

УДК 621.7, 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПЛАКИРОВАНИИ ПОРОШКАМИ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ГЕЛИКОИДАЛЬНОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Л. Чен, Ш. Лиу, Р. Тао, Д. Лиу, Д. Лу, П. Беннетт

Школа инженерной механики Хубэйского технологического университета,
430068 Ухань, Китай

E-mails: cangn1983@163.com, 15342769026@163.com, taoran888@sina.cn,
liudun98@gmail.com, loodean@aliyun.com, parbennett@hotmail.com

С использованием метода конечных элементов выполнено численное моделирование температурного поля, возникающего при лазерном покрытии (плакировании) изношенных зубьев геликоидальной передачи. Получено распределение изотерм внутри зуба. Проведено сравнение результатов численных расчетов и экспериментальных данных. Даны рекомендации по технологии нанесения покрытия, обеспечивающей долговременное целостное покрытие.

Ключевые слова: лазерное плакирование, поле температур, поверхность зуба, метод конечных элементов.

DOI: 10.15372/PMTF20160516

Введение. Функционирование зубчатой передачи приводит к фрикционному износу рабочих поверхностей, в результате чего происходит ее разрушение. Исследованию проблемы восстановления изношенных зубчатых передач посвящено большое количество работ (см., например, [1, 2]). Область применения таких методов восстановления, как напыление, нанесение новых поверхностей и т. д., ограничена вследствие сложной конструкции зубