

مدل سازی سه بعدی ترمودینامیکی اثر آتش بر کامپوزیت های پایه پلیمری با در نظر گرفتن تغییر خواص حرارتی

محمود مهرداد شکریه^۱ و حمیدرضا عبدالوند^۲

آزمایشگاه تحقیقاتی مواد مرکب، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۱۲)

چکیده

در این مقاله، به استخراج روابط سه بعدی حاکم بر انتقال حرارت در کامپوزیت های پایه پلیمر در معرض آتش پرداخته شده است. پس از مدل سازی ریاضی، با در نظر گرفتن تغییر خواص فیزیکی کامپوزیت در حین حرارت دهی، حل معادلات به روش تفاضل محدود انجام شده است. مدلی نیمه تجربی نیز برای یافتن توزیع دما در نمونه های کامپوزیتی ارائه شده است. نتایج حاصل حاکی از تغییر شدید دما در راستای ضخامت است. گسترش دما در راستای الیاف راحت تر از گسترش در راستای عمود بر الیاف صورت می گیرد. آزمایش های آتش روی نمونه های شیشه- اپوکسی انجام شده و نتایج آن با مدل مقایسه شده است. نتایج آزمایش ها حاکی از گسترش راحت تر حرارت در راستای الیاف برای نمونه های ساخته شده از الیاف تک جهته است. گسترش مُد تورق ایجاد شده در نمونه های ساخته شده از الیاف تک جهته به صورت بیضوی و در نمونه های ساخته شده از الیاف بافته شده به صورت دایره ای است.

واژه های کلیدی: کامپوزیت، ترمودینامیک، آتش، مدل سازی سه بعدی

Three-dimensional Thermodynamical Modeling of Fire Effect on Polymer Matrix Composites, Considering Variation of Thermal Properties

M. M. Shokrieh and H. R. Abdolvand

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, Mech. Eng. Dep't., Iran Univ. of Science and Tech.

ABSTRACT

In this article, three-dimensional temperature distribution in polymer matrix composites, exposed to fire is studied. Considering the variation of the thermal properties of composites during the heating process, equations are solved using a finite difference method. Also, strong variation of temperature through the thickness of composites is observed. More heat transfer in the longitudinal direction is observed than that of the transverse direction. A semi-empirical model for simulation of the distribution of temperature in composites is presented. Experiments are performed on glass/epoxy composites and the results are compared with the theoretical results. The morphology of delamination are elliptical and circular for unidirectional and woven laminates, respectively.

Keywords: Composites, Thermodynamics, Fire, Three-dimensional Simulation

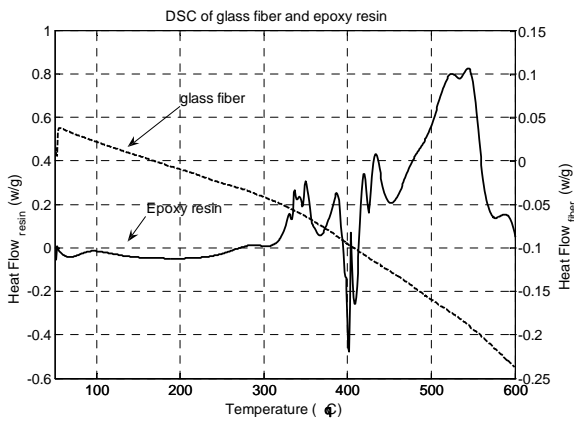
۱- استاد (نویسنده پاسخگو): shokrieh@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد

• Y É € f OÄ I } Z { ~ A , E } € r o A Ä } É ± Ä ¿ Z S Ä » | -1 »
 • { É f È • Ä z » Z ~ y € i z f S ± • [9] d S € 3 É È z È Ä • Ä b { 1/2 Z Z } » c { Y € Ä I Ä Ä ¿ ± Z V » €]
 Á ® I f ± Ó Y Ä P Y Ä S € e ¿ Z f e É Z Ä Z » { c Z Y Ô Ä » Y } Z } É } » Y € « Y € € » { Ä -
 Á ° Z Ä ¿ Z f ± Ä S ¿ € S Ä ® I f ± Ó a Ä ^ È Ä É f È • Ä Ä b » z { c • Y f z - Ä Ä Ä ¿ Z È S { Z -
 [7 - 8] | < ^ 1 Z r € ¿ Ä É € b ± Y É S Z - { 3/4 i Ä r ° Ä Ä Z » z { Y Ä € i I Ä Ä v ¿
 • { c • Y f z - Ä ¿ Y Ä ± Ä Y • € " Ä u Z - f » É ^ ± Z • Ä Ä f n Ä » z f e ° i ¿ Z Y Ä € i I Ä Ä v ¿
 • Y Ä o Y € i I f S € e ¿ Z f 1/4 Ä , È Z Ä Ä • Ä b » Z É Z Ä € Z Y { f È • Ä Ä b » Z É Ä ' z Ä Z v ¿
 ¶ u • Y a d ± Ä | Ä V Ä Ä • Y Ä Ä Ä ^ Ä É e • Y € u Ä v " » ± Z Ä ^ ± Z V » z J È Y • É Ä É » Ä J Ä Z " f »
 É < Ä Ä V Ä Y Ä V Ä V Ä Ä Y € - È Y É Y - € J Y Ä • Z Ä Y € 1/4 Ä ¿ É • Y ~ 13 , f z } Y Ä É Y È • Ä b » Z -
 É Z Ä Z ^ • € ¿ Ä) f ' S » e Ä Z Ä É Z » Z N É Y €] Ä c • Y f z - Ä ¿ Y ¶ u Ä } Z } É e • É € Y u ~ 3 • Z]
 I È Z Z f Ä ¿ Ä 1/2 M ¶ u • Z I È Z Ä f S € 3 Ä • • Y a . d ± Ä v " } , f z » Z - { Z » z { È • Ä Ä f S Z È
 • Ä { Z Z f Ä f È • É f È { d ¶ u • ¶ u • Z u , c Ä Z É f z Ä Z » Ä I , f z » Z - { Z » z { È • Ä Ä f S Z È
 z È • Ä I e / Ä Y € É] € Ä Ä É ¿ Z Ä É Z I z È M Ä 1/2 É Ä Z » € Ä { É ° i ¿ Z Y Ä 3/4 f < Z Ä Z ' ¿ M
 . d ± Ä | Ä V É Y È Y Ä Ä b » Ä Z » z { , € 3/4 Y É Y • É Y • É Y Y { Ä S » { » Ä • } c Ä Z " «
 Ä Ä Ä ± • € f Ä f S 1 € 3 È ¿ Y Y c Ä Z Y € Z S Ä Ä - Z e
 É f È • Ä p f z z Z v " » { Z » z { È • Ä Ä e Y f z - f ¿ Y
 Ä • Z • Ä v Ä Z c " Z } " Ä S Ä Z É f » € - È Y Z € (
 ^ 1 Z n c ¿ Z Y • Z z } d ± Ä { Ä Z - v » É • Z I ^]
 • Y Ä € i I Ä Ä Ä ± • Ä S ¿ Y • Ä 1/2 Ä Ä ^ Ä 3] (
 [1] | Ä f y Y 1/4 Ä } J Ä S e 1/4 i u { É e • Y € u
 • { + È € e { È • É Ä Ä É , 3/4 f S € e ¿ Z f |]
 Z » Ä ^ ± Z V » É J Z È • | 3/4 f S Z C É Z J Z Ä Z » {
 a i - v z È Y ¶ u • Z u È Z 1/4 Ä } [2] | Ä f y Y { € a
 • Ä É Y É € 0 Z m Z ^ 5 ; € - Ä È Ä b . f Ä »
 (® i • Ä Ä S Ä 3/4] € 3/4) € Z Ä È • Ä b É Z Z y
 • Y € e Y É ^ - Ä z Y € Y | Ä f z } z v " •
 1/2 | { Ä } , t ~ f É Ä € € Y f S € e ¿ Z Ä ¿ { Y {
 Ä È C E C Z S Ä f È € É Z » Y Ä u n e Z I • Y
 ¶ u " Z % e Ä Ä Z Ä u Ä M] Y Ä { Ä - Ä Ä f f S Y | Ä
 • { Z » É Y € i ¿ Z Ä , X 3/4 f S Y | Ä f y Y Ä € v »
 - ± Ä Ö Z } e • Y € Ö S } . Z f Ä c { • Y € u Ä Z n »
 É Z Ä 1/2 Z f Y 1/2 M Ä I d ± È ¿ Z Ä • Y € 3 » €] Y €]

7- Fanucci
8- Ha

1- Gibson
2- Henderson
3- Wiecek
4- McManus
5- Springer
6- Griffis



3/4 E A | f Z D S O S E Z A n N B j T ° < . a i - v e

{ A' € S_{yy} k_{zz} A ¥ Z E Z f f Y A 1 A ¥ Z I . Y : ° E • Y {

$$E_{cond} = k_{xx} \frac{\Delta T}{x^2} + 2k_{yy} \frac{w^2 T}{wy^2} \quad (9)$$

E Z A E O E A Y A 1/4 A Z { f • A Y A E O | A q Y ! i • A E Y E Z A A] , Y A < Z | f Y A A f E en E Z f A Y E » Z Z A A E S E f E Y X E Z - f z Y E A , E Z 1/2 z c E • f E Z A • E A Z f Z Y Z I . Y (10) A • { Z Y A { Z Z f E Y » A A E Y O A Z u {

