

**Особенности процессов лазерного осаждения и механизмов
структурообразования плакирующих слоев при лазерной поверхностной
обработке металлических материалов**

Немененок Б.М., Девойно О.Г., Лущик П.Е., Рафальский И.В.
Белорусский национальный технический университет

Лазерная поверхностная обработка (ЛПО) металлических материалов по сравнению с традиционными методами имеет ряд преимуществ: возможность локального упрочнения деталей сложной формы в труднодоступных местах поверхности, высокая производительность труда, наличие серийно выпускаемого лазерного высокопроизводительного оборудования, относительная простота технологий лазерной обработки, что допускает разнообразие технологических режимов, частичную или полную автоматизацию всего процесса. Эти методы позволяют целенаправленно управлять геометрическими параметрами, структурой и химическим составом поверхности обрабатываемых изделий, обеспечивает возможность получать на поверхности изделий легированные слои, обладающие требуемыми физико-химическими свойствами [1-5].

Анализ имеющейся в открытой печати информации показывает, что в последнее десятилетие методы лазерной обработки поверхности стали объектом исследований не только как процессы повышения функциональности, ремонта и восстановления эксплуатационных свойств металлических изделий, но и как новый тип технологий лазерного аддитивного производства, который используется в машиностроении, аэрокосмической и автомобильной промышленности, биомедицинском оборудовании и других областях [6-8].

Характер изменений топографии, структуры, химического и фазового состава материала при ЛПО с учетом параметров плотности мощности лазера и времени его взаимодействия с материалом определяется, прежде всего, процессами тепловыделения и теплопередачи в тонком слое подложки материала вследствие воздействия лазерного излучения [9]. В термических циклах нагрева и охлаждения поверхности при ЛПО в зависимости от достигнутой температуры с учетом физических свойств используемых материалов могут происходить фазовые переходы материала (плавление, затвердевание, испарение). В связи с этим, методы ЛПО целесообразно систематизировать в зависимости от агрегатного состояния материала поверхности, выделив их в три основные группы: твердофазные (при которых локальный нагрев материала подложки не сопровождается его плавлением или испарением, например, лазерная закалка, лазерное ударное упрочнение), жидкофазные (при которых локальный нагрев материала сопровождается его плавлением, но не испарением, например, методы лазерной наплавки и осаждения, лазерного легирования, селективного лазерного плавления, лазерной сварки, лазерного стеклования) и газофазные (при которых локальный нагрев материала сопровождается его испарением, например, методы лазерной резки, сверления и контурной обработки) процессы.

Наиболее широко используемыми методами для изменения эксплуатационных свойств металлических материалов, находящихся в центре внимания исследователей в последнее десятилетие [9-10], являются жидкофазные процессы лазерной обработки, в которых за счет высокой плотности энергии лазерного излучения обеспечивается плавление используемых материалов (подложки, плакирующего материала).

Методы лазерной наплавки, осаждения и легирования различаются способом подачи плакирующего материала: предварительно нанесенным плакирующим составом [11, 12] или методом соосаждения дисперсных материалов [13-16]. В первом случае проводят лазерную обработку предварительно изготовленной плакирующей суспензии, содержащей порошок и связующий материалы, после нанесения и затвердевания суспензии на подложке. При этом

установлено, что для образцов, изготовленных методом нанесения предварительно подготовленного порошкового лакирующего материала, характерно образование дефектов лакирующего слоя из-за испарения связующего материала при лазерной обработке. Во втором случае подача дисперсного лакирующего материала осуществляется непосредственно в зону воздействия лазерного луча. При этом осаждение дисперсных частиц может осуществляться под разными углами, с использованием нескольких сопел различной конструкции, с формированием лакированного слоя заданной толщины, что сложно обеспечить при использовании метода нанесения предварительно подготовленного порошкового лакирующего материала [17].

Процессы лазерного осаждения материалов с использованием прецизионных устройств перемещения лазера и доставки порошка, совмещенные с 3D-CAD технологиями и известные как методы лазерного лакирования или селективного лазерного плавления и спекания, в последние годы получили активное развитие как новый тип технологии лазерного аддитивного производства [6–10, 18].

