

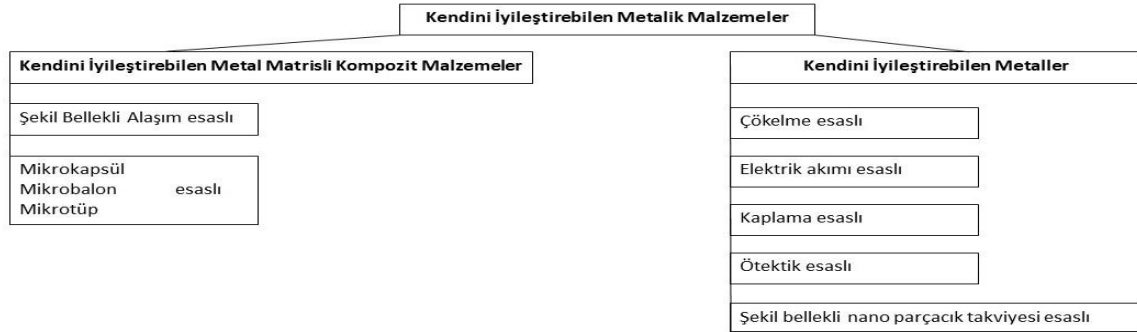
Kendini Onarabilen/İyileştirebilen Metaller ve Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Volkan Kılıçlı^{1,*}

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06560, Ankara, Turkey
*İlgili Yazar: vkilicli@gazi.edu.tr

Özet

Kendini onarabilen/iyileştirebilen malzemeler, doğal biyolojik malzemelerden esinlenmiş olup bu malzemeler mikro hasara uğradıklarında mikro çatlağı onarma/iyileştirme özelliğine sahiptirler [1]. Tüm biyolojik organizmalar küçük yaralanma ve kanamaları onarma yeteneğine sahiptir. Kendini onarabilen/iyileştirebilen inorganik malzemeler geliştirmek, malzeme bilimcilerinin giderek artan ilgisini görmektedir. Kendini onarabilen/iyileştirebilen malzemelerle ilgili son yıllardaki çalışmaların çoğu metalik malzemelere göre üretimi daha kolay polimerler ve seramikler üzerine yoğunlaşmıştır [2-9]. Kendini onarabilen/iyileştirebilen malzemeler otonom kendini iyileştirebilen malzemeler ve otonom olmayan kendini iyileştirebilen malzemeler olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır. Otonom olarak kendini iyileştirebilen malzemeler şekil bellekli nano parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler ve tane sınırlarının hareketine/göçüne dayalı metalik malzemeler olarak sınıflandırılabilir [10,11]. Otonom olmayan kendini iyileştirebilen malzemelerin sınıflandırılması Şekil 1'de verilmiştir. Otonom olmayan kendini iyileştirmede, sıcaklık, elektrik akımı, kuvvet gibi bir iti güç gerekmektedir (Tablo 1) [12,13]. Son zamanlarda kendini iyileştirebilen metaller ve metal matris kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar otonom olmayan kendini iyileştirme üzerine yoğunlaşmıştır [12-19]. Bu çalışmalarda sıcaklık, kuvvet veya deformasyon kendini iyileştirmeyi sağlamada tetikleyici/itici güç olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. Kendini onarabilen/iyileştirebilen metalik malzemelerin sınıflandırılması

Kendini iyileştirebilen/onarabilen metalik malzemelerle ilgili çalışmalar; çoğunlukla Al alaşımları, Zn alaşımları ve Sn-Bi alaşımları üzerinde gerçekleştirilmiştir [17,20-23]. Kendini iyileştirebilen/onarabilen metal matris kompozitler, şekil bellekli alaşım tel takviyesi esaslı iyileşme, mikrokapsülasyona dayalı iyileşme olarak kategorize edilebilir (Şekil 2).

Tablo 1. Metalik malzemelerde bilinen kendini onarma/iyileştirme mekanizması ve tetikleyicileri [1]

Bilinen Kendini Onarma/İyileştirme Mekanizması	Tetikleyici / İtici Güç
Şekil bellekli alaşım esaslı iyileştirme	Kuvvet / Sıcaklık
Kapsül esaslı iyileştirme	Kuvvet / Sıcaklık
Aşırı doymuş alaşımlarda çökeltme (çökeltme esaslı) iyileştirme	Sıcaklık
Elektrik akımı esaslı iyileştirme	Elektrik akımı
Kaplama esaslı iyileştirme	Sıcaklık
Ötektik tabanlı	Sıcaklık
Nano-şekil bellekli parçacık takviyesi esaslı	Deformasyon

