



Alessandro Pegoretti, Andrea Dorigato,
Laura Simonini, Nicolò Truschelli

UNIVERSITÀ DI TRENTO

🇬🇧 Development of novel self-healing adhesives for potential use in wind turbine blades

🇮🇹 Sviluppo di nuovi adesivi autoriparanti per un potenziale impiego nelle pale delle turbine eoliche

Wind energy is one of the most promising renewable sources for the transition to sustainable energy generation, with installed capacity exceeding, 1136 GW in 2024¹. Wind turbine blades are the most critical and expensive components, they consist of fibre-reinforced polymer (FRP) shells bonded together using structural adhesives, predominantly epoxy (EP), applied along the leading edge, trailing edge, spar cap and shear web²⁻³. Wind turbine blades are subject to various types of damage during their operational life, which can be divided into three broad categories: surface degradation (such as leading-edge erosion and damage of the coating), interface and bond line deterioration (including adhesive joint failure) and damage to structural elements (such as delamination, fibre breakage or instability). Although leading-edge erosion is a frequently observed damage mechanism and often appears within the first few years of service, the failure of adhesive joints is of critical importance due to the risk of total loss of structural integrity, as well as the associated maintenance costs and complexity. Indeed, given the size of modern wind turbine blades (over 100 m), even small defects in the adhesives can lead to structural failure³. To increase the durability of these components, research is focusing on self-healing materials, which are classified as either intrinsic systems, based on reversible bonds, for example, achieved by introducing thermoplastic phases, or extrinsic systems, based on strong bonds achieved, for example, by introducing encapsulated reactive healing agents⁴. However, many of these systems exhibit reduced mechanical properties, making them unsuitable for structural applications⁵⁻⁸. In this context, cyclic olefin copolymers (COCs) are emerging as promising repair agents thanks to their wide glass transition temperature range (68-180° C), high thermal stability and mechanical properties

L'energia eolica è una delle fonti rinnovabili più promettenti per la transizione verso una generazione di energia sostenibile, con una capacità installata che ha superato, 1136 GW nel 2024¹. Le pale delle turbine eoliche sono i componenti più critici e costosi, esse sono costituite da gusci in polimero rinforzato con fibre (FRP) incollati tra loro con adesivi strutturali prevalentemente epossidici (EP) depositati lungo il bordo d'attacco, bordo d'uscita, spar cap e shear web²⁻³. Le pale delle turbine eoliche sono soggette a diverse tipologie di danni durante la loro vita operativa, che possono essere suddivisi in tre macro-categorie: degrado superficiale (come l'erosione del bordo d'attacco e danni al rivestimento), deterioramento delle interfacce e delle linee adesive (inclusi i cedimenti dei giunti adesivi) e danni agli elementi strutturali (come delaminazioni, rottura delle fibre o instabilità). Sebbene l'erosione del bordo d'attacco sia un meccanismo di danno frequentemente

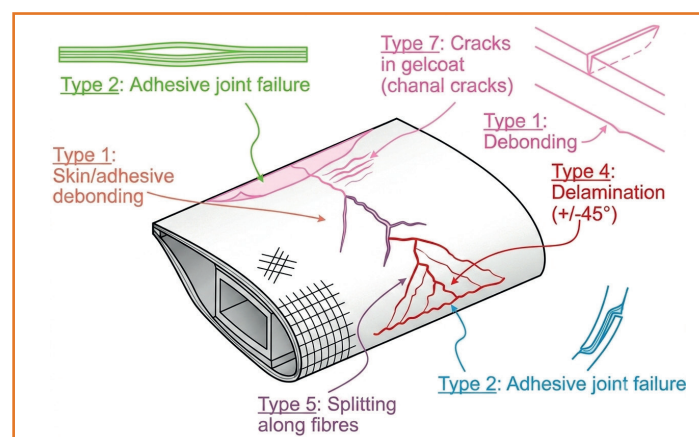


Fig. 1 - Common damages observed in the aeroshell of a wind turbine blade^[9]

