

Impact de l'auto-cicatrisation sur les analyses par thermographie infrarouge des matériaux composites endommagés

Self-healing impact on Infrared Thermography Analyses of Damaged Composites Materials

Thiago LUIZ LARA OLIVEIRA^{1*}, Maha HADDED¹, Emilien BOURDON¹, Alan JEAN-MARIE¹

¹ : Capgemini Engineering, Parc Centreda – Bâtiment Synapse, France - 31700 Blagnac
e-mail : maha.hadded@capgemini.com*, thiago.luz-lara-oliveira@capgemini.com, emilien.bourdon@capgemini.com et alan.jean-marie@capgemini.com

Résumé

Cette étude examine la réponse au rayonnement thermique des composites de résine époxy intégrés des capsules auto-cicatrisantes dans divers scénarios, dans le but d'améliorer leurs capacités de diagnostic structurel grâce à la thermographie infrarouge. La modélisation différentielle du milieu effectif a été utilisée pour simuler l'émissivité effective dans les gammes spectrales infrarouges moyennes et longues. La FTIR a été utilisée pour caractériser l'émissivité des matériaux et a révélé que l'ajout de capsules auto-cicatrisantes réduit l'émissivité. Les zones induites par les dommages ont également entraîné des variations de température. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de la conception d'inclusions auto-cicatrisantes pour optimiser les diagnostics thermiques des revêtements ou des matériaux composites, offrant ainsi des moyens de surveillance de l'état structurel pour divers domaines d'application.

Abstract

This study investigates the thermal radiation response of epoxy resin composites embedded with self-healing capsules under varied scenarios, aiming to enhance their structural diagnostic capabilities through infrared thermography. Differential Effective Medium modeling was utilized to simulate the effective emissivity across mid- and long-infrared spectral ranges. FTIR was employed to characterize the emissivity of the materials and revealing that the addition of self-healing capsules reduces emissivity. Damage-induced zones led to temperature variations too. These findings highlight the potential of designing self-healing inclusions to optimize thermal diagnostics for coatings or composite materials, providing means for structural health monitoring for diverse fields of applications.

Mots Clés : modélisation ; auto-cicatrisation ; thermographie infrarouge ; revêtement ; émissivité

Keywords : modelling; self-healing; infrared thermography; coating; emissivity

1. Introduction

L'intégration de technologies auto-réparatrices dans les matériaux composites a suscité un intérêt considérable pour améliorer la durabilité et les performances dans les applications aérospatiales, automobiles et d'ingénierie structurelle [1-3]. Parmi celles-ci, les résines époxy auto-réparatrices offrent la capacité de réparer de manière autonome les micro-dommages, préservant ainsi l'intégrité mécanique et prolongeant la durée de vie [4-5]. Ces ajouts affectent les propriétés thermiques et mécaniques de la matrice, ainsi que leur permettent de se remettre des dommages [6-7]. Cependant, ils introduisent également des complexités dans le comportement des matériaux et peuvent influencer la détection d'anomalies structurelles par des tests non destructifs [8-9].

Cette étude analyse l'interaction entre la concentration de capsules auto-réparatrices et les propriétés thermiques des composites époxy, pour des scénarios endommagés et non endommagés [10]. Une compréhension approfondie de l'émissivité spectrale, des voies de transfert de chaleur et des variations émissives induites par les dommages met en évidence l'efficacité de l'IRT (thermographie infrarouge) pour identifier et caractériser les défauts sous-surface dans les composites polymères [11-12].

En utilisant un modèle analytique et en s'appuyant sur des résultats expérimentaux, cette recherche évalue comment les variations de la teneur en capsules influencent l'émissivité thermique et la distribution de température sous thermographie infrarouge [13]. L'objectif de cette étude est de comprendre la dynamique et le comportement, de prédire la réponse thermique, ce qui offre potentiellement une voie pour optimiser la conception des matériaux pour la surveillance de l'état de santé des structures et améliorer le diagnostic des matériaux en appliquant un revêtement auto-réparateur.

2. Méthodologie

Cette étude s'est concentrée sur la caractérisation et la modélisation des propriétés thermiques de la résine époxy intégrée dans des capsules auto-cicatrisantes dans des conditions variables. La méthodologie a intégré des données expérimentales, des calculs numériques et une modélisation théorique pour analyser l'émissivité et le comportement du transfert de chaleur.