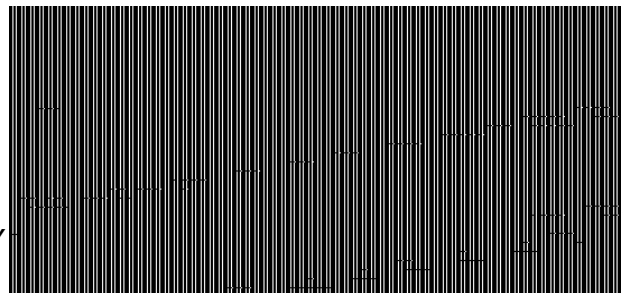
$$\begin{matrix} -k_{11} & 1/2 & a & m^2 & n^2 & 0 & k_x & 1/2 \\ k_{22} & 0 & a^2 & m^2 & 0 & 0 & k_y & 3/4 \\ k_{12} & 3/4 & mn & mn & 0 & 0 & k_z & z \\ k_{33} & z & 40 & 0 & 1 & 1/4 & & \end{matrix} \quad (10)$$

a] Z ~ » A n sin i m cos i , © A A S ~] • Y • , d f k₃ k₂₃ 0 A ° A A m A B f Z Y ° < : | E E M { € E • A A } (8) A • { Z »

$$E_{cond} = k_{11} \frac{\Delta T}{w_1^2} + k_{22} \frac{\Delta T}{w_2^2} + 2k_{12} \frac{\Delta T}{w_1 w_2} + k_{33} \frac{\Delta T}{w_3^2} \quad (11)$$

• { A | { Y E M A % Z Z - f A A E O q (E f S € 1/4 A . { A E » { Z n , E M | i • A M c Y • Z Z f y A E f Y : [3] ° E • Y E Y €] Z A }

c z f z » A v E Z f f E Y j Z i f A z € E M A - T - € ' z Z q] d i 1/4 d f Z Y ° < a] Z (1 , 2 , 3 . d f M 1/2 | • Z A A E O 1/4 A q A A | { Y • Z P 1/2 Z O S 4 j E • • A | { Y E M A E E E ~ 1/2 Y A , i z 3/4 E E € E ~ 1/2 } A E Z A • Z A Z n • Y A A E » , i j . { { € 3 Z » E] , Z E i o Y E | A E i i e d i 1/4 3/4 E A f X | { Y E M A E Z P e Z d m A , i f . | < E] z » z j Z i e



• Z E] » A A ¥ Z E Z f f Y A 1 A ¥ Z I . Y : ° E • Y { . A , X T u { A | A f S € 3

• A d f X E O E A Z d E S E) A • { Z { O_{ps} : { { € 3 * Y € E f E • Y] Y •

$$\frac{1}{C_{ps}} \frac{v_f}{C_{pf}} \frac{1}{C_{pr}} \quad (7)$$

k Y € D S C Y S E Z Z j A m d f Y 1/4 E E E Z » € 3 3/4 E i Y E E Z d E S E { Z E A v A i } . | z { E » a i - v e E A | A { Z { f A E Z A A E Y 4 E { Z - » • { Z • Z q E Y 1/4 A . d f X | A { 1/2 Z O E } • { : [10] { { € 3 * Y € E f E • Y] Y • E O | A q

$$E_{cond, in} = E_{cond, out} + \frac{w}{x_i} k_{ij} \frac{\Delta T}{w x_j} \quad (8)$$

Z A d f X E O E A q d E M E A E k_{ij} , 1/2 M A - E Z f f Y Z u A E i i o z • f E Z A • A i i e E Z f f Y E • E i A Y A x € P A ~ A 3 A A

$$\frac{m_{g,t}^2 R}{V_g^2 M} \times \frac{2T}{x^2} J_{yy} \frac{w^2 T}{wy^2} \quad z z \frac{2T^a}{z^2} \ll J \quad w \quad (17)$$

$$\frac{m_{g,t} \cdot 1}{t} \frac{m_{g,t} \cdot 1}{t} \frac{0.92899 m_{r,consume}}{t}$$

Ä œ v{Ä | { Y É M Ä ½ Z³ m_{g,t} }₁ , ½ M{ Ä -
 ¾ È 1 • € m_{g,t} Y , ì m_{g,t,consume} ¾ Ì Ä r d_{g,t} Ä Y 1
 • ½ M Ä | < Z È » ¾ Z Ì ¼ (Ä | Ä f y) Ä f S € • »
 • Y È < Z È Z » Ä Z ¾ (Ä È » k Y € (4) ± Ä ~ j Y
 • Y | € € • • Y € | u Z | • Y | ¾ È ¾ f y Ä ±
 : { { € ¾ * Y € f f Ä • Y } Y •

$$E_{gen} \frac{w_r Q}{w} \quad (18)$$

• { Z Ä Z { M Ä (4) (1) (2) c Ó { Z Ä } { Z Z f } Y
 Ä • { Z Ä | Ä V È Y } c Ó { Z Ä } { Z Ä } Ä • { Z »
 : { Ä È » È | € È € Ä È f € ÷ Y

$$m_s C_{ps} \quad m_g C_{pg} \frac{T}{t} \quad \frac{S_k w^2 T}{\omega x_1^2} \quad k_2 \frac{2T}{x_2^2} \quad 2 k_2 \frac{w^2 T}{x_1 x_2} \quad w$$

$$k_{33} \frac{2T}{x_3^2} \cdot v \quad C_{pg} m_{gx} \frac{a \cos T}{\omega} \sin \frac{wT}{\omega x_1} \quad T \cos \quad (19) \quad T$$

$$\sin \frac{T}{x_2} \quad T \frac{wT}{\omega x_3} \cdot v \quad \frac{m_s Q}{t} \cdot C_{ps} T \cdot \frac{m_g}{t} C_{pg} T$$

{ Ä | v » Z % Ä Ä c Ó { Z | » 3

Ä - Z Ä ÷ È ¾ Ä È || Ä f S € € { Ä ± | Ä Ä m Ä } e
 É Y € Ä | v » Z % Ä • Y d ± v Ì ~ f ^ 9 ° Ä
 ¾ È . d ± Y | < Ä { Z (f g Y Ä • { Z È » Ä f ^ ^ 3
 : | < Ä f S € € { È È • Ä Ä ½ M Z - f Ä È » { e € e

$$T(x_1, x_2, x_3, t) \quad T_{u,v,w}^t$$

$$\frac{\bar{w}}{t} \frac{T_{u,v,w}^{t-1}}{wt} \quad ,$$

$$\frac{\bar{w}T}{\omega^2} \frac{\dot{a}_{u,v,w}^t}{\omega} \frac{2T_{u,v,w}^t}{u^2} \frac{T_{u,v,w}^{t-1}}{1} \quad T \quad (20)$$

$$\frac{T_{u,v,w}^{t-1}}{u^2} \frac{2T_{u,v,w}^{t-1}}{u^2} \frac{T_{u,v,w}^{t-1}}{T} \quad 0$$

$$E_{conv,in} \frac{J}{w} \quad E_{conv,out} \quad E_{conv} \quad \frac{1}{i} \frac{w}{\omega_i} \quad m_g h_g \quad \frac{0}{1/4} \quad (12)$$

» » Z Z | ¾ Ä ÷ È ¾ Ä È » Ä Ä Z ß Ä € S Ä Z ¾ Ä
 : ° È • | Ä È » Z f S •

$$h_g \quad \frac{T}{T_r} \quad \mathcal{C}_{p,g} \quad dt \quad (13)$$

É Z Ä • Ä È | • È È Ä Z Ä (Ä Ä • { Z { € } Z Z ° }
 € È € S (12) Ä • { Z Ä Z (Z M K) Ä (123)
 : { Ä È » Ä f < Ä ÷

$$E_{conv} \quad C_{pg} m_{gx} \quad \begin{matrix} a \cos T \sin \frac{wT}{\omega x_1} \\ \cos T \sin \frac{T}{x_2} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \frac{wT}{\omega x_3} \\ \frac{wT}{\omega x_3} \end{matrix} \quad (14)$$

É Z Ä Z { È » È Z Ä Ö S Ì q ^ ^ È , ½ M Ä -
 Ä d ± Y | < € S • Z y Ä È Ö È Y Ä | ± Y , f z »
 c Ä Z Ä È » Y Z È Ä È Z f Ä Y È » € m Ö S
 : ° È • ¾ È Y d ± Y Ä È Z f ± Y •

$$Dn_{gx} \quad m_{gy} \quad m_{gz} \quad (15)$$

: ° È (6) Ä • { Z » Z (15) Ä • { Z Ä » m Ä } e

$$m_{gi} \quad \frac{m_g J}{V_g P \omega_i}$$

$$m_{gx} \quad \frac{m_g J_{xx} p}{V_g x} \quad \frac{m_g^2 R}{V_g^2 M P} \quad J_{xx} \frac{wT}{\omega x}$$

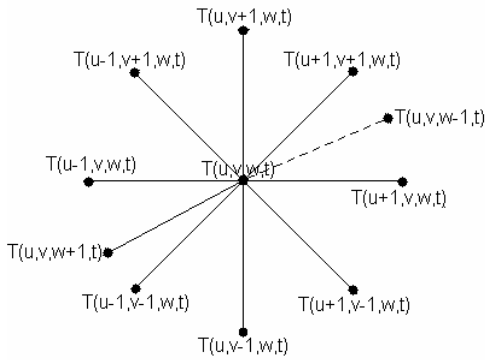
$$D \quad \frac{m_{gy}}{m_{gx}} \quad \frac{\frac{m_g^2 R}{V_g^2 M} \frac{\bar{w}}{\omega}}{\frac{m_g^2 R}{V_g^2 M} \frac{\bar{w}}{\omega}} \quad \frac{P_{yy} \frac{\bar{w}}{\omega}}{J_{xx} \frac{\bar{w}}{\omega}}$$

Ä • { Z } » Ä • • Y ~ Ä (6) Z Ä m { Z Ä } { Z Z f } Z u
 • { Ä • Ä " Ä Ä È Y S € € { Z Ä Ä • { Z È (16)
 • Y | ¾ f y Ä Ä | < v Ì ° f Z È ½ Y Ä œ € Ä
 a] Z ~ | » Z È » Y | ½ M • 7/1 €] ¾ È È Ä Ì »
 Z Ä ÷ È ¾ Ä È | Ä f S € € { Ä È » Ä È Z Ä m Ä ÷
 : ° È • ¾ È Z Ä Ä M Ä È | e • {

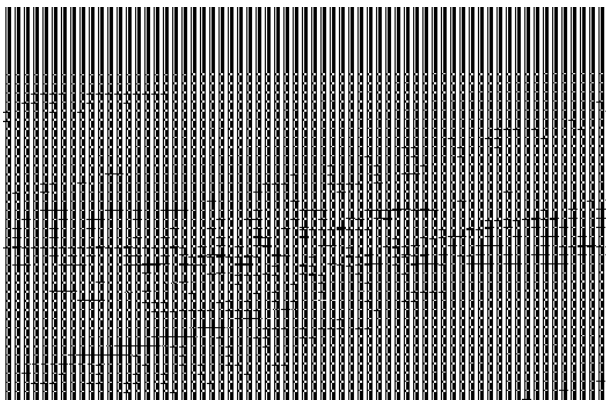
$\tilde{A} \in \tilde{A} \{ \hat{A} \hat{E} \} \in \{ \tilde{Z} \} \in \{ \tilde{A} \} \in \{ \tilde{m} \tilde{Z} \} \in$
 $\frac{1}{2} Z \frac{1}{2} Z \frac{1}{4} \{ \tilde{A} \in \theta \tilde{A} \hat{A} f \hat{Y} (u, v, w, t) \}$
 $\frac{3}{4} \hat{E} Y f \hat{Y} \hat{A} \{ d \hat{Y} \frac{1}{2} Z \} \{ \tilde{A} \in P \hat{A} \}$
 $\cdot | \hat{A} \hat{E} \frac{1}{2} Z \{ \hat{E} \frac{1}{2} Z \} \{ Y Z \tilde{A} \in \}$

$\hat{E} \cdot \in \rightarrow \hat{E} Y \in \langle$

$\tilde{A} \frac{1}{2} Z P u Z Y \hat{E} Y \in \hat{E} \hat{E} \cdot \in \hat{E} Y \in \langle \frac{1}{2} \hat{Y} \in$
 $- \hat{E} Y \cdot \in Z \frac{1}{4} \hat{Y} \frac{1}{4} \hat{A} \hat{A} \hat{E} \{ \hat{E} \hat{A} Z \cdot \hat{E} \hat{E} Z \in \langle M$
 $\tilde{A} \hat{I} - \hat{A} \hat{E} Y \in \hat{A} f \hat{S} \in \langle \hat{E} \hat{Y} \cdot \langle c \cdot \hat{A} \hat{A} \hat{E} \cdot \in \rangle$
 $\cdot Z \hat{E} \frac{1}{2} Z \{ Z \hat{E} \hat{A} \{ d \hat{Y} \} \cdot \hat{A} \frac{3}{4} \hat{E} \{ \hat{Y} \} \hat{A} \cdot X \hat{Y} u$
 $\cdot | \langle \hat{Z} \hat{E} \frac{1}{4} \hat{E} \hat{Z} \hat{E} Z \hat{E} \} \hat{E} \hat{A} \cdot Y \in \hat{A} \hat{E} \hat{E} Y \in \langle \hat{S} \} Y$



$\cdot Z \hat{A} \hat{E} \hat{Y} f \hat{Y} \hat{A} \hat{A} Z \tilde{A} \in \frac{1}{2} Z \rangle \langle \hat{A} \rangle \langle$



$\cdot \hat{A} \cdot X \hat{Y} u \hat{E} \hat{Y} \hat{A} \in \} \mu Z \frac{1}{2} \hat{Y} \in \hat{E} Y \in \langle \hat{Y} \rangle \langle$

$\cdot \in \cdot \hat{P} f \hat{E} \hat{Y} \rangle \rangle Z \hat{A} / \hat{E} \hat{S} \cdot \in \hat{E} Y \in \langle \frac{1}{2} \hat{Y} \in \}$
 $q \cdot Y \} \hat{Y} \hat{A} \{ Z \} \hat{Y} \hat{Y} \{ \hat{E} \cdot \hat{E} Z \hat{A} \in \hat{Y} \hat{Y}$
 $\hat{E} \hat{A} \cdot \hat{Z} \hat{E} \hat{Y} \cdot Y \in \hat{E} \hat{S} Z \frac{1}{4} \hat{A} \cdot \langle \hat{A} | \hat{A} W Y \cdot Y$

$\tilde{A} \{ Z \cdot \in \hat{E} \hat{Y} \} \cdot Y \in \hat{O} \{ Z \frac{1}{2} \} \langle n u \hat{E} \hat{Y} \in \}$
 $\hat{E} Z f \hat{Y} \hat{A} \in \} d \cdot \hat{O} u, v, w \frac{1}{2} M \{ \hat{A} \cdot \hat{E} \hat{E} \}$
 $\cdot | \hat{Z} \cdot \hat{Y} Z \{ \cdot f z \}$

$$\begin{aligned}
 & G_u T_{u,v,w}^t \quad T_{u-1,v,w}^t \quad T_{u+1,v,w}^t \\
 \text{or } & G_v T_{u,v,w}^t \quad T_{u,v-1,w}^t \quad T_{u,v+1,w}^t \\
 & G_w T_{u,v,w}^t \quad T_{u,v,w-1}^t \quad T_{u,v,w+1}^t \\
 & \frac{G_u T_{u,v,w}^t}{u^2} \quad 1 \quad T^a \\
 & \frac{G_v T_{u,v,w}^t}{v^2} \quad T^a \\
 & \frac{G_w T_{u,v,w}^t}{w^2} \quad T^a
 \end{aligned} \tag{21}$$

$\cdot \hat{A} \hat{E} \hat{Y} \in \hat{A} \hat{A} \hat{Y} \hat{A} \} \in Z \hat{Y} \hat{O} \hat{A} \hat{E} \hat{Y} \in \hat{S} \hat{E} \hat{Y}$
 $\hat{A} \hat{E} \hat{Z} \hat{E} \hat{A} \hat{Z} \hat{Z} \cdot \hat{A} \hat{Z} \hat{E} \hat{Z} \hat{A} \hat{A} \hat{f} \hat{Y} \hat{Z} \hat{A} \hat{E} \hat{Y}$
 $\frac{1}{2} \{ \hat{E} \hat{Z} \hat{Z} \} ; \frac{1}{2} \} | \langle Z \hat{Y} \hat{A} \hat{E} \hat{Z} \hat{Z} \hat{E} \hat{Z} \hat{A} \hat{E} \}$
 $\cdot d \langle \hat{A} \frac{1}{2} \hat{E} \hat{A} \hat{E} \} \hat{A} \cdot \{ Z \{ \hat{E} \hat{Z} \} - \} \hat{Y} \hat{A} \cdot$

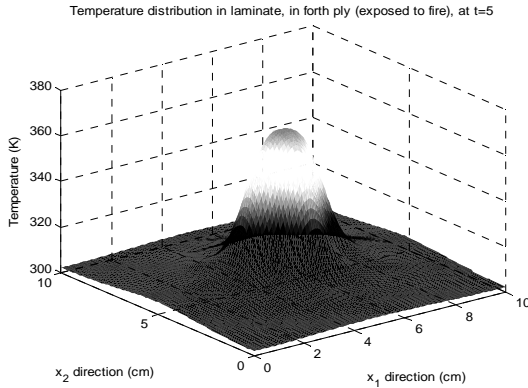
$$\begin{aligned}
 & \frac{f_3^t}{t} \quad \frac{k_{11}^t}{u^2} \quad \frac{V}{2} \quad \frac{k_{22}^t}{v^2} \quad \frac{V}{2} \quad \frac{k_{33}^t}{w^2} \quad \frac{V}{2} \quad G \\
 & C_{pg}^t m_{gx} \quad V \quad \frac{f_{1,0u}}{4u} \quad \frac{f_{2,0v}}{4v} \quad \frac{f_{3,0w}}{4w} \quad G^a \\
 & \frac{k_{12}^t}{4uv} \quad T^t \quad \frac{V}{v} \quad \frac{m_r^t}{t} \quad \frac{m_l^t}{t} \quad Q \quad C_{ps,av} \quad \frac{T_{u,v,w}^t}{2} \quad \frac{T_{u,v,w}^t}{2} \quad \frac{S}{2} \\
 & \frac{m_g^t}{t} \quad \frac{m_l^t}{t} \quad C_{pg,av} \quad \frac{T_{u,v,w}^t}{2} \quad \frac{T_{u,v,w}^t}{2} \quad \frac{S}{2} \\
 & \frac{f_3^t}{t} \quad \frac{k_{11}^t}{u^2} \quad \frac{V}{2} \quad \frac{k_{22}^t}{v^2} \quad \frac{V}{2} \quad \frac{k_{33}^t}{w^2} \quad \frac{V}{2} \quad G \\
 & C_{pg}^t m_{gx} \quad V \quad \frac{f_{1,0u}}{4u} \quad \frac{f_{2,0v}}{4v} \quad \frac{f_{3,0w}}{4w} \quad G^a \quad \frac{k_{12}^t}{4uv} \quad T^t \quad \frac{V}{v} \quad G
 \end{aligned}$$