Danni comunemente riscontrati nel rivestimento aerodinamico delle pale delle turbine eoliche^[9]

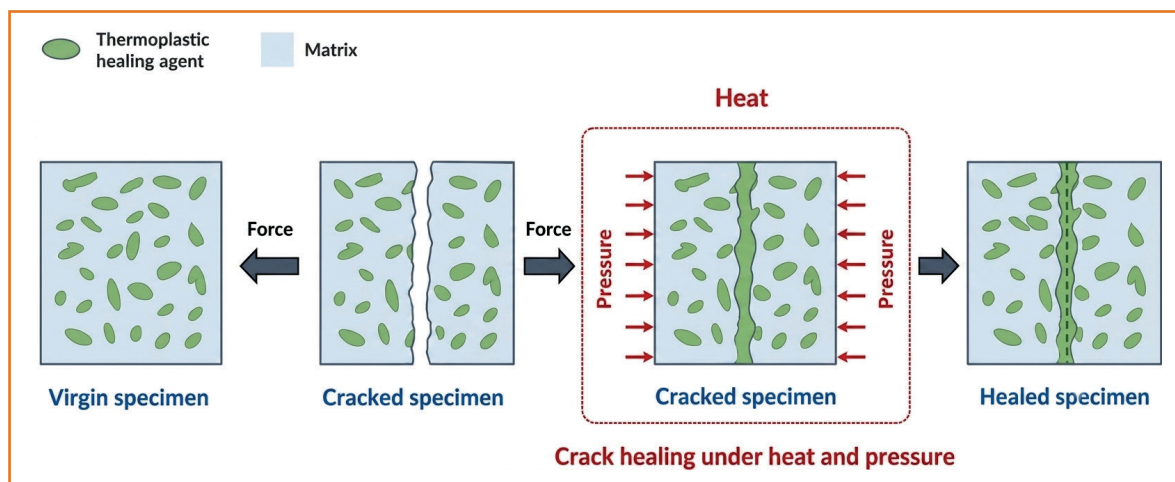


Fig. 2 - Stages of breakage and mending through heat and pressure of an intrinsic self-healing material consisting of a thermoplastic healing agent dispersed in a matrix

Fasi di rottura e riparazione, mediante calore e pressione, di un materiale autoriparante intrinseco costituito da un agente di riparazione termoplastico disperso in una matrice

osservato e appaia spesso già nei primi anni di servizio, il cedimento dei giunti adesivi riveste un'importanza critica a causa del rischio di perdita totale dell'integrità strutturale, dei costi e della complessità di manutenzione ad esso legata. Infatti, date le dimensioni delle pale moderne (oltre 100 m), anche piccoli difetti negli adesivi possono portare a fallimenti strutturali³.

Per incrementare la durabilità di questi com-

ponenti, la ricerca si sta concentrando sui materiali autoriparanti (self-healing), classificati in sistemi intrinseci, basati su legami reversibili, ad esempio, ottenuti tramite l'introduzione di fasi termoplastiche, ed estrinseci, basati su legami forti ottenuti, ad esempio, tramite l'introduzione di agenti riparanti reattivi incapsulati⁴. Tuttavia, molti di questi sistemi mostrano proprietà meccaniche ridotte, inadatte ad applicazioni strutturali⁵⁻⁸. In questo contesto, i copolimeri ciclici olefinici (COC) emergono come agenti riparanti promettenti grazie al largo intervallo di temperatura di transizione vetrosa (68-180° C), all'elevata stabilità termica e alle proprietà meccaniche simili a quelle delle resine epossidiche, garantendo che l'integrità strutturale non venga compromessa⁹. Si tratta di termoplastici amorfi trasparenti, con bassa densità, elevata rigidità ed eccellenti proprietà di barriera all'umidità che trovano applicazione nell'ottica di precisione (lenti), nel settore medicale (siringhe e contenitori diagnostici), nel packaging farmaceutico e alimentare e in componenti elettronici¹⁰.