Şekil bellekli alaşım (NiTi alaşımı) telleri takviye elemanı olarak kullanarak kendini iyileştirebilen metal matrisli döküm kompozitlerin elde edilmesi hedeflenmiştir [15,21-23]. Hasarlı şekil bellekli alaşım tel takviyeli bir kompozitte, şekil bellekli alaşım tellerde deformasyon etkisiyle gerinimli bölgeler oluşmaktadır. Bu gerinimli bölgeler ısıtmanın etkisiyle martensitten östenite faz dönüşümü sayesinde tel orijinal boyutlarına dönerek çatlak kapanmasını sağlamaktadırlar (Şekil 2).

Kapsül esaslı iyileştirme mekanizması [1,24-26], yüksek ergime derecesine sahip bir alaşım içine gömülü olan içi boş seramik (Al_2O_3) mikrokapsüller içine düşük erime noktalı bir alaşımın katılmasıdır. Büyüyen bir çatlak, seramik mikrokapsülün parçalanmasıyla, düşük erime noktalı alaşımın sıvılaştırılmasına ve mikro çatlağa akmasına izin verir. Böylelikle çatlak, iyileştirici ajan tarafından doldurularak ilerlemesi durdurulmuş olur (Şekil 2).

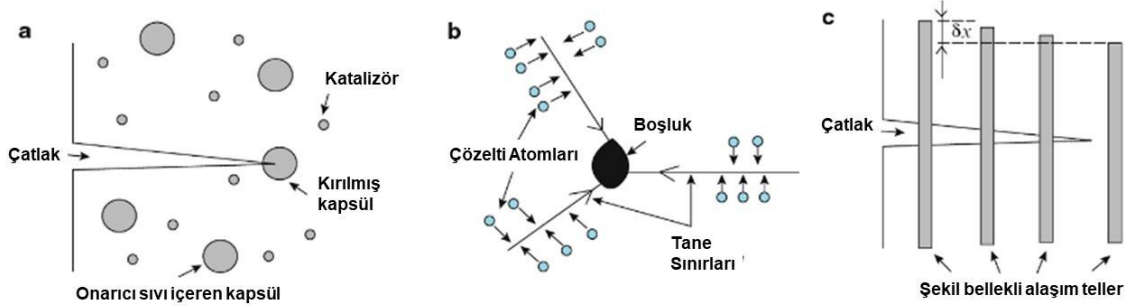
Çökeltme esaslı iyileşmede (Şekil 2.b), aşırı doymuş ve yaşlandırılmamış alaşımlarda oluşacak çökeltmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlak veya boşluklara çekirdeklenme bölgeleri olarak görev yapar. Yaşlandırma sırasında çökecek olan çökeltmeler mikro kusurlara ve boşluklara difüze ederek bu bölgeleri onarırlar/iyileştirirler [20,27,28]. Bununla birlikte, bu 'iyileşme' yaşlandırma sertleşmesinin doğal sürecine benzer şekilde nanometre ölçeğinde gerçekleşir ve büyük çatlakları iyileştirme özelliği yoktur. Alaşım iyileşmeyi sağlamak için belli bir yaşlandırma sıcaklığına ısıtılır ve çökeltmeler bölgesel olarak yüksek stresli ve mikro çatlakların yakınında çökeltirler [18,19].

Kontrollü elektrik akımı altında elektrolitik bir banyoda çatlak içeren bir alaşımda metal iyonlarının elektrolitik olarak çökeltmesiyle sağlanan çatlak iyileşmesi elektro-iyileşme olarak tanımlanmaktadır [29]. 100 μm 'ye kadar olan mikrometre boyutlarındaki çatlaklar, elektro-iyileştirme prosesi ile başarılı bir şekilde onarılabilir. Araştırmacılar bu işlem vasıtasıyla yaklaşık %96 çekme dayanımının geri kazanıldığını bildirmektedirler [29].

Diğer bir kendini iyileştirme yöntemi kaplama esaslı iyileştirme/onarma yöntemi olup, Leser ve diğ. [30] 2,03 mm kalınlığa sahip bir titanyum alaşımı yüzeyinde 124°C (0.005-0.015 mm kalınlık) erime noktasına sahip %60 In-%40 Sn (ağ.-%) alaşımı kendini iyileştiren kaplama geliştirdi. Ti alaşımında bir yüzey çatlağı oluşması durumunda, In-Sn alaşımı erime noktasının üstünde ısıtıldığında (124°C), erimiş olan In-Sn alaşımı, titanyum alaşımının yüzeyindeki mikroçatlağı doldurur. Araştırmacılar kendini iyileştirme sürecinden sonra onarılmış

çatlağın onarımından sonra, yorulma çatlak büyümesinin durdurulabileceğini ve çatlak büyüme oranının yaklaşık% 50 oranında azaltıldığını bildirmektedir [30].

Ruzek ve Rohatgi [17] tarafından geliştirilen ötektik esaslı iyileşme, katı dendritik yapının bütünlüğünü koruduğu ve dentritler arasındaki ötektik yapının iyileştirici bir yapı olarak kullanmaya dayanmaktadır. Önerilen bu yöntemde, kendini iyileştirmeyi için etkinleştirmek için, alaşım sıcaklığı, dendritler arası ötektik yapının erimesini sağlayacak bir sıcaklığa ısıtılması gerekmektedir. Böylelikle, sıvı haldeki ötektik, dendritler arasında veya yapıda bulunan herhangi bir mikro çatlak veya boşluklara akarak doldurur. Alaşımın soğutulması sonrası, dendritler arası bölgelerdeki mikro çatlakları doldurmuş olan ötektik katılaşacak ve böylece alaşım onarılmış olacaktır. Araştırmacılar ötektik sıvının çatlağın içine akması için yeterli miktar ve akışkanlığa sahip olması, çatlak yüzeyini ıslatması ve katılaşma sonrası çatlak yüzeyiyle iyi bir bağ oluşturmasının gerektiğini bildirmektedirler [17].



Şekil 2. Metalik malzemelerdeki iyi bilinen kendini iyileştirme mekanizmalarının şematik olarak gösterimi; a) Kapsül esaslı iyileştirme, b) Aşırı doymuş alaşımlarda çökeltme (çökeltme esaslı) iyileştirme ve c) Şekil bellekli alaşım tel takviyesi ile iyileştirme [1].

Kendini iyileştirebilen/onarabilen metal matrisli kompozit malzemeler araştırma aşamasındadır. Hali hazırda ticari kendini iyileştiren metal malzeme bulunmamaktadır. Şimdilik pratik uygulama için birçok kısıtlamalar bulunmaktadır. Ancak kendini iyileştirebilen metalik malzemeler gelecek için oldukça umut vericidir. Kendini iyileştirebilen/onarabilen metalik malzemelerin düşük bakım maliyeti, uzun servis ömrü ve hasarları önleme gibi birçok çekici avantajlarına rağmen, gerçek hayatta kullanılan yük taşıyıcı uygulamalarda kullanımı henüz mümkün değildir. Kendini iyileştirebilen/onarabilen metalik malzemelerde otonom iyileşme mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Şimdiye kadar geliştirilen iyileştirme mekanizmalarının çoğu sıcaklık, deformasyon veya elektrik akımı gibi harici tetikleyiciler gerektirmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklara dayanabilecek yeni kendini iyileştirici ajanların veya mekanizmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca mikrohasarlı bölgenin tespiti ve görüntülenebilmesi, hasarın kendini iyileştirebilmesi için önceden belirlenmesi gereken başka bir araştırma konusudur.