Le matériau de base utilisé était la résine époxy EPON 828, associée à des capsules auto-cicatrisantes produites via une émulsion de Pickering stabilisée par des nanoparticules de silice. Les capsules contenaient deux agents cicatrisants : un agent à base d'époxy (CY183) et un agent de durcissement à base de mercaptan (PETMP). Ces capsules ont été incorporées dans la matrice époxy dans des proportions contrôlées, et le composite a été durci.

À l'aide de données de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), l'émissivité spectrale des matériaux a été enregistrée. Les données de nombre d'ondes de FTIR ont été converties en valeurs de longueur d'onde et l'émissivité a été estimée à l'aide des principes de conservation de l'énergie, en supposant une réflectance négligeable. L'émissivité spectrale a été analysée sur une plage de longueurs d'onde (2,5 à 20 μm), ce qui a permis de comparer les variations d'émissivité pour la résine époxy, les agents encapsulés et les agents de durcissement.

L'analyse a été étendue à des plages infrarouges spécifiques (longueur d'onde moyenne (3-8 μm) et longueur d'onde longue (8-15 μm)) en utilisant l'intégration numérique (règle trapézoïdale) pour calculer l'émissivité moyenne. Pour modéliser l'émissivité effective du composite dans divers scénarios, la théorie DEM a été appliquée.

Les scénarios comprenaient une résine époxy pure comme référence de base, une époxy avec des capsules auto-cicatrisantes ajoutées à différentes fractions volumiques (5 %, 12,5 % et 25 %), ainsi que des zones vides simulant les régions endommagées.

Le modèle DEM a progressivement intégré les contributions des différentes phases du matériau, notamment les capsules auto-réparateurs et les vides. Cette approche a permis des calculs précis d'émissivité effective sur les spectres à moyenne et longue longueur d'onde. Les valeurs d'émissivité calculées ont ensuite été utilisées en conjonction avec la loi de Stefan-Boltzmann pour estimer la température du matériau perçue par un point, comme le détecterait une caméra, sous une faible excitation thermique (10 W), selon le concept présenté sur la Fig. 2.

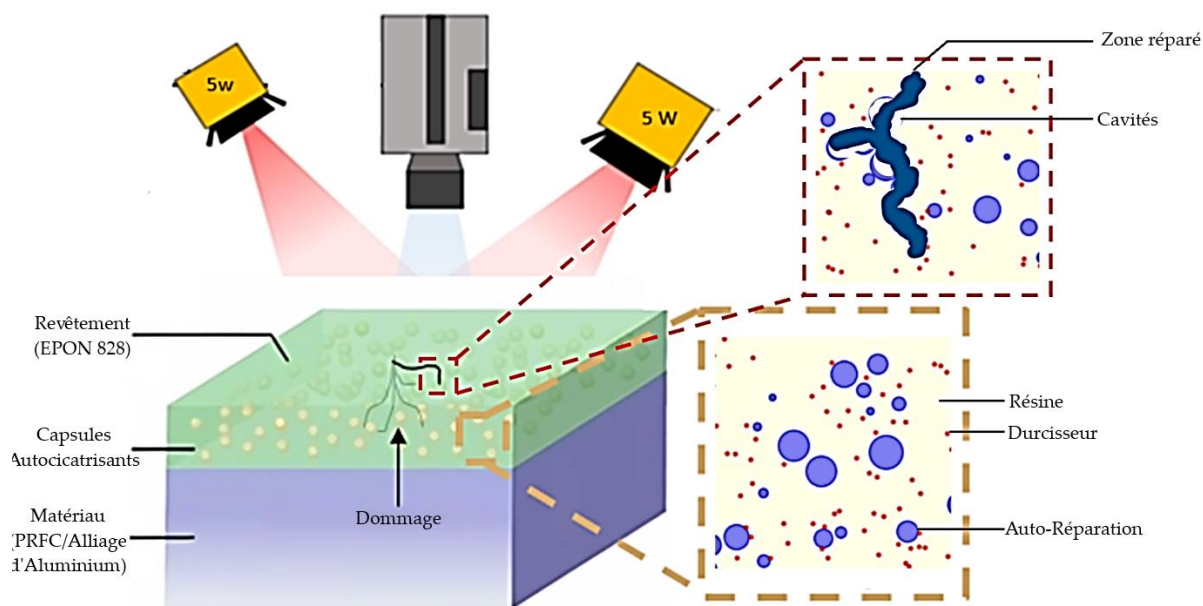


Fig. 1. Représentation schématique de l'étude.