In questo studio¹¹, il COC selezionato è stato crio-macinato in particelle inferiori a 300 µm e miscelato alla resina epossidica in percentuali del 15% e 30% in peso mentre i giunti sono stati realizzati incollando due aderendi in laminato di carbonio con uno strato di adesivo di 0.75 mm. Dal punto di vista reologico, l'aggiunta di COC alla matrice epossidica non curata ha aumentato il modulo conservativo, il modulo dissipativo e la viscosità complessa, indicando che i domini di COC limitano la mobilità delle catene epossidiche alla temperatura di reticolazione (70° C). Tuttavia, la lavorabilità non è stata compromessa. I test alla più alta temperatura di riparazione (175° C) hanno confermato che la viscosità del COC si riduce significativamente, permettendone il flusso all'interno delle cricche. Le analisi chimiche e morfologiche hanno confermato che la

similare a quelle di epoxy resins, ensuring that structural integrity is not compromised⁹. These are transparent, amorphous thermoplastics with low density, high stiffness and excellent moisture barrier properties, which are used in precision optics (lenses), the medical sector (syringes and diagnostic containers), pharmaceutical and food packaging, and electronic components¹⁰. In this study¹¹, the selected COC was cryo-grinded into particles smaller than 300 µm and mixed with the epoxy resin at concentrations of 15% and 30% by weight, whilst the joints were formed by bonding two carbon fibre laminate substrates with a 0.75 mm layer of adhesive.

From a rheological point of view, the addition of COC to the uncured epoxy matrix increased the storage modulus, the loss modulus and the complex viscosity, indicating that the COC domains restrict the mobility of the epoxy chains at the cross-linking temperature (70° C). However, processability was not compromised. Chemical and morphological analyses confirmed that the polymer blend was immiscible, with COC domains dispersed within the matrix and weakly interacting with it, as evidenced by micro-voids at the interface. The system exhibited complete curing and good thermal stability, with improved resistance to thermal degradation upon the addition of COC compared with the neat resin. The addition of COC led to a slight increase in the elastic modulus from 1.65 to 1.75 GPa, without the samples showing any significant difference. Nevertheless, it reduced tensile strength and elongation at break due to limited interfacial adhesion, the decreases observed for the blend containing 30% COC were 32% and 68%, respectively. Fracture toughness (K_{IC} and G_{IC}) decreased slightly with the addition of COC. However, during repair at 175° C, the softened COC effectively flowed into the damaged area. The mixture containing 30% of COC achieved

Le analisi chimiche e morfologiche hanno confermato che la

an 81% recovery in fracture toughness (K_{IC}) following repair at 175 °C. Joints made with epoxy resin alone exhibited the highest shear strength (16.2 MPa), whilst the addition of COC led to a reduction in initial strength (14.9 MPa for the mixture containing 30% COC). After the repair process at 175° C, the joint containing 30% COC recovered approximately 43% of its original shear strength. Observations under an optical microscope revealed a transition from an adhesive failure (which occurs at the interface and is therefore difficult to repair) observed in joints with neat epoxy adhesive and with the epoxy/COC mixture containing 15% of COC, to a cohesive failure (within the adhesive and therefore easily healable) in the presence of 30% of COC, indicating that COC modifies the failure mechanism and the interaction between the adhesive and the substrate. This study has demonstrated that EP/COC blends may represent a new type of thermally self-healing adhesive. Although the introduction of the thermoplastic phase partially reduces the initial mechanical properties, the system ensures adequate structural performance and significant self-healing capability, particularly with a COC content of 30% by weight and self-healing temperatures of 175° C. These adhesives could significantly increase the reliability and service life of wind turbine blades in harsh environmental conditions, thereby reducing maintenance costs. Further research could focus on fatigue resistance and on triggering the repair mechanism through additional external stimuli to simplify the repair process.