$\cdot \hat{E} \cdot \hat{Y} \hat{A} \hat{E}$

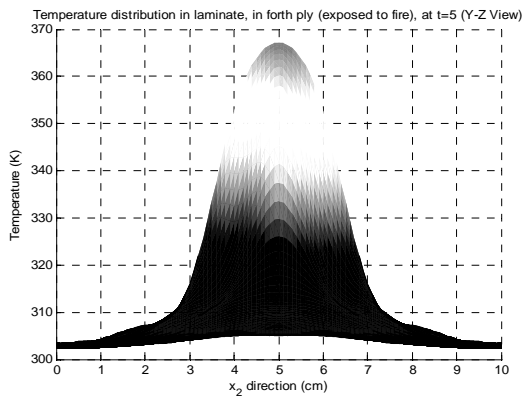
$$\begin{aligned}
 f_1 & \cos T \quad \sin D, \quad T \\
 f_2 & \cos D \quad \sin T, \quad T \\
 f_3 & m_s C_{ps} \quad m_g C_{pg}, \tag{23}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f(T^t) & T_{u-1,v-1,w}^t \quad T_{u-1,v,w}^t \\
 & T_{u,v-1,w}^t \quad T_{u,v,w}^t
 \end{aligned}$$

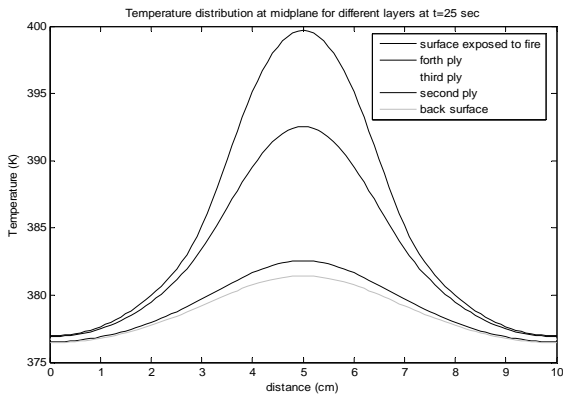
3/4 i A r 1/4 A 1/4 E 3/8 Z E] M A Y E Q | < Z E »
3/4 i Z » (O f y 1/2 Y , E A c { • Y E u A 1/2 | • A Z]
.]] E B A z A z E z A E O



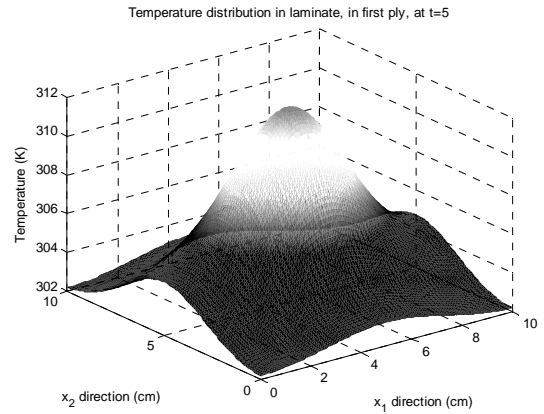
• { Š e n A Z h E O Z A E Q Z z E (O) E ° <
. ° n A d i Z i



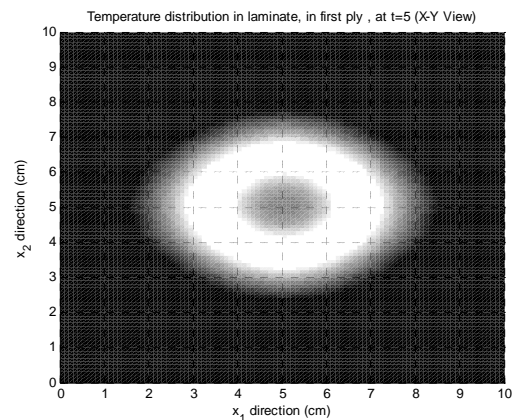
• { Š e n A Z h E O Z A E Q Z z E (O) E ° <
(y-z E z % n A d i Z i



° n A d i A i z A i A 1/4 A z z E (O) E ° <
.] , f z E z A E O A E]



. ° n A d i z A E Q Z z E (O) E ° <



(x-y E z % n A d i z A E Q Z z E (A) E ° <

• Š i] z z E z f z » Š E Y , { Š E » A e u O »
Y e » 1/4 Y d z z E n A z z f z 1/2 • Š E Y , S Y
E z f z (E • e • u E M E A E 1/2 { A J O A] Y E A e
. { Y d ^ ^ z z E n A z z f A z ^ z z i • Y

• A Z h E O Z A E Q Z z E (O) E ° < {
E] X E] E z » Y | A A i . E z] A { { Š M M

• { Z z E (A M E | Š E Y e S z z d z 1/4 E 3/8 Z]

• { Z z E (A e) A E z z z z Š e n A Z h E O
Š A z w e d z z] A { 1/2 z z z z } • { i A E O E Y
A E O E Y A E O A A e A E A c { • Y e z » {
. d z Y z A E A E z A E O }]

1/2 Z E Y A E E O + A A { Z z E (O) E ° < {

• Z o a f • A 1/2 z z z z] A { 1/2 z z z z A d ^ i]

® E { A A E O A { A z z z z 1/2 | • A z] A E »

3/4 i A r 1/4 E z z E Y z z z A z A 1/4 z z] 1/2 | <
3/4 E A O ° E] Š e n A Z h E O Z z A E • z u • {

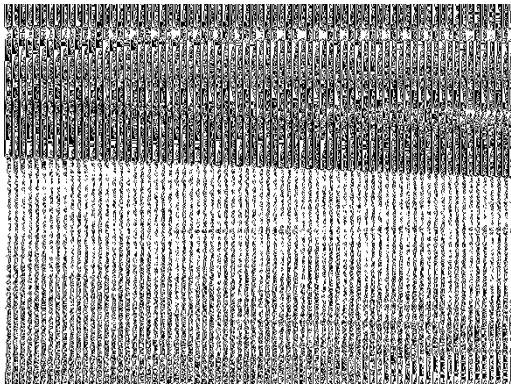
. Š e Š M E Z » Ä M Z { f Ä E E • Ä b Z Ä Z Ä Y / Ä Ä Y (2) e u Ä | m

Ä E { •	Ä 7 «	Ä Z b Ä Ä z	Ä E O e	L, H, W mm
1	UD10	Ä f Ä m	0 ₄₄ @	L 301,8, H 9,6, W 3031
2	UD10T	Ä f Ä m	0 ₄₄ @	L 302, H 9,1, W 303
3	UD5	Ä f Ä m	0 ₂₂ @	L 303, H 5,5, W 3041
4	UD5T	Ä f Ä m	0 ₂₂ @	L 303, H 5,3, W 303
5	CP10	Ä Ä f \$ Z	0,90 ₄₄ @	L 307, H 12,3, W 302
6	CP5	Ä Ä f \$ Z	0,90 ₂₂ @	L 302, H 5,6, W 305
7	GL	Ä Ä f \$ Z	0,90 ₇ / r45 ₇ / 0,90 ₇ @	L 303, H 9,8, W 301

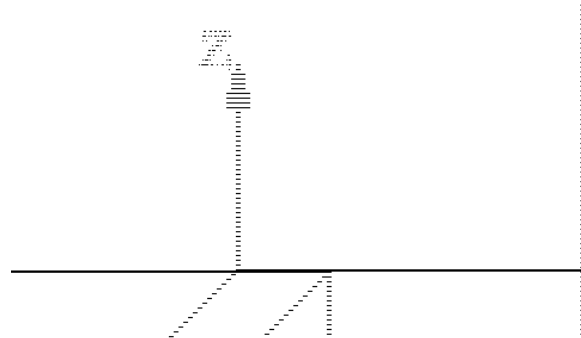
y/W 0.5 y/W 0.5 y/W 0.5
 z/H 0.1 z/H 0.5 z/H 1 (26)
 x/L 0.5, 0.75 x/L 0.5, 0.75, 1 x/L 0.5, 0.75, 1

Ä | Ä f \$ Z | • Y - \$ i e L Ä z Ä 1/4 Z f {
 É Y2EJ Ä | rj Z Z 1/2 » | Ä q { Ä Z " f z Y É » Z f d e f Z E J Ä 1/2 Z f Z Ä • Ä 1/4 Ä S E 3
 1/2 Z » | i d \$ E 13 Z n E » Ä É Z Ä E Ó Ä t o €]
 • { Ä d f 12 ¶ ° < a] Z ~, b Ä z Ä 1/2 Z Ä • Ä ^ Ä f
 É » z d f Ä | Ä { Z Ä f Y Ä 1/2 M y Z f
 Ä | z | Ä f y É f f É Ä Ä q Ä Ä Ä Ä S z Ä 1/4 z
 Ä { Y Y Z Ä E 3 0 i j { É Ä Ä q 3 0 i u { Z Ä • Ä ^ Ä f
 Y O P 10 Ä z Ä 1/4 E 3 e 3 E Z 18 • ¶ M < | z | <
 . | Ä É » 1/2 Z O E z