3. Résultats

L'analyse des spectres FTIR a fourni des données pertinentes sur les propriétés radiatives des matériaux. Les spectres de la résine époxy EPON 828 et de l'époxy en général ont montré une similitude, avec des pics et des vallées alignés dans les régions infrarouges à ondes moyennes et longues, comme le montre la Fig. 3. Un résultat attendu, qui a permis de supposer que les valeurs de transmittance et d'absorption suivaient une relation inverse, soutenant les principes de conservation de l'énergie et validant la méthodologie de calcul de l'émissivité à partir des données spectrales.

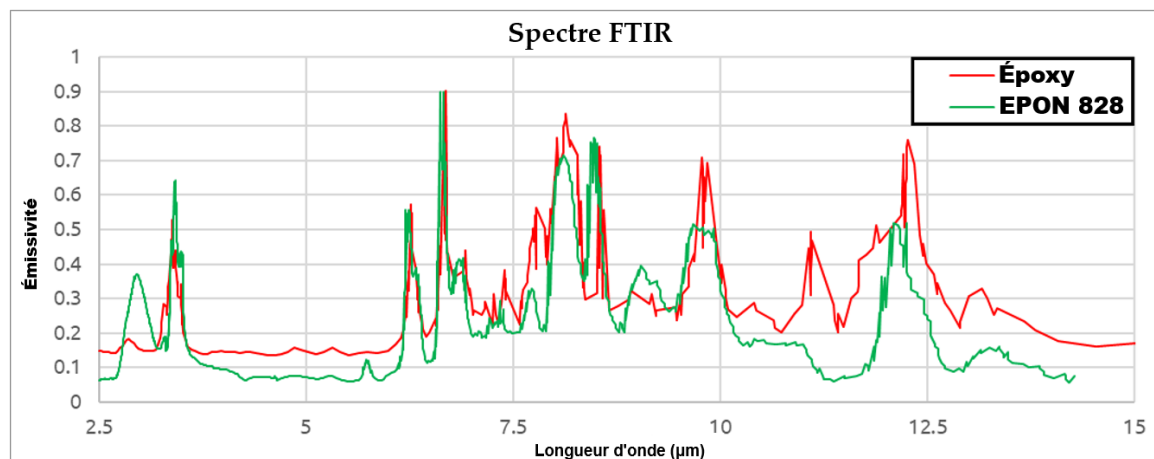


Fig. 2. Spectres FTIR avec l'émissivité de l'époxy et de l'EPON 828 (calculé).

En ce qui concerne l'auto-cicatrisant et le durcisseur encapsulés, le premier a montré une émissivité plus élevée dans la région de l'infrarouge moyen (5–8 µm) par rapport au second (Fig. 4). Les différences sont attribuées à la composition moléculaire et aux interactions radiatives. À des longueurs d'onde plus longues (> 10 µm), l'émissivité a diminué pour les deux matériaux, mais l'époxy encapsulé a constamment maintenu des valeurs plus élevées.

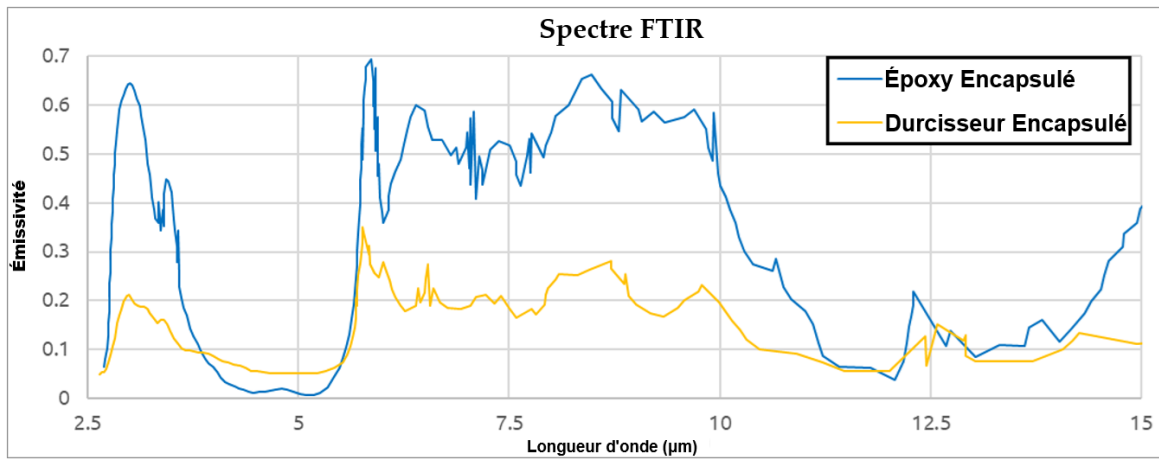


Fig. 3. Spectres FTIR avec l'émissivité calculée de l'époxy encapsulé et du durcisseur encapsulé.

