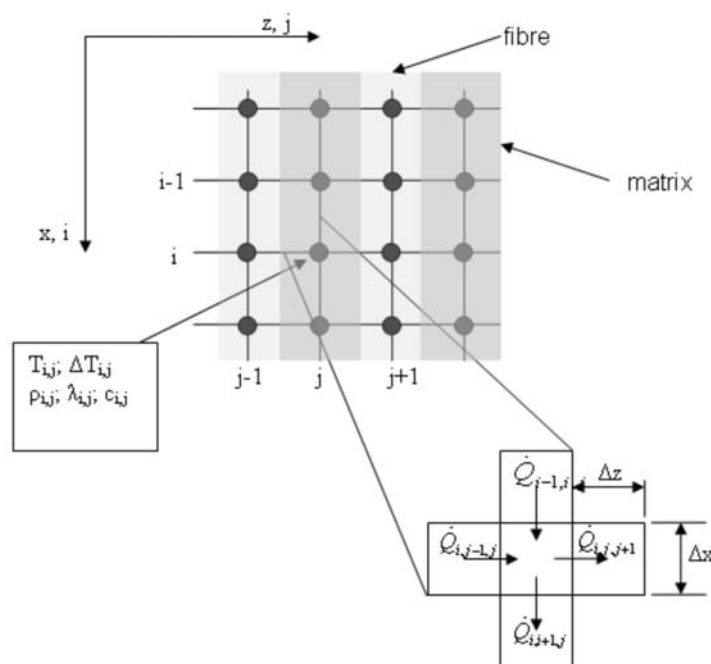
Najpierw obliczany jest profil temperatury tworzywa kompozytowego (z zastosowaniem metody numerycznej), następnie zaś ustalane są własności tworzywa (za pomocą rozwiązania analitycznego). Warunkami obowiązującymi są, w przypadku badania

finished products), as well as fabrics and mats (face semi finished products). The determination of the temperature profile is the basis of the calculation tool in which 2 methods are available here. On the one hand the closed solution (1) with the aid of the Gaussian error function (2) for the calculation of the temperature distribution of a semi-infinite homogeneous body, whose surface temperature changes suddenly from T_0 to T_1 as well as the numeric definition in equation (3). Fig. 3 shows the grid for the definition of the two-dimensional heat flow in which (3) indicates the enhancement onto the multidimensional case.

First of all the temperature profile of the composite is calculated with the numeric method whereupon then the determination of the material values occurs by means of the closed solution.

$$\frac{T - T_1}{T_0 - T_1} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-z^2} dz = erf(z) = erf\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}}\right) \quad (1)$$

$$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (2)$$



Rys. 3. Siatka służąca do wyznaczania dwuwymiarowego przepływu ciepła
Fig. 3. Grid for the definition of the two-dimensional heat flow

ciała półnieskończonego, niestalone pole temperatury (ze względu na skokową zmianę temperatury na brzegu), jak również rozwinięcie odwracalnej funkcji aproksymacyjnej dla całki prawdopodobieństwa Gaussa. W wyniku otrzymuje się wartość zastępczą dla przewodnictwa temperaturowego i cieplnego badanego ciała w celu dalszej iteracji obliczenia.

The requirements for the validity are in this case the consideration of semi-infinite body, an unsteady temperature field through sudden temperature change at the edge as well as the development of a reversible approximation function for the Gaussian error integral. The result supplies a replacement value for the temperature and heat conductivity of the considered

W obrębie modelu obliczeniowego porównywane są przy tym rozwiązania liczbowe i analityczne w celu stwierdzenia dokładności bądź też weryfikacji modelu. Ustala się przy tym maksymalną różnicę obu rozwiązań na poziomie $\pm 0,05^\circ\text{C}$, dzięki czemu wybraną metodę można uznać za wystarczająco dokładną.

Rysunek 4 przedstawia porównanie zastosowania modelu numerycznego oraz rozwiązania analitycznego do obliczania rozkładu temperatur, jak również ich wzajemną różnicę, przy czym zawiera się ona w zakresie $\pm 0,05^\circ\text{C}$, a tym samym model obliczeniowy można uznać za wystarczająco dokładny.

body for the further iteration of the calculation. Within the calculation model the numeric one and the closed solution were compared in order to state the accuracy and/or verify the model. A maximum difference of $\pm 0.05^\circ\text{C}$ between the two solutions was determined so that the chosen procedure can be accepted as sufficiently exact.