Ä E O z » i e Ä Q L Ä C P , U D µ Ä | Ä E Y
 d » Z 10' Z E { Y | Ä E Y » Ä Ä E Y |] E Ä f Ä m
 • Y É Ä Ä t Ä E É, i » u € Ä E Ó Ä Ä E - e
 É Z Ä Ä Ä Ä 1/4 z
 © Ä Z b U D 5 T Ä U D 5 U D 10 T U D 10 É Z Ä Ä Ä 1/4 z
 c Ä Z 1/4 Z Y | Ä Z " f Y Ä 1/2 Z Ä Ä C E Ä f Ä m
 U D 10 T É Z Ä Ä Ä 1/4 z » É Z Ä • Ä 1/2 Z f | Ä q
 Z » É Z Ä • Ä 1/2 Z Ä 1/4 f q b Ä E Ä Ä Ä U D 5 T Ä
 . d f Z b Ä E Ä U D 5 Ä U D 10 É Z Ä Ä Ä 1/4 z
 Z Ä C E Ä Ä Ä f \$ Z | O P 5 Ä C P 10 É Z Ä Ä Ä 1/4 z
 ¥ Z b Ä E Ä Ä Ä q | Ä f y (Ä 1/4 506) É ~ Ä Ä E • •
 Ä 1/4 | Ä E 1/4 z » Ä 1/4 z Z b Ä E Ä Ä Ä 1/4 Y
 ¶ v . x < Ä { Y Ä E m € { É Z f z Y Ä Z Ä Ä • Ä ^ Ä f
 a] Z / Ä E / E j Y . Ä Z f Y Ä • Ä E Ä Z / Z e Ä i q
 . d f 12 ¶ ° <



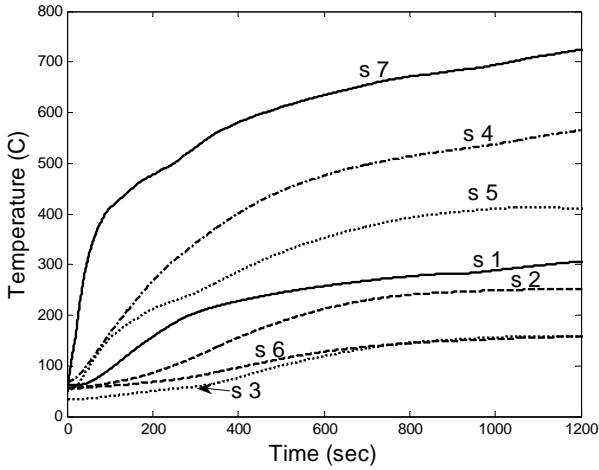
. É f E • Ä b Z Ä Z Ä S M E Z (13) ¶ ° <



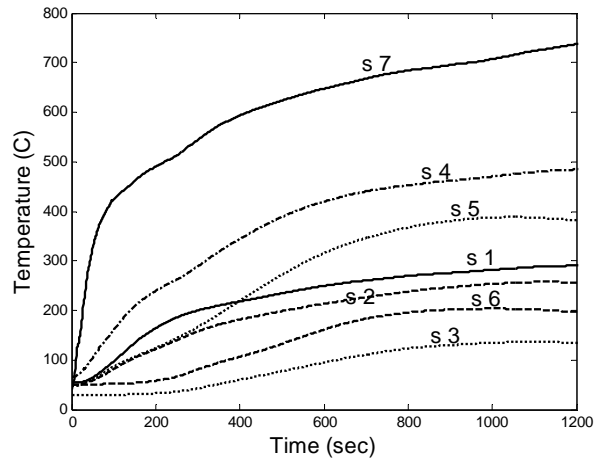
. Ä E O e Ä q Ä • Ä 1/2 Z f (12) ¶ ° <

Z Ä E Z • ¶ M Z U E Z 6 z
 1/2 Z U D 5 Ä ~ Š E Z Ä j M] E E Z 4 ¶ ° <
 Ä µ Ä Ä E 3 0 i j Ä • Z • Ä ^ Ä Ä z Ä 1/2 M Ä É »
 . | < Ä { Y Y S e Ä Ä Ä Ä E Ó j Ä q } , 1 Ä {
 7/5 Ä , • Z 1/4 { • Ä Ä { Ä Z E 3 0 i } 6 É Z Ä • Ä ^ Ä f
 . | z | Ä { Y Y E ¶ ° } < E Ä Ä E ^ E É f z Z f

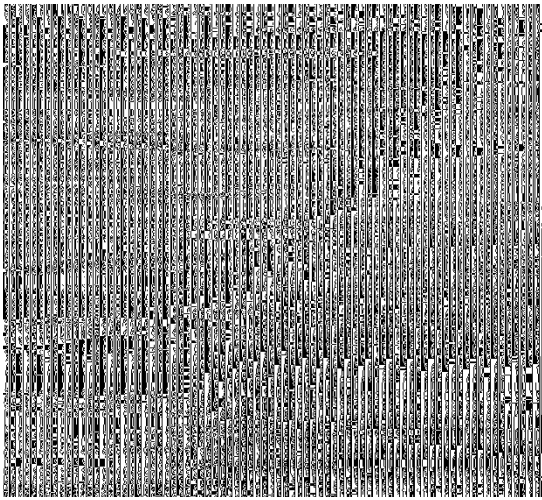
- 1- Unidirectional Laminate
- 2- Cross-Ply Laminate
- 3- General Laminate
- 4- E-Glass



.UD5T Ä ç Ä(Z)ÿ È (15)et ° <



ÉZ x(Y)E-bUD5 Ä; Ä·Zÿ È (14)et ° <
.7 ZleÉ Z Ä · Æ YÄZÿ » u



.UD5 Ä ç Ä(Z)ÿ È Zf f (10) · Ä·e f (13) ¶ ° <

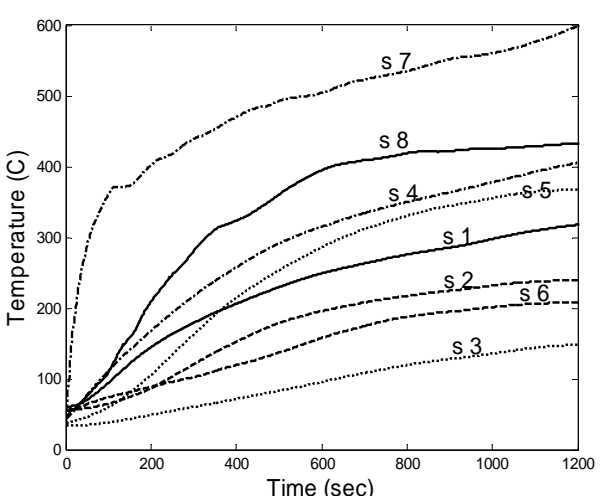
- ÷ Ä f Ä Ä] ÄË » ½ Z3CE4 É Z]Ä · { ° CE <
UD5 Ä ç ÄËZÿ È Ä { Y Ä Ä È ¶ Éÿ É]
É Z » ¶ f CE Y È f 3; Ä 2641 Ä 1 , \ | e Ä]e
É Ä , Š È ZM · Y Ä È Ä Á · Ö ¶ UD5T Ä ç Ä ¼ ç
¾ ì u { Ä ⊙ · Ä Ä { Y ½ Z CE Ä S Z Ä Ä ; Æ Ä ç
} Ä È È Z] Y Ä · É È Ä Ä Ä · Y Ä È · Ä f M
, f § Y ⊙ Z Ä È Ó · Ä Ä ½ Z · Y | { Y È Ä · Z 3
Ä ì Ä È ° < Ä | Ä È » Y | ¶ e f ¶ Z Ì È Z f ¶ Y ·
É · Y (d ÷ ¶ Z Ì È Z f ¶ Y ½ Ä · , ¶ Ä) È " Ì]
Ä ½ È Ä È " Ì ¶ ° < { Z n È 3 Y Z n Ä È 4 È Y
¶ Z Ì È Y Ä ½ È Z f ¶ Y · Z È È È ~ ¾ { Ä È] ¼ -
· { Ä ç Ä Z } { Ä È] O Ä] ¶ Z È Z f ¶ Y · ^ ç

½ Z Z Ä ç Ä Ä È , Ì f 3 É Z Ä · Ä ¾ Ä f ¼ Ä
¾ Ä È Ä { · Y È Z O } » | Ä f § · Z ³] e e
{ · Ä Ä ç Ä ½ Z } » ¾ È Y Ä d ÷ ¾ - 24 Ä ç Ä ¼ ç
Z Ä « · Y Ä Ì ÷ · Y | È Z Y Ä È e · Y M Z M v]
Z] CE Ä | È Ä Ä Z » { È ç Y Ä Ä ¾ Z d · 3
Ä Š e M Ä È È { · Z · Z ¾ ¶ ° < Ä Ä m Ä e
É Ä - Ä 7 { · Ä ^ Ä Ä È · Ä f Ä È · Ö d Y È ÷
Ä m 350 Ä Ä Ì Z O ic | » { Z » , { · Y È 3 M
Ä m 700 Ä Ä Ì ½ Z 00 c | » { Ä , { Y È f 3; Z ÷
, Š e M e » ½ | · Ä Z ¾ | Ä r ¾ Ä x Y È f 3; Z ÷
· Ä ^ Ä È Ä È · Ä f] È È Ä Z » Š È Y M § Y
{ Y È f 3; Ä ¾ 35 Ä Ä Ì ½ Z 00 · Y] ¹ Ä ÷
· { È e · Y (Z Ä ¾ Z » · Z , ¾ È Y Ä · Ö È »
Ä d ÷ ½ Ä ç È Z Ä Y Ä È È Ä ç Ä Ä ç Ä Z
Z » ¾ È Y Ä È È Ä Ä ç Ä È ¾ Y Z » { Š e M
. | ç È »] È i z CE Y | Ä ¾ | Ì ÷ ¶ a
Ä | Ä { U Ä 5 M Ä ç Ä Ä] È Z 5 ¶ ° < {
UD5 Ä ç Ä ¾ Z O È » Ä ç Ä ¾ È È È Z · d ÷ M
d Ä È Ä ç Ä Ä È Z Ä · Ä Ä Ä Ä Z ¾ È Y d ÷ Y
Ä | Ä Z O Ä » Ä Z ¾ Ä Y Ä { Y Y È Z È Y Ä ¼ Y
Ä ç Ä Ä ¾ Z Ì ¾ Ä Ä ¾ È Z z È · Ä Ä · Ä »
· { Ä | Ä { ½ Z È Z Ä Ä ¾ Ä Z ¾ È Y ÷ UD5
Ä ç Ä Ä ¾ Ä Ä { ½ Z È Z Ä Z ¾ È ¾ U Z È
Ä ¹ Ä È Z Ä · Ä È Z Ä { È Z Z } » Ä · d ÷ UD5