Le tableau 1 présente les valeurs d'émissivité, moyennées pour les spectres infrarouges à moyenne et longue de longueur d'onde, mettant en évidence les différences spécifiques aux matériaux. Tout d'abord, l'époxy encapsulé a démontré des valeurs d'émissivité plus élevées, ce qui le rend potentiellement efficace pour identifier les anomalies de température dans les diagnostics thermiques. En revanche, le durcisseur encapsulé a présenté l'émissivité la plus faible, reflétant une efficacité radiative thermique réduite. L'EPON 828 et l'époxy général ont présenté des valeurs d'émissivité intermédiaires, l'EPON 828 montrant un léger avantage dans le spectre à longue longueur d'onde.

| Matériau/Scénario | 5% | 12.5% | 25% |
|--------------------|-----|-------|------|
| Résine Polymérique | 95 | 87.5 | 75 |
| Auto-Cicatrisant | 2.5 | 6.25 | 12.5 |
| Durcissant | 2.5 | 6.25 | 12.5 |

Tableau 1. Comparaison des valeurs moyennes d'émissivité pour différents matériaux étudiés dans les régions infrarouges moyennes et longues de longueur d'onde.

Afin de transmettre un ensemble de prédictions, l'émissivité des matériaux a été construite dans une modélisation DEM, prenant en compte chacun des scénarios présentés dans le tableau 2. Les résultats de la modélisation analytique sont présentés dans les Fig. 5 et Fig. 6.

| Matrice | Addition Auto-cicatrisant | Scénarios de Dommages | Spectres IR |
|----------|---------------------------|-----------------------|----------------|
| EPON 828 | NA | 0%, 2.5% | Milieu, Longue |
| EPON 828 | 5%, 12.5%, 25% | 0%, 2.5%, 10%, 15% | Milieu, Longue |

Tableau 2. Scénarios évalués.

Les profils de température ont révélé des tendances cohérentes dans tous les scénarios. Des pourcentages plus élevés de capsules auto-réparatrices ont conduit à une émissivité réduite et à des profils de température élevés, ce qui est physiquement attendu. Les niveaux de dommages ont encore amplifié cet effet, les vides induits par les dommages perturbant les voies de rayonnement thermique et augmentant les températures de surface.

La Fig. 5 illustre les variations de température de la résine EPON 828 avec différents pourcentages d'inclusion de CAC dans des conditions de dommage non endommagé et de 2,5 %. Le spectre infrarouge de portée moyenne présente systématiquement des valeurs de température plus élevées que le spectre à longue longueur d'onde, ce qui reflète sa plus grande sensibilité aux variations de rayonnement thermique. Par exemple, à l'état non endommagé, la résine EPON 828 avec 12,5 % de CAC présentait une température d'environ 37,5 °C dans le spectre de portée moyenne, contre environ 32,2 °C dans le spectre à longue longueur d'onde. Les dommages à 2,5 % ont encore élevé ces

températures à 38,1 °C et 32,6 °C, respectivement, ce qui indique que les spectres de portée moyenne sont plus efficaces pour détecter les anomalies mineures induites par des dommages.