Fig. 4 shows the comparison in the application of the numeric model and the closed solution during the calculation of the temperature sequence as well as the difference between each other, while the temperature difference is less than $\pm 0.05^\circ$ so that the model can be accepted as sufficient exact.

$$\begin{aligned} \Delta T_{i,j,k} = & \frac{\Delta t}{\Delta x_{i,j,k}^2} \cdot \frac{2}{c_{i,j,k} \cdot \rho_{i,j,k}} \cdot \left[\frac{\left(T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\lambda_{i+1,j,k}} \right)} + \frac{\left(T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\lambda_{i-1,j,k}} \right)} \right] \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta z_{i,j,k}^2} \cdot \frac{2}{c_{i,j,k} \cdot \rho_{i,j,k}} \cdot \left[\frac{\left(T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\lambda_{i,j+1,k}} \right)} + \frac{\left(T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\lambda_{i,j-1,k}} \right)} \right] \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta y_{i,j,k}^2} \cdot \frac{2}{c_{i,j,k} \cdot \rho_{i,j,k}} \cdot \left[\frac{\left(T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\lambda_{i,j,k+1}} \right)} + \frac{\left(T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\lambda_{i,j,k-1}} \right)} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

W celu maksymalnego uproszczenia narzędzia obliczeniowego, które opisuje zależność przewodnictwa cieplnego od:

- zastosowanych włókien,
- zawartości objętości włókien,
- zastosowanej matrycy, a także
- orientacji włókien (w półprodukcie włókienniczym),

jako podstawę wybrano arkusze obliczeniowe programu Excel®, których maskę wprowadzania przedstawia rys. 5.

4. Wyniki obliczeń

Podczas pierwszych badań model obliczeniowy został nie tylko zbadany poprzez porównanie metody liczbowej i analitycznej pod kątem możliwości ich zastosowania, lecz również porównano go z danymi uzyskanymi metodą eksperymentalną. Rysunek

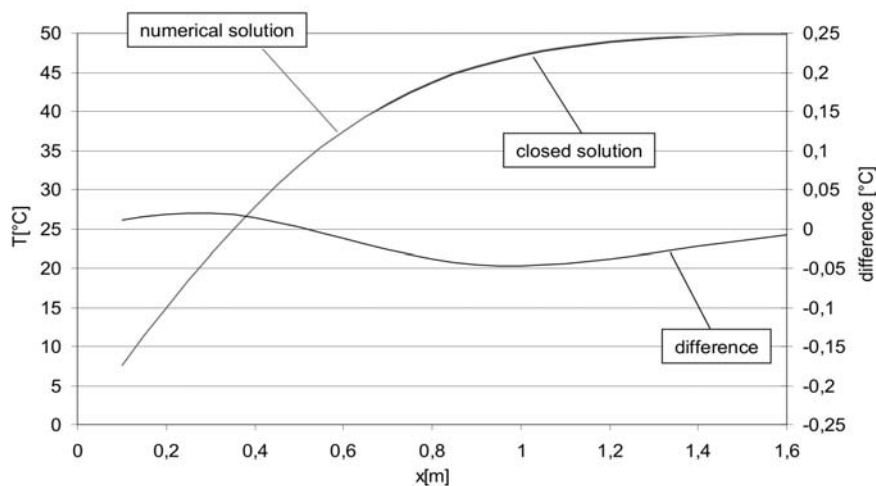
To get the here introduced calculation tool, which describes the dependence of the thermal conductivity on

- the used fibre
- the fibre volume content
- the used matrix, as well as
- the orientation of the fibres (in the textile semi finished product),

as simply as possible in the operation, Excel work sheets were chosen whose input mask is shown in fig. 5.