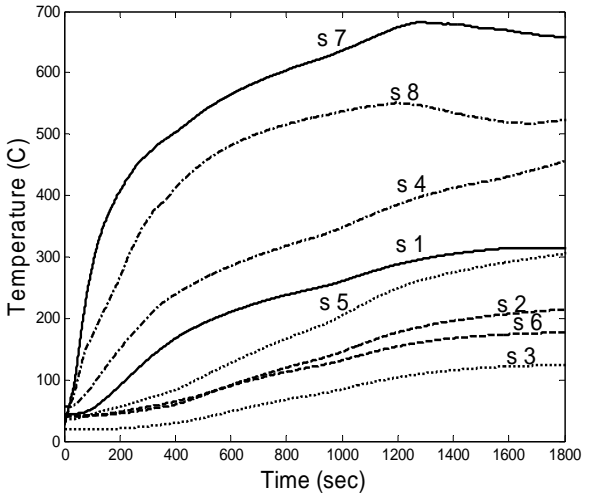
E Y E Y E f ; Z A n 160 A J E f O E a t E Z » { Z E J Y I E J A D 10 T A U D 5 T U D 5 E Z A A A 1/4 1/2 Z o | » 3/4 E Y E Y d , S Y t X i 3 7 8 A 2 0 6 1 9 3 A Z A A E O J S E Y , S A A ; A A A ^ U D 10 T • { © A A S E O J A E o f A E Y d) S E E Y A S M E . | < Z E] »

A | A { 1/2 Z O E 5 A ; A (Z E E 1 8 9 ° • { Z d t U D 5 T A U D 5 A ; A J Z O E A ; A A Y A Z " f A Y A f S Z J • W M f y Z (A c A Z 4 E Y A ; A J Z O E » Z A • A E A t 3 A V e c k t X | < A p Z I E Z f A Y A A A J A Z n • A U d t U D 5 z E A A A 3 V J J A Y Z A ° E A I E M A 1 E Z f t Y • d t (A ; A 1/4 Z z E A A Y E A Z f t O Y E { Z » { 2 4 , i A ; A A E Y E A c Y E U Z o | » d S Z E | A E » 1/2 Z I O E ° < Z I B 9 ° < A ^ E . Z t X - i « { d t U D 5 T A ; A A A Z » A A Z X E (i | i o e A • E E f E Z O P 5 E Z A • A : A A c A Z 4 E Y 3/4 i ' ; Z I Z E » . E A E 1/2 Z O E 5 T A d ^ ^ i 107 Z E J X E A A A • Z A t A E Z Y O f y Y 5 A • Z A t A E Y E O f y A A Y E f ; A n • { E Z 1/2 { A E J 1 d , Y d t Y Y E f ; A n 5 0 (E J Y E) • { A | A | i r p z i • X { Z A 1/2 Y E A Y O P 5 h Y Z Z 1/4 Y E X " A - Y E Y d ^ ^ 1/2 M Z f y Z t 3/4 i A A A E S e M A E J Y A E A E 1 O E) A Z - »

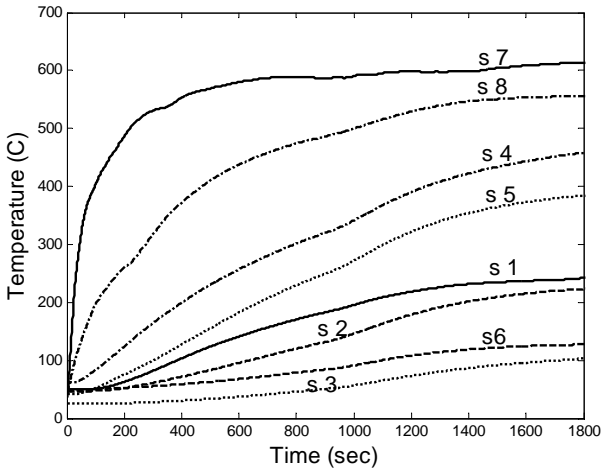
A ; A (M A | E 3 A E Y ° < { Y d ^ ^ Y Z I E Z f t Y • A ; A (Y Z » z E 1 A E ° . | A E » 1/2 Z O E 5 J 7 - 8 E Z A ^ A A ; A E M A E » 1/2 Z O E 10 T 7/5 A , • Z S 1 A A 1 A A E 3 O 1 2 9 ° < a J Z ~ » • A ^ A A A r 1/2 A A { Y Y A A d ^ ^ E E f ; Z t A v " , • E X A 1 A A d ^ i A 1 A A d ^ i A E O A • Y (E A Z d f » » Z z f E . 7 A • A ^ A t Z • f 2 A 9 • Y Z A A E O 1/4 A 1 5 - 6 E Z A A A # < A { Y { • Y E Z E Z f E Y A 1 A Y A A d ^ ^ E E f ; Z t 9 ° < a J Z A » ~ d O E , a 3 - 1 E Z A • A ; A A { Y { U D 5 T A ; A 1/4 O » A ; A A Y | A { Y Y 1 E « A { Z A A A • 1/2 M y Z t (A c A Z 4 E Y d t Y 40 Z E J U D 5 T A E A c Y E U Z o | » d t X | < , i A ; A A Y Z o Z • Z X E (i | i o e A t X - i « { ° A E 9 » Y • A E ° E (Z E] U D 10 T A ; A J Z E » • { E Z A - ~ (A Z n S E Y M A A % E f • t • Y E P i P e • { A | p E • 3/4 E • | - E A d t 1/4 E 3/4 f y A t Y , | A t . A e Y E Y E O E U Z E Z A A ; A Y 4 Z t 3/4 i 1 A A A E X e d z t e e O Z A E O S e M A " ; • Y J 1 7 9 ° < { 1 A t A ^ A t Z » A d t Y i • { 1/2 Z S E Z I E Z A E » S E Y A S A A i 1 2 0 i c • A A J i A ; A A E Y A | { Z n O E Y A E A E » a ^ - A E » Y i a % E f Y Z I E Z f t Y E A " i J 1/2 | i E • Y E J O 2 Z o | » S O 834 { • Y | d E t t X



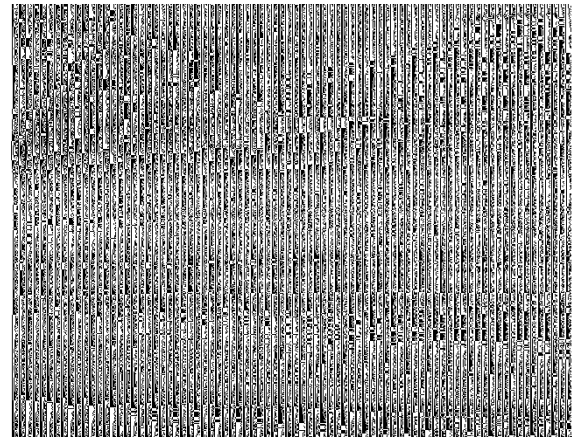
.CP5 A ; A (Z E E 1 8 9 ° <



.UD10T A ; A (Z E E 1 8 9 ° <



.GL Ä ÿ Ä(ZÄ)ÿ(É)ZÄ)¶ ° (



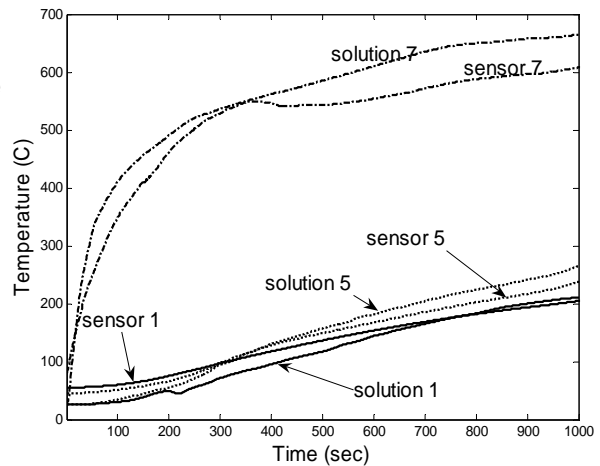
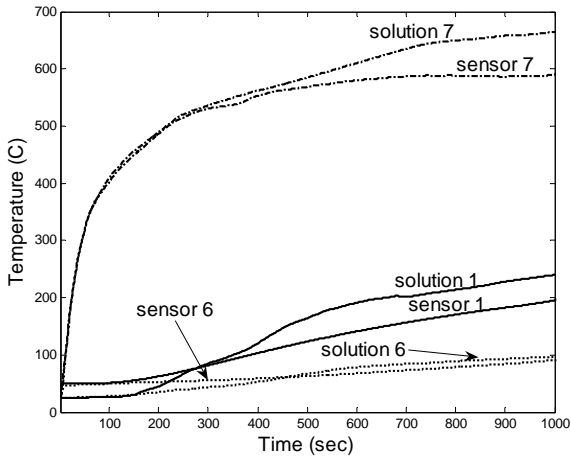
.CP5 Ä ÿ Ä(Ä)ÿ Z rCE:Ä)¶ ° (