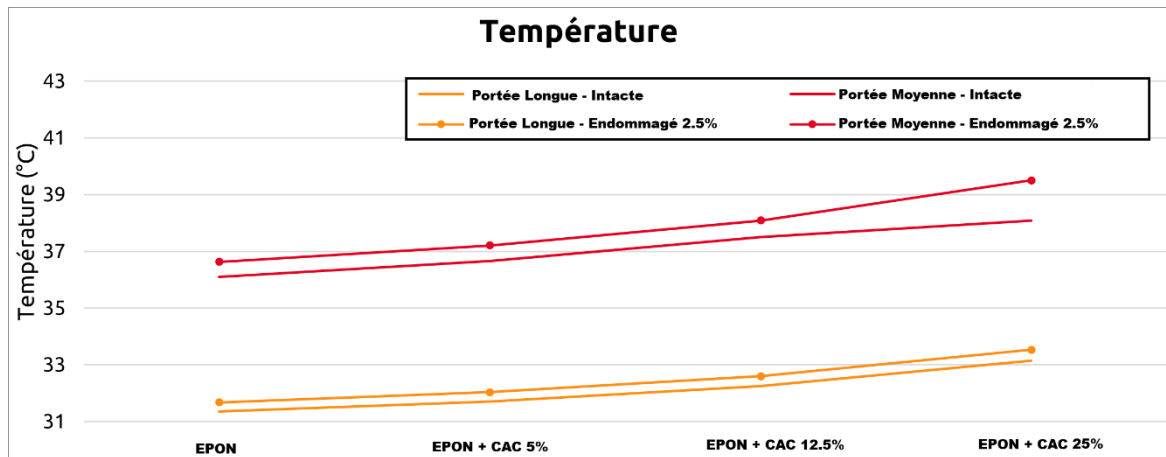


Fig. 4. Profils de température de l'EPON 828 pur et avec l'ajout de capsules auto-cicatrisantes à différents niveaux, pour des scénarios endommagés et non endommagés.

La Fig. 6 illustre la progression de la température avec l'augmentation des niveaux de dommages (0 %, 2,5 %, 10 % et 15 %) pour différents pourcentages d'inclusions de CAC. Une tendance linéaire est observée, avec une teneur en CAC plus élevée conduisant à des augmentations de température plus prononcées. Pour 25 % de CAC, la température passe d'environ 33 °C à l'état non endommagé à plus de 43 °C à 15 % de dommages. En comparaison, 5 % de CAC montre une augmentation plus faible d'environ 36 °C à 40,5 °C. Ce comportement met en évidence l'impact des inclusions de CAC sur la conductivité thermique, avec des niveaux de CAC plus élevés amplifiant la réponse thermique en raison d'une émissivité réduite.

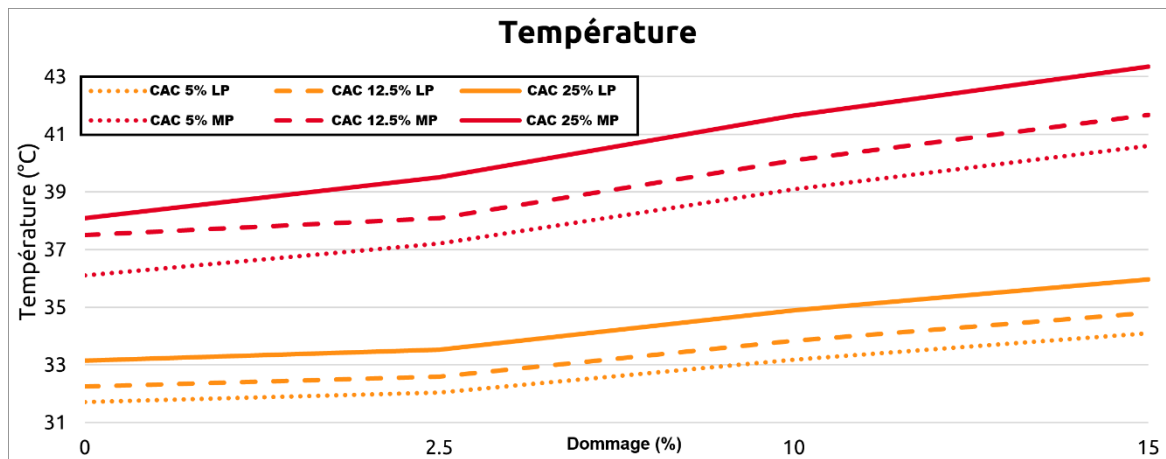


Fig. 5. Températures pour EPON 828 avec différents niveaux de dommages et ajout de capsules auto-cicatrisantes. Les lignes rouges représentent la moyenne portée (MP) et les lignes jaunes représentent la longue portée (LP).

D'après les prévisions, il semble que les dommages amplifient la réponse thermique du matériau en introduisant des vides qui perturbent les voies de transfert de chaleur radiative. Ces résultats soulignent le potentiel d'optimisation des pourcentages de CAC pour améliorer la réponse thermique, améliorant ainsi les capacités de diagnostic des revêtements en résine époxy et des matériaux composites pour les applications de surveillance de l'état des structures.

4. Conclusions

L'étude a validé la fiabilité des données spectrales FTIR pour analyser l'émissivité des matériaux composites, en montrant que l'EPON 828 encapsulé a une émissivité plus élevée que le durcisseur encapsulé, soulignant l'importance de la composition moléculaire. Les spectres infrarouges de moyenne longueur d'onde se sont révélés plus sensibles aux inclusions CAC et aux dommages, les rendant particulièrement adaptés aux applications IRT actives à températures élevées. En revanche, les spectres à longue longueur d'onde restent performants pour les diagnostics passifs et à basse température, en dépit des limitations dues au bruit environnemental.