Механизмы структурообразования лакирующих слоев при лазерной поверхностной обработке металлических материалов определяются сложными динамическими процессами подачи дисперсных материалов, взаимодействия лазерного излучения и материала подложки, теплопередачи, нелинейных циклических процессов плавления и затвердевания лакирующих и легирующих материалов, формирования и эволюции зоны ванны расплава [10]. Сообщается, что наплавленный слой (в направлении от поверхности внутрь подложки) можно разделить на три области: зону лакирования (ЗЛ), межфазную зону (МЗ) и зону термического влияния (ЗТВ). Структура зоны лакирования определяет такие механические свойства, как твердость и износостойкость поверхности после обработки методом лазерного осаждения. Межфазная зона представляет собой область соединения материалов лакирующего порошка и подложки, структура зоны термического влияния определяется влиянием термических процессов и, как правило, ее размер уменьшается при снижении плотности потока энергии (при уменьшении мощности лазера и увеличении скорости его перемещения). Выбор параметров ЛПО (мощность и скорость перемещения лазера, размерные параметры зон обработки, скорости подачи и осаждения дисперсных материалов и др.) в конечном итоге определяет качество обрабатываемой поверхности [11, 12].

Структура лакированного слоя зависит от градиента температуры и скорости затвердевания: с ростом соотношения градиента температуры и скорости затвердевания наблюдается тенденция к формированию столбчатой структуры лакирующего слоя, а при уменьшении этого соотношения наблюдается переход к равноосным дендритным структурам [19, 20]. Эти два конкурирующие механизма роста кристаллов в совокупности определяют морфологию зерен лакирующего слоя. Изменение структуры наплавленного слоя также может быть реализовано за счет изменения режима ЛПО: в непрерывном режиме формируется, преимущественно, столбчатая дендритная структура, ориентированная к центру лакированного слоя, тогда как при импульсном лазерном режиме дендритные структуры ориентированы случайным образом.

В связи с высокой степенью нелинейности процессов ЛПО, для изучения механизмов формирования и эволюции лакирующего слоя широко используются методы численного моделирования [21]. В центре внимания в этой области исследований находятся процессы теплопередачи с учетом кинетики плавления и кристаллизации материалов [22], моделирование движения жидкости [23], геометрических параметров наплаваемого слоя и процессов растворения материалов в ванне расплава [24], напряженно-деформированного состояния [25].

Работа выполняется при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т22КИТГ-017 «Исследование и разработка процессов лазерного осаждения для ремонта деталей из алюминий-магниевых сплавов».