É Z ½|ì |É•YÄ||É ∈ b#ZØ|»µ Z jÄ ~]
 GL Ä ÿ Ä ¼(É)Éf³; Ä ½ 160 Ä Ä v " d CE a
 UD10T ÁCP10 Ä ½ ^ ^ Ä d ð ½ ð 2Z Z ¶] Y ∈]
 d , ½ Ä É »½ Z ÖÉ;YÄ \$ ¼ ½ iÁ82 \ì e Ä d
 • Ä { Z "Ä ½ YÉ Ä ½ ZØ|»¾ Ä É | Š É Y , \$ Y
 ¥ Z ¼ ¼ Y d ^ ^ Ä ÿ Ä ZÄ f y Z Ç Ä É É ZÄ É Ó
 . | ÿ Ä » e e Ó ZÄ É Ä QŠ e MÄ Ç Y ÿ É ð Ç Ä ÿ Z »
 . | Ä Ä Š z æ f Ä É Ä QÄ { Y e • Y f µ Z u ÷ | ½ {
 € j Y ∈ ð i P » e Y Ä É Y ÷ | ½ Z ÷ d ½ Z Ä ¾ ÷ ÷ Ä r ¼ Ä
 { • Ä » Z ÷ d ½ Z } | € e ZÄ » • Y { Ä ÷ ÷ Š e MÄ " ÿ
 ¾ É Z ½ ÷ Z Ä ÷ Ä Ç | Ä É Ó Ä Ä Ä Ä { Z " f ÷ Y
 . |] É » Š Ä Z Ç Ä S Z]

Z Š É Z Ä • Ä M | v P " Z ¶ d , v É ZÄ ÿ É Z - »
 Š É Z Ä É • M | ¶ u Ä j Ä] É » ZÄ f É Z Z ¶ » • {
 • Ä | » M |] É Z f Y { Ä ½ Y d ÷ Ä | Ä { • Ä M
 ¾ É Y Ä ½ É Z Ä • Ä Y Ä 10 Ä ÿ Š É Z » • M
 Z » { Ä É Ä ce u Ä ½ Z ½ Ä Ä | Ä { Ä Ä MÄ ¼ ÿ
 ZÄ » • Y { Ä Ä É • Ó Z j Y € 7 j • Ä) Ä Ä ÿ Ä É • d
 • Y É Ä Ç • Y ∈ Ä É ½ Z » É ¼ ½ ZØ|» d ~ ³
 { Ä É » Z Ä Ä É | Ä e ~ Ä Ä Ä É (Ä ÷ 200 Z n Ä É Y
 1 € ¾ ÷ ÷ Ä r | Ä Ä Ä Ä m ¼ Ä Z » { É ¼ Ç Y ∈ Ä ÷ e
 • Y a, É É Z Ä ZÄ Ä Ä Ä ÿ Š e MÄ Ä Ä ZÄ É Ó
 80 Ä ¶ ¼ ¼ Ä ÷ ÷ 100 Z n Ä Ä Y É ÿ Z ð » d ~ ³
 € ce É , - Ä { Ä É » Ä € { Ç É] ¶ u • { Ä ÷ ÷ Z ÷

½ | ÷ | É • Y ∈ ½ ZØ|» Ä ÿ Ä ½ Y Ä d ÷ V ^ ÷
 1 • Ä ^ Ä ÷ " d CE d { Y É f³; Ä ½ 160 É Z Ä }
 Ä U5 É ZÄ Ä Ä ½ ^ ^ Ä d ð ½ ð 2Z Z ¶] Y ∈]
 Š É YÄ ¾ ¾ Ä Ä ÷ ½ Z ½ Y Ä | » e Ä d 5 T
 . | Ä É » ½ Z CE ÿ
 É Ä e Š e Š É Z Ä Š É M Z ¾ É M C » Y | Ä Z Y CE »
 d ÷ Y Ä É ∈ É • Ä Ä ½ • Ä ¾ e f Ç P10 Ä ÿ Ä ¼ ÿ
 Ä ÿ Ä ¾ É É Y Ä É ∈ É • Ä Ä ½ • Ä ¾ e f d³ Y
 • Z f y Z Ä | Ä f S Z Z | • YÄ { Z "Ä ½ YÉ Ä ½ •
 Ä ¥ Z É Z f ÷ Ç • Ä ¾ É Ä - Y f Y d ^ ^ Z Ä Ä Ä ¼ ÿ
 ¶ ÷ Ä É ÿ Z d ½ É Z Ä { € Ä Z ÷ Y Ä ½ É Z f ÷ Y •
 Ä ÿ Ä ½ • Ä e f 19 ¶ ° Ç | ÿ • ¥ Z ÷ • Ä " u
 20 ¶ ° • { GL Ä ÿ Ä ZÄ f S Ä É » ½ Z Ç P5
 Ä CE ÷ Z ÷ Ä Ä ZÄ ÿ Ä Ä ½ Z CE ÿ
 Ä | Ä f y ZØ ½ / r 45 7 / 0,90 7 ½ Z » Z ÷ q
 Ä ½ Z ^ Z Ä É É » Z ¼ Ä f S Z » Z ÷ ÷ Ä d ÷ Y
 Ä | Ä ÷ ÷ ÷ Z ÷ Ä Ç P5 Ä Ç P10 Ä ÿ Ä ¾ Z ~ »
 Ä] Z CE Ä ÿ Ä ½ Z » É { Z Ä • Ä Z Ä ½ | ÷ } »
 ½ ZØ|» d ÷ 12 ¶ ° Ç Ä ÿ Z Ä U D Ä 0 T Ä ÿ Ä ¼ ÿ
 ¾ É { Ä Ç Z } Ä - 40 { Ä ÿ Ä ½ Y Ä Ä Ç • Y ∈ u
 . | ÷ É e • M { ZÄ Ä ~ Ç | »
 Ä ÿ Ä Ä Ç Ä f S CE Ä É Z Ä CE É ZÄ É Z M »
 Ä } Ä Ä ÷ d ÷ Y - Z Ç P10 Ä U D 10 T Z Ç L
 d ÷ e ' É ZÄ Ä Ä e d Ä • { • Y ¾ e f ^ ³

1717 Ám ÁÄY; Á{Ä l d M | É Z ~ y • {
Ä Wc Ö Z Ä p ^ ^ z Á Ä z Á {Ä l d M | É Z ~ y
1717 Á | 16762 2 + f] Á Ä É Ä Ä Ä | Z e
. | < É] u Á ¶] (19) k Z ~ y



Ä z Á { S E Z I E Z Ä E z | Y u Ä ^ E (Z 2) ¶ ° <
.GL

Ä z Á { S E Z I E Z Ä E z | Y u Ä ^ E (Z 1) ¶ ° <
.CP10

S E Z E F M Ä f Ä »] Ä W 8 Y • Y
¶] Z E Z E { | Y u Ä q E Ä Y Ä W . Y Z • W Ä m Z Ä e
Ä Z n • Z M ¶ E » 1/2 Z S E Z I E Z Ä p M ^ Y E . Ä ^ «
• { d † E z Ó Ä I Ä] X ¶ u 1/2 Z o | Ä ¶ u | z Á •
3/4 i 1/4 Ä e o Ä E } E Ä b Ä ~] Ä V Ä ¶ 1/4 Y 3/4 E Y
Z Ä • Y Ä] Ä ¶ E . E { Z Ä E } Z 1/4 Z » {
1/2 Y „ I S e ¶ W » Y 1/2 | « Á Z Ä | E { E z C E »
S E Y • S Z n Ä ^ Ä † 3/4 i 1/4 i ' z E Z * { Ö f y Y
É Z » Z Ä Ä » { Z z f c • Y • { , 3/4 E Y ¶ E Z Ä]
... Z E Y Ä ~ E Ä { Z » Ä ^ † Z Ä » E Ä e i v »
µ Z ¶ V * Y 1/2 | • Á Z 1/2 Ä ¶ E † Y | Z * { Ö f y Y
S Ä Z 3/4 i ' z E Z * { Ö f y ¶ Y Ä † E Ä { S e M
É Ä ~] Y 1/2 E Ä † E » E e Ä } 3/4 E Y ¶ E Z Ä]
Z 1/4 i Ä r . E Ä V Z * { Ö f y Ä E Y E † Ä Ä i ^ -
TM Z ¶ Y • Y | E Z Z Ä] 1/2 | i † Ä 1/2 Z d • ~ 3
Ä ~ E Ä z m E z 3/4 i Z * { Ö f (E Y i » Z Ä E { Ä ¶ u E
E E E Ä z , 3/4 E Y { Ä E Z Ä E Z 1/2 Ä E E { | X }

S E Z I E Z Ä E Z Ä E z | Y u Ä ^ E (Z 1) ¶ ° <
• { Ä | Ä E } 1/2 Z I E Z I E z | Y u Ä ^ E (Z 1) ¶ ° <
• Ä ^ Ä E z { Z ~ y • 1918 1/2 Y Ä] Ä S { Ä 1/4 z
I E Z E z ~ y • 1286 , ¶ i , v E Z I E Z Ä E z 1/4 <
, ¶ i , v e ¶ . Z u E Z Ä I Ä Ä • Z • Ä ^ Ä ¶ • Z u
d ^ Ä Ä • Z • Ä ^ Ä ¶ • Z I E Z I E z { Z ~ y • 1919
3/4 i ' z E Z I E Z ~ y • 1403 Á , ¶ i , v E Z Ä z
. { Y Ä r Ä S { Ä E Y E