BIBLIOGRAPHY

1. Global Wind Energy Council (GWEC). Global Wind Report 2025. <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport#Download>, (accessed 20/10/2025).
2. L. J. Mishnaevsky. Root Causes and Mechanisms of Failure of Wind Turbine Blades: Overview. *Materials* 15 (2022) 2959–2987.
3. A. G. Olabi, T. Wilberforce, K. Elsaid, E. T. Sayed, T. Salameh, M. A. Abdelkareem, A. Baroutaji. A Review on Failure Modes of Wind Turbine Components. *Energies* 14 (2021).
4. E. K. Kumar, S. S. Patel, V. Kumar, S. K. Panda, S. R. Mahmoud, M. Balubaid. State of Art Review on Applications and Mechanism of Self-Healing Materials and Structure. *Archives of Computational Methods in Engineering* 30 (2022) 1041-1055.
5. M. Kosarli, D. G. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis, D. T. Vaimakis-Tsogkas, S. Orfanidis, G. Papavassiliou, A. S. Pappas. Microcapsule-based self-healing materials: Healing efficiency and toughness reduction vs. capsule size. *Composites Part B: Engineering* 171 (2019) 78-86.

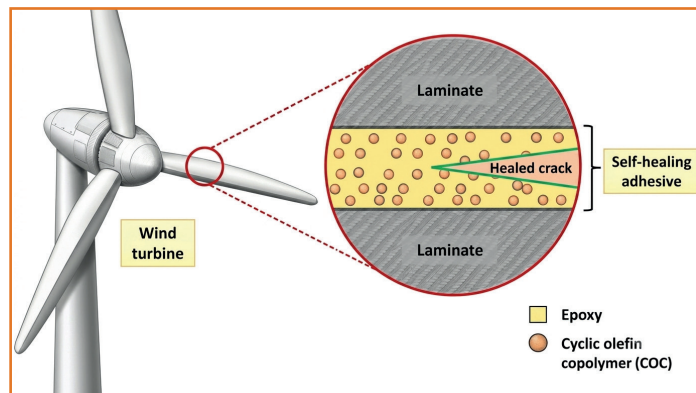


Fig. 3 - Schematic of the self-healing adhesive layer in a wind turbine blade
Schema dello strato adesivo autoriparante in una pala di una turbina eolica

miscela polimerica è immiscibile, con domini di COC dispersi nella matrice e debolmente legati ad essa, come evidenziato da micro-vuoti all'interfaccia.

Il sistema ha mostrato una cura completa e una buona stabilità termica, con un miglioramento della resistenza alla degradazione termica dopo l'aggiunta del COC rispetto alla resina pura. L'aggiunta di COC ha indotto un leggero aumento del modulo elastico da 1.65 a 1.75 GPa senza che i campioni mostrassero una differenza significativa. Ciononostante, ha ridotto la resistenza a trazione e l'allungamento a rottura a causa della limitata adesione interfacciale, rispettivamente i cali osservati per la miscela contenente il 30% di COC sono stati del 32% e del 68%.

La tenacità a frattura (K_{IC} e G_{IC}) è leggermente diminuita con l'aggiunta di COC. Tuttavia, durante la riparazione a 175° C, il COC rammollito è fluito efficacemente nell'area danneggiata. La miscela con il 30% di COC ha ottenuto un recupero della tenacità a frattura (K_{IC}) dell'81% dopo riparazione a 175° C.

I giunti con solo resina epossidica hanno mostrato la resistenza a taglio maggiore (16.2 MPa), mentre l'aggiunta di COC ha portato a una riduzione della resistenza iniziale (14.9 MPa per