L'intégration des CAC a démontré son potentiel pour améliorer les propriétés thermiques et diagnostiques, bien que des pourcentages plus élevés réduisent systématiquement l'émissivité. Les vides dus aux dommages perturbent davantage les voies de transfert thermique, amplifiant les anomalies détectables par IRT. L'utilisation de la FTIR s'est avérée précise pour caractériser l'émissivité et l'absorptance spectrales, ouvrant la voie au développement de modèles différenciant zones endommagées et intactes.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur sincère gratitude à Emilien BOURDON et Alan JEAN-MARIE pour leur soutien et leur compréhension quant à l'importance de participer à cette conférence.

Références

- [1] J. Xu, C. Ding, P. Chen, L. Tan, C. Chen, J. Fu. "Intrinsic self-healing polymers for advanced lithium-based batteries: Advances and strategies." *Applied Physics Reviews* 7.3 (2020): 031304. DOI: 10.1063/5.0008206.
- [2] F. Mashkoo, S. J. Lee, H. Yi, S. M. Noh, C. Jeong. "Self-healing materials for electronics applications." *International Journal of Molecular Sciences* 23.2 (2022): 622. DOI: 10.3390/ijms23020622.
- [3] H. Yue, Z. Wang, Y. Zhen. "Recent advances of self-healing electronic materials applied in organic field-effect transistors." *ACS Omega* 7 (2022): 18197–18205. DOI: 10.1021/acsomega.2c00580.
- [4] A. L. Martinez-Hernandez, C. Velasco-Santos, V. M. Castano. "Carbon nanotube composites: Processing, grafting and mechanical and thermal properties." *Current Nanoscience* 6.1 (2010): 12–39. DOI: 10.2174/157341310790226270.
- [5] A. Manta, M. Gresil, C. Soutis. "Infrared thermography for void mapping of a graphene/epoxy composite and its full-field thermal simulation." *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures* 42 (2019): 1441–1453. DOI: 10.1111/ffe.12980.
- [6] Q. Wang, Q. Hu, J. Qiu, C. Pei, X. Li, H. Zhou. "Using differential spread laser infrared thermography to detect delamination and impact damage in CFRP." *Infrared Physics & Technology* 106 (2020): 103282. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103282.
- [7] Y. Benveniste. "Revisiting the generalized self-consistent scheme in composites: Clarification of some aspects and a new formulation." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 56.10 (2008): 2984–3002. DOI: 10.1016/j.jmps.2008.06.006.
- [8] D. G. Bekas, D. Baltzis, K. Tsirka, D. Exarchos, T. Matikas, A. Meristoudi, S. Pispas, A. S. Paipetis. "Self-healing polymers: Evaluation of self-healing process via non-destructive techniques." *Plastics Rubber and Composites* 45.4 (2016): 147. DOI: 10.1080/14658011.2016.1151987.
- [9] E. Z. Kordatos, D. G. Aggelis, T. E. Matikas. "Monitoring mechanical damage in structural materials using complementary NDE techniques based on thermography and acoustic emission." *Composites Part B: Engineering* 43.6 (2012): 2676–2686. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.12.013.
- [10] J. L. Mattei, P. Laurent, A. Chevalier, M. Floch. "Application of an effective medium theory to composite materials with randomly dispersed particles of specific shapes." *Journal de Physique Archives* 7.C1 (1997): 547–548. DOI: 10.1051/jp4:19971225.
- [11] L. Wang, F. Shao, X. H. Zhong, J. X. Ni, K. Yang, S. Y. Tao, Y. Wang. "Tailoring of self-healing thermal barrier coatings via finite element method." *Applied Surface Science* 431 (2018): 60–74. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.06.025.
- [12] Z. Tong, M. Li, T. Xie, et al. "Lattice Boltzmann method for conduction and radiation heat transfer in composite materials." *Journal of Thermal Science* 31 (2022): 777–789. DOI: 10.1007/s11630-022-1524-x.
- [13] S. Ozaki, T. Osada, W. Nakao. "Finite element analysis of the damage and healing behavior of self-healing ceramic materials." *International Journal of Solids and Structures* 100–101 (2016): 307–318. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.08.026.