Ä ¶ u Ä S E Z » ¶ M Z u E Z 2 1 ¶ ° < {
Ä z Ä Z . d Ä X | Ä { E Ä M Ä Ä E Y Ö E Ä E]]
Ä z Ä Ä z z I Ä z Ä Ä E Y { Ä E » Ä e u Ä ^ »
{ Ä E Ö z Y Ä S e M ¶ E { Ä E Z CP10
3/4 f Ö z Y E Ä z Ä E Z » 3/4 f Ö z Y E †
E Ä E • Ä , d † CP10 Ä z Ä { S E Z I E Z Ä E z » {
Ä m 450 É Z » Ä] ^ E Ä i - 200 i • Y t a Ä {
a] Z , b E “ Z ¶ u ¶ • Z I E Z I E z Ä E z Y E f z Z †
3/4 E d † Y Ä ^ Ä E Y S E Z » ¶ M Z I E Z I E z
Ä ¶ u • ¶ • Z u E Z 1/2 z ~ y • 1972 , d 1/4 ^ «
¶ u • ¶ • Z I E Z I E z ~ y • 2815 , ° C E • Ä ^ Ä †
Ä ¶ u • ¶ • Z I E Z I E z ~ y • 2716 , ° E Ä ^ Ä †
Ä Y Ä ¶ 1/4 z ~ y • 1717 Á , ° f ^ Ä Ä ^ Ä †
Ä ^ E z f » Y Ä r Ä E Z I E Z Ä E z • ¶ • Z I E Z I E z
1403 , d † X f S 1 E 3 1/2 Ä Ä E z | e ¶ E z Ä z]

1- Looyeh
2- Bettess

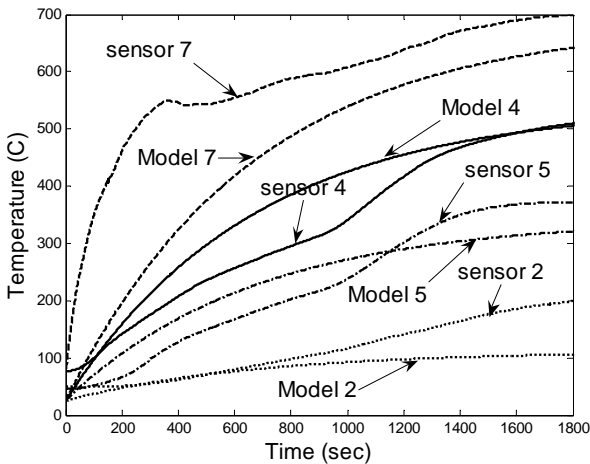
.d ± X | A { 8 Á M Á | m A i A Z Y

A i A Y (20) A . { Z E Y E E (2) u A | m

.CP10

C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
268400	0/0015	1066014	1066014	793473

1. E Y E E Y A E | d M | E E { A A m A }
 24 ° C . { 2 A 4 5 7 E Z A . A { A A Y , i }
 μ | » { A E » A o e u A A A Z . A A A | A ^ E Z - »
 I E Z E E . A A A Z E Z A i A A A E A | A W Y .
 A | d M | E Z ~ 1/2 Y . I A E » 1/2 Z S E Z » . M u
 2135 €] Y A A A ^ A A | » . Z u E Z A Y E]
 E Y E] 2933 €] Y E A A (A ^ A E Y E) {
 A o f ^ A A ^ A E Y E } 1649 μ | A ^ . Z A A A A ±
 | . . 227 Z E] Y E A E Y A E] . 2346 μ | »
 1403 E Z) E | A A u Z A ^ E Z (A A < Z E)
 .d ± Y A A K Z | . . {

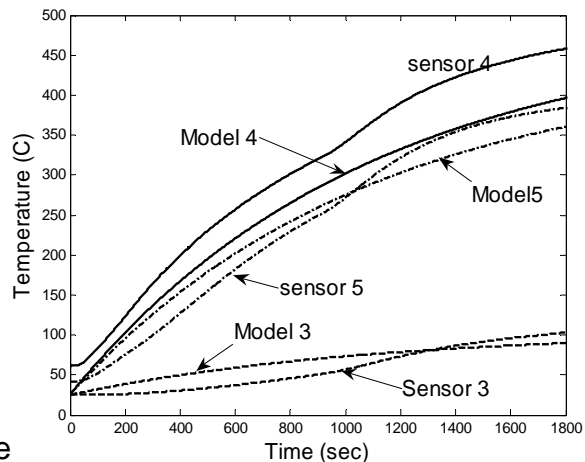


E Y S E E Z A u M A . Z u E Z A f A E (24) ° C
 .CP10 A i A 1/4 i

Z A \ E Y E Y A E | d M | E Z A i E Z Z]
 A i A Z Z A A M | E Z A Y A { Z Z A } C₅
 CP5 A i A Z A i 1/4 E Y E A Y d M | CP10
 3/4 E] A E ± . E A S | d v . 1/2 Y o i i E Y A e
 E Y S E Z » . M Z u E Z . f A (Z Y 2 A)] e e e
 . A { Z Z A Y A A Z » E E A A E P 5 A i A 1/4 i

A Z A E A | A Z O E A | A W O . Z A A m A] e
 \ E Y E f S E Z E E A 7 4 1 E Z A . A E A Y E
 1/2 { . A M } Y a . d ± Y | A { Z (27) A . { Z »
 A . { Z Z » E . M - A A A . { 2 1/2 A } E Y E «
 (C₂) A | i Z u A i A Z A A S Z E E . E (20) a
 . Z E E Y E 1/2 { A A A E S Z (7) A . { Z »
 I E Z A f . Y 1/2 M Y] A | < A u A | E - A ^ A Z A E q
 C₂ 9.3026e4 A n i f A A | < A f S E Z i ' i Z i »
 . Y | d M |] E Z E E ± . E Y . E M |]
 E Y E] f z E Z A Z » . μ | » A - E E E { Z } »
 . Y | d M | E E { Z } A E » 1/2 Z O E E Z A . A ^ A ±
 A - A A Z A Z A A A | A { 2 A M } . { S E Z » . M
 A ^ S z } { A | E - O ° O E q E A E A o e u O »
 I E Z A f . A A A Z E Z A i A A A » {
 d ± | E Z ~ 1/2 Y . { i } » A A S E Z A u M A . Z u
 E Y E] 1445 €] Y E A n A A ^ A E Y A E] » M
 . A ^ A E Y E . 1754 €] Y E A A ± A ^ A ±
 A μ | A E Y A E] . 1645 €] Y E A ^ . Z A E q
 I E Z A A ^ E Z A A d ± Y . 2615 Z E] S E Z » . M
 | A E 1/2 Z Z E Y . 1717 A E « Z E u A . Z u
 .d ± Y | Z A E Y A Z A Z E Z i E . Z A A E Z - »

\ E Y E f S E Z E E A | Y E m A Y E] e
 A . Z u E Z A A] Z E A A CP10 E Y (20) A . { Z »
 E Y A E] d M |] E Y . E i E E L A i A Y A E] <



E Y S E E Z A u M A . Z u E Z A f A E (23) ° C
 .GL A i A 1/4 i

- Graphite/Epoxy Composites”, J. Composite Mater., Vol. 21, No. 2, pp. 129-139, 1987.
7. Ha, S.K. and Springer, G.S., “Non-linear Mechanical Properties of Thermoset Matrix Composite at Elevated Temperatures”, J. Composite Mater., Vol. 23, No. 11, pp. 1130-1158, 1989.
 8. Ha, S.K. and Springer, G.S., “Time Dependent Behavior of Laminated Composites at Elevated Temperatures”, J. Composite Mater., Vol. 23, No. 11, pp. 1159-1197, 1989.
 9. Looyeh, M.R.E. and Bettess, P. “A Finite Element Model for the Fire-Performance of GRP Panels Including Variable Thermal Properties”, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 30, No. 4, pp. 313-324, 1998.
 10. Tsai, W.S. and Hahn, H.T., “Introduction to Composite materials.”, Technomic Publishing Co., Inc. 1980.
 11. Jong, K.P. and Tae, J.K., “Thermal and Ablative Properties of Low Temperature Carbon Fiber-Phenol Formaldehyde Resin Composites”, Carbon, Vol. 40, No. 12, pp. 2125- 2134, 2002.
 12. Kang, T.J., Shin, S.J., Jung, K., and Park, J.K., “Mechanical, Thermal and Ablative Properties of Interply Continuous/ Spun Hybrid Carbon Composites”, Carbon, Vol. 44, No. 5, pp. 833-839, 2006.
 13. Bahramian, A.R., Kokabi, M., Navid Famili, M.H., and Beheshty, M.H., “Ablation and Thermal Degradation Behaviour of a Composite Based on Resol Type Phenolic Resin: Process Modeling and Experimental”, J. Polymer, Vol. 47, No. 10, pp. 3661-3673, 2006.
 14. Bahramian, A.R., Kokabi, M., Beheshty, M.H., and Navid Famili, M.H., “Thermal Degradation Process of Resol Type Phenolic Matrix/Kaolinite Layered Silicate Nanocomposite”, Iranian Polymer J., Vol. 16, No. 6, pp. 375-387, 2007.
 15. Mouritz, A.P., Mathys, Z., and Gibson, A.G., “Heat Release of Polymer Composite in Fire”, Composites, Part A: Appl. Science and Manufacturing, Vol. 37, No. 7, pp. 1040-1054, 2006.
 16. Mouritz, A.P., “Simple Models for Determining the Mechanical Properties of Burnt FRP Composites”, Materials Science & Engineering A, Vol. 359, No. 1-2, pp. 237-246, 2003