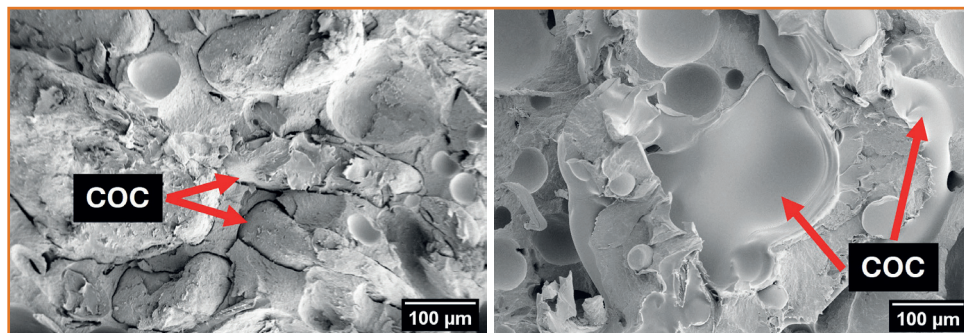


Fig. 4 - Morphological aspects of the fracture surface of the epoxy adhesive containing 30% of COC from scanning electron microscopy: (a) before and (b) after healing at 175° C

Morfologia della superficie di frattura dell'adesivo epossidico contenente il 30% di COC, osservato al microscopio elettronico a scansione: (a) prima e (b) dopo autoriparazione a 175° C

6. W. Zhang, J. Duchet, J. F. Gérard. Self-healable interfaces based on thermo-reversible Diels–Alder reactions in carbon fiber reinforced composites. *Journal of Colloid and Interface Science* 430 (2014) 61-68.
7. B. Strachota, J. Hodan, J. Dybal, L. Matějka. Self-Healing Epoxy and Reversible Diels-Alder Based Interpenetrating Networks. *Macromolecular Materials and Engineering* 306 (2020) 2000474-2000487.
8. R. Malekhouyan, R. E. Neisiany, S. N. Khorasani, O. Das, F. Berto, S. Ramakrishna. The influence of size and healing content on the performance of extrinsic self-healing coatings. *Journal of Applied Polymer Science* 138 (2020) 49964-49977.
9. D. Perin, H. Mahmood, D. Rigotti, A. Dorigato, A. Pegoretti. Novel epoxy/cyclic olefin copolymer/carbon structural composites with electro-activated self-healing properties. *Polymer Composites* 44 (2023) 5173-5187.
10. D. M. R. R. Lamonte. Cyclic Olefin Copolymers. *Advanced Materials & Processes* 159 (2001) 33-36.
11. N. Truschelli, L. Simonini, A. Tempelis, L. Mishnaevsky Jr, A. Pegoretti, A. Dorigato. Development of self-healing epoxy/COC adhesives for potential use in wind turbine blades. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 205 (2026) 109732-109743.

la miscela con il 30 % di COC). Dopo il processo di riparazione a 175° C, il giunto con il 30% di COC ha recuperato circa il 43% della sua resistenza al taglio originale. Le osservazioni al microscopio ottico hanno rivelato una transizione da una frattura adesiva (che avviene all'interfaccia quindi difficilmente riparabile) osservata nelle giunture con adesivo epossidico puro e con la miscela epossidica/COC contenente il 15% di COC, verso una frattura coesiva (interna all'adesivo quindi facilmente riparabile) in presenza del 30% di COC, indicando che il COC modifica il meccanismo di frattura e l'interazione tra adesivo e aderendo. Questo studio ha dimostrato che le miscele EP/COC possono rappresentare un nuovo tipo di adesivi autoriparanti termicamente. Sebbene l'introduzione della fase termoplastica riduca parzialmente le proprietà meccaniche iniziali, il sistema garantisce prestazioni strutturali adeguate e una capacità di riparazione significativa, specialmente con un contenuto di COC del 30% in peso e temperature di autoriparazione di 175° C. Questi adesivi potrebbero aumentare notevolmente l'affidabilità e la vita utile delle pale delle turbine eoliche in condizioni ambientali difficili, riducendo i costi di manutenzione. Ulteriori indagini future potranno concentrarsi sulla resistenza a fatica e sull'attivazione del meccanismo di riparazione tramite ulteriori stimoli esterni per semplificare il processo di riparazione.



**The premium polymer
of choice for your
adhesives, sealants & coatings.**



**Want to know more?
Get in touch with us!**
www.kaneka.be