Kaynaklar

- [1] M. Nosonovsky, P.K. Rohatgi, "Biomimetics in Materials Science: Self-healing, Self-lubricating, and Self-cleaning materials", Springer, 2011, p 1-122.
- [2] B. Aissa, D. Theriault, E. Haddad, W. Jamroz, "Self-healing materials systems: Overview of major approaches and recent developed technologies", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2012, (2012).
- [3] D. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis, A. Paipetis, "Self-healing materials: a review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques", *Compos. Pt. B-Eng.*, 87, 92-119 (2016).
- [4] M. Kessler, "Self-healing: a new paradigm in materials design", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G-J. Aerosp. Eng.*, 221(4), 479-495 (2007).
- [5] M. Samadzadeh, S.H. Boura, M. Peikari, S. Kasirihha, A. Ashrafi, "A review on self-healing coatings based on micro/nanocapsules", *Prog. Org. Coat.*, 68(3), 159-164 (2010).
- [6] R.P. Wool, "Self-healing materials: a review", *Soft Matter*, 4(3), 400-418 (2008).
- [7] D.Y. Wu, S. Meure, D. Solomon, "Self-healing polymeric materials: a review of recent developments", *Prog. Polym. Sci.*, 33(5), 479-522 (2008).
- [8] Y. Yuan, T. Yin, M. Rong, M. Zhang, "Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: a review", *Express Polym. Lett.*, 2(4), 238-250 (2008).
- [9] P. Zhang, G. Li, "Advances in healing-on-demand polymers and polymer composites", *Prog. Polym. Sci.*, 57, 32-63 (2016).
- [10] B. Grabowski, C.C. Tasan, Self-Healing Metals, "Self-Healing Materials"ed., M.D. Hager, S. van der Zwaag, U.S. Schubert, Eds., Springer, 2016, p 387-407.
- [11] G. Xu, M. Demkowicz, "Healing of nanocracks by disclinations", *Phys. Rev. Lett.*, 111(14), 145501 (2013).
- [12] J. Ferguson, B.F. Schultz, P.K. Rohatgi, "Self-healing metals and metal matrix composites", *JOM*, 66(6), 866-871 (2014).
- [13] A.D. Moghadam, B.F. Schultz, J. Ferguson, E. Omrani, P.K. Rohatgi, N. Gupta, "Functional metal matrix composites: self-lubricating, self-healing, and nanocomposites-an outlook", *JOM*, 66(6), 872-881 (2014).
- [14] K. Alaneme, M. Bodunrin, "Self-healing using metallic material systems—A review", *Applied Mater. Today*, 6, 9-15 (2017).
- [15] M. Manuel, Principles of Self-healing in Metals and Alloys: An Introduction, "Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications"ed., S.K. Ghosh, Ed., Wiley-VCH Verlag 2009, p 251-265.
- [16] S.K. Misra, "Shape Memory Alloy Reinforced Self-healing Metal Matrix Composites," University of Wisconsin-Milwaukee, 2013.
- [17] A.C. Ruzek, "Synthesis and Characterization of Metallic Systems with Potential for Self-healing," University of Wisconsin-Milwaukee, 2009.
- [18] S.K. Ghosh, "Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications", John Wiley-VCH, 2009, p 1-28.
- [19] S. van der Zwaag, "Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science", Springer, 2008, p 1-18.
- [20] K.K. Alaneme, O.I. Omosule, "Experimental Studies of Self Healing Behaviour of Under-Aged Al-Mg-Si Alloys and 60Sn-40Pb Alloy Reinforced Aluminium Metal-Metal Composites", *J. Minerals Mater. Charac. Eng.*, 3(01), 1 (2014).
- [21] J. Ferguson, B. Schultz, P. Rohatgi, "Zinc alloy ZA-8/shape memory alloy self-healing metal matrix composite", *Mater. Sci. Eng. A*, 620, 85-88 (2015).
- [22] M.V. Manuel, G.B. Olson, Biomimetic Self-healing Metals, 1st International Conference on Self-Healing Materials, 2007, p 1-8.
- [23] P. Rohatgi, "Al-shape memory alloy self-healing metal matrix composite", *Mater. Sci. Eng. A*, 619, 73-76 (2014).
- [24] J. Martinez-Lucci, R. Amano, P. Rohatgi, B. Schultz, Self-healing in an Aluminum Alloy Reinforced with Microtubes, 3rd Energy Nanotechnology International Conference-ENIC2008ed., 2008, p 1-10.
- [25] J. Martinez-Lucci, R. Amano, P. Rohatgi, B. Schultz, A. Ruzek, Design and Demonstration of Self-Healing Behavior in a Lead-Free Solder Alloy, 7th International Energy Conversion Engineering Conference, 2009, p 1-7.
- [26] J. Martinez-Lucci, A. Ruzek, S.K. Misra, P.K. Rohatgi, R.S. Amano, "Self-healing in Metal Castings", *AFS Trans.*, 101, 187-195 (2011).
- [27] S. Van der Zwaag, "Routes and mechanisms towards self healing behaviour in engineering materials", *Bull. Pol. Acad. Sci.-Chem.*, 58(2), 227-236 (2010).
- [28] S. Van der Zwaag, N. Van Dijk, H. Jonkers, S. Mookhoek, W. Sloof, "Self-healing behaviour in man-made engineering materials: bioinspired but taking into account their intrinsic character", *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.*, 367(1894), 1689-1704 (2009).
- [29] X. Zheng, Y.-N. Shi, K. Lu, "Electro-healing cracks in nickel", *Mater. Sci. Eng. A*, 561, 52-59 (2013).
- [30] P.E. Leser, J.A. Newman, S.W. Smith, W.P. Leser, R.A. Wincheski, T.A. Wallace, E.H. Glaessgen, R.S. Piascik, Mitigation of crack damage in metallic materials, ed., NASA Technical Reports Server-NTRS, 2014.