4. Calculation results

In first investigations the calculation model was not examined only through the comparison of numeric and analytical procedure with regard to his use, but it was compared also with experimentally determined data. Fig. 6 shows the comparison for two carbon fibre



Rys. 4. Porównanie rozwiązania analitycznego i przybliżenia numerycznego
Fig. 4. Comparison of closed solution and numeric approximation

	Matrix	Faser	
dt	0,00375 s	3,75E-03 s	
dx, dy, dz	0,001 m	0,001 m	Gekoppelt
λ	0,4 W/m K	1 W/m K	
ρ	950 kg/m ³	1500 kg/m ³	
c	2050 J/kg K	500 J/kg K	
a	2,05392E-07	1,33E-06	

Ergebnisse:	
Berechnete T-Leitfähigkeit	3,06903E-07 m ² /s
Dichte des Verbundes	1220,769231 kg/dm ³
Wärmekap. des Verbundes	1112,381853 J/kg K
Wärmeleitf. d. Verbundes	0,416762171 W/m K

Faser	640	0,00000064 m ³ (Volumen)
Matrix	660	0,00000066 m ³ (Volumen)
Faser-Volumen-Anteil		0,492307692
Matrix-Volumen-Anteil		0,507692308
Faser-Masse		0,00096 kg
Matrix-Masse		0,000627 kg
Faser-Massen-Anteil		0,604914934
Matrix-Massen-Anteil		0,395085066

Ausgangstemperatur T₀: 100 °C
Zieltemperatur T₁: 0 °C

Startbedingungen (Strg+s)
Berechnung starten (Strg+m)

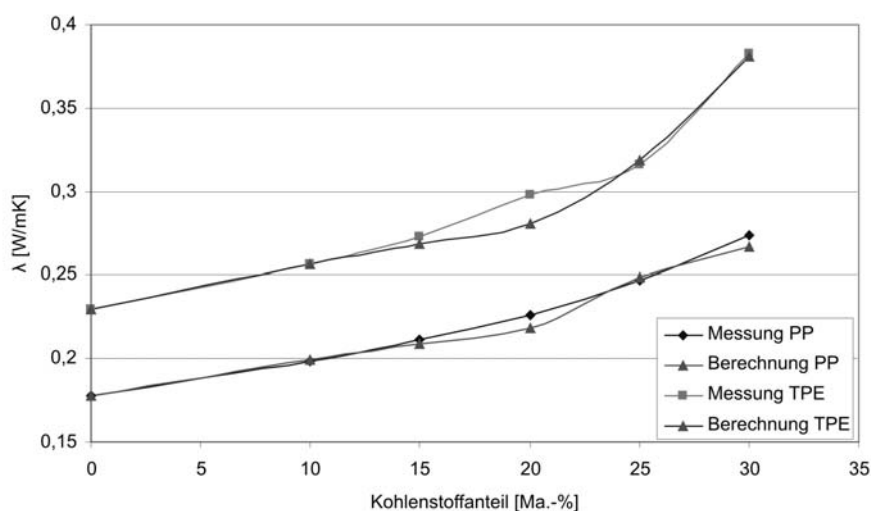
Rys. 5. Maska wprowadzania danych do narzędzia obliczeniowego [Fro 05]
Fig. 5. Input mask of the calculation tool [Fro05]

6 przedstawia porównanie dwóch wzmocnionych włóknem węglowym termoplastów: polipropylenu i elastomeru termoplastycznego, przy czym przewodnictwo cieplne przez fazę włóknistą jest przedstawione w tym przypadku dla nieregularnie wzmocnionego, tzn. quasi-izotropowego materiału kompozytowego. Także w przypadku wyższej zawartości włókien można tu stwierdzić wysoką zgodność pomiędzy testami a obliczeniami.

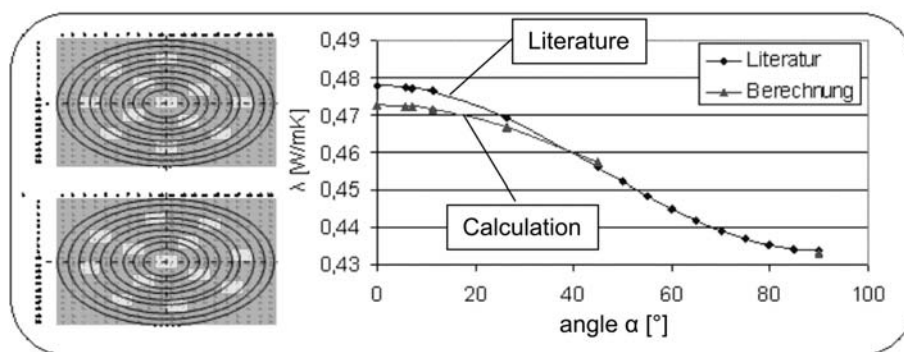
Ponadto na rys. 7 zamieszczono porównanie wartości obliczeniowych i podręcznikowych dla wzmocnienia za pomocą przędzy w zależności od kąta skręcenia włókien. Także w tym przypadku uzyskuje się wysoką zgodność wyników.

reinforced thermoplastics (PP and TPE) at which the thermal conductivity is here plotted versus the fibre part for a random reinforced that is a quasi isotropic composite material. Also at higher fibre volume fractions a good correlation can be found here between experiment and calculation.

Fig. 7 keeps on plotting the comparison of calculation and literature values for a reinforcing using thread versus the fibre bending angle. The good correlation of the results is here proved, too.



Rys. 6. Porównanie obliczonego i zmierzonego przewodnictwa cieplnego
 Fig. 6. Comparison of the calculated and experimental thermal conductivity



Rys. 7. Przewodnictwo cieplne w zależności od kąta skrzywienia włókien
 Fig. 7. Thermal conductivity in dependence of the fibre bending angle

5. Podsumowanie

Przedstawione opracowanie prezentuje narzędzie obliczeniowe służące do wyznaczania przewodnictwa cieplnego i temperaturowego w kompozytowych tworzywach sztucznych wzmocnianych włóknem i umożliwiające wykonywanie obliczeń w prosty i przyjazny dla użytkownika sposób przy użyciu arkuszy obliczeniowych programu Excel®.

Przy jego użyciu można łatwo analizować struktury kompozytowe i wyznaczać ich właściwości przewodnictwa cieplnego i temperaturowego. Dzięki wykorzystaniu arkuszy obliczeniowych programu Excel® obliczenia można wykonywać z wystarczającą dokładnością prawie wszędzie bez użycia specjalistycznego oprogramowania.

5. Summary

The present article introduces a calculation tool for the determination of the heat and temperature conductivity in fibre reinforced plastics. By use of Excel® worksheets in this calculation tool a simple and user friendly calculation is possible. In this way it is possible to design and dimension composites in an easy and simple way and to calculate their heat and temperature conductivity. By the use of Excel® worksheets a calculation is possible almost everywhere and without special software with sufficient accuracy.

6. References

- [1] Ehrenstein G., W.: *Polymer-Werkstoffe*, Carl-Hanser-Verlag, 1999
- [2] Flemming M., Ziegmann G., Roth, S.: *Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1999
- [3] Frommann L., Ziegmann G.: *Möglichkeiten und Grenzen des Diaphragmaverfahrens bei der Umformung naturfaserverstärkter Kunststoffe in der Fahrzeugindustrie*, Workshop: Polymere der Zukunft, Teil 3: Neue Kunststoffe, Wolfsburg, 19. September 2000
- [4] Frommann L.: *Prozessmodellierung zur Untersuchung der Imprägnierung textiler Halbzeuge mit Thermoplasten Dissertation*, Clausthal, 2002
- [5] Frommann, L., Reckzügel, M.: *Berechnungstool zur Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit in Faser-Kunststoff-Verbunden*, KEM, Heft 9, September 2005, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Germany
- [6] Green J.: *Overview of filament winding*, Filament Winding 2001, Second international convention for filament winding technology, 17.-19. October 2001, Hotel Metropole, Brussels, Belgium
- [7] Menges G.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1990
- [8] Neitzel M., Breuer, U.: *Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde*, Carl Hanser Verlag, 1997

Prof. Dr.-Ing. Lars FROMMANN

Westfälische Hochschule Zwickau
Institut für Produktionstechnik
Postfach 201037, 08012 Zwickau
Besucheradresse: Rasmussen-Bau
Äußere Schneeberger Str. 15-19 Ecke Amalienstr., Raum 420/421
Tel.: ++49 (0)375 536 1721
Fax: ++49 (0)375 536 1713
e-mail: Lars.Frommann@fh-zwickau.de

Prof. Dr.-Ing. Matthias RECKZÜGEL

Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg
FB Maschinenbau und Versorgungstechnik
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg
Tel.: 0911 - 5880 1829
Fax: 0911 - 5880 5135
e-mail: matthias.reckzuegel@fh-nuernberg.de