Литература

1. Dobrzański, L.A. Laser surface treatment of magnesium alloys with aluminium oxide powder / L.A. Dobrzański, S. Malara, T. Tański // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009. – Vol. 37, Iss.1. – pp. 70–71.
2. Quazi, M. M. Laser-based Surface Modifications of Aluminum and its Alloys / M. M. Quazi, M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb [et al.] // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2015. – 26 p.
3. Yilbas, B.S. Laser surface treatment of aluminum based composite mixed with B4C particles / B.S. Yilbas, C. Karatas, H. Karakoc [et al.] // *Optics & Laser Technology*, 2015. – Vol.66. – pp. 129–137.
4. Вашуков, Ю. А. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки / Ю. А. Вашуков, С. Ф. Демичев, В. Д. Еленев [и др.] // *Прикладная физика*, 2019. – № 1. – С. 82–87.
5. Volpp, J. Influence of complex geometries on the properties of laser-hardened surfaces / J. Volpp, H. S. Dewi, A. Fischer [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. – Vol. 107. – pp. 4255–4260.
6. Graf, B. Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys / *Physics Procedia*, 2012. – Vol. 39– pp. 376–381.
7. Wei, C. An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: from macro- to micro-scales / C. Wei, Z. Zhang, D. Cheng [et al.] // *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021. – Vol. 3 (012003). – 24 p.
8. Verma, V. Laser Direct Metal Deposition (LDMD) – An Overview / V. Verma, A. Mandal, A. Shukla // *International Journal of Advance Research and Innovation*, 2017. – Vol. 5, Iss.4. – pp. 459–467.
9. Siddiqui, A. A. Laser Surface Treatment / A. A. Siddiqui, A.K. Dubey // In the Book “Engineering Steels and High Entropy–Alloys”, Edited by A. Sharma, 2020. – 16 p.
10. Cheng, J. An Overview of Laser Metal Deposition for Cladding: Defect Formation Mechanisms, Defect Suppression Methods and Performance Improvements of Laser–Cladded Layers / J. Cheng, Y. Xing, E. Dong [et al.] // *Materials*, 2022. – Vol. 15 (5522). – 38 p.
11. Chen, E. Laser cladding of a Mg based Mg-Gd-Y-Zr alloy with Al-Si powders / E. Chen, K. Zhang, j. Zou // *Applied Surface Science*, 2016. – Vol. 367. – pp. 11–18.
12. Liu, Y.H. Laser (a pulsed Nd:YAG) cladding of AZ91D magnesium alloy with Al and Al₂O₃ powders / Y.H. Liu, Z.X. Guo, Y. Yang [et al.] // *Applied Surface Science*, 2006. – Vol. 253, Iss. 4. – pp. 1722–1728.
13. Li, Y. Microstructure and properties of Ti/TiBCN coating on 7075 aluminium alloy by laser cladding / Y. Li, P. Zhang, P. Bai [et al.] // *Surface and Coating Technology*, 2018. – Vol. 334. – pp. 142–149.
14. Yue, T.M. Solidification behaviour in laser cladding of AlCoCrCuFeNi hightentropy alloy on magnesium substrates / T.M. Yue, H. Xie, X. Lin [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*, 2014. – Vol. 587. – pp. 588–593.
15. Siddiqui, A.A. A study of metallurgy and erosion in laser surface alloying of AlxCu_{0.5}FeN_iTi high entropy alloy / A.A. Siddiqui, A.K. Dubey, C.P. Paul // *Surface and Coatings Technology*, 2019. – Vol. 361. – pp. 27–34.
16. Siddiqui, A.A. Geometrical characteristics in laser surface alloying of a hightentropy alloy / A.A. Siddiqui, A.K. Dubey, C.P. Paul // *Lasers in Engineering*, 2019. – Vol. 43. – pp. 237–259.
17. Abioye, T.E. A comparative study of Inconel 625 laser cladding by wire and powder feedstock / T.E. Abioye, P.K. Farayibi, A.T. Clare // *Materials and Manufacturing Processes*, 2017. – Vol. 32, Iss.14. – pp. 1653–1659.
18. Bruzzo, F. Sustainable laser metal deposition of aluminum alloys for the automotive industry / F. Bruzzo, M. Prakash, R. Medapati [et al.] // *Journal of Laser Applications*, 2022. – Vol. 34 (042004). – 12 p.

19. Alam M.K. Microstructural analysis of the lasercladded AISI 420 martensitic stainless steel / M.K. Alam, A. Edrisy, J. Urbanic // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2019. – Vol. 50. – pp. 2495–2506.
20. Liu, Z. Effects of deposition variables on molten pool temperature during laser engineered net shaping of Inconel 718 superalloy / Z. Liu, T. Li, F. Ning [et al.] // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. – Vol. 102. – pp. 969–976.
21. Tamanna, N. Progress in numerical simulation of the laser cladding process / N. Tamanna, R. Crouch, S. Naher // *Optics and Lasers in Engineering*, 2019. – Vol. 122. – pp. 151–163.
22. Mirzade, F.K. Kinetic approach in numerical modeling of melting and crystallization at laser cladding with powder injection // F.K. Mirzade, V.G. Niziev, V.Y. Panchenko [et al.] // *Physica B: Condensed Matter*, 2013. – Vol. 423. – pp. 69–76.
23. Kumar, A. Effect of threedimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding / A. Kumar, S. Roy // *Computational Materials Science*, 2009. – Vol. 46, Iss. 2. – pp. 495–506.
24. Hofman, J.T. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding / J.T. Hofman, D.F. De Lange, B. Pathiraj // *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. – Vol. 211, Iss. 2. – pp. 187–196.
25. Zeković, S. Modeling of Laser-Based Direct Metal Deposition / S. Zeković, R. Kovacević // *Tribology in industry*, 2006. – Vol. 28, No. 1&2. – 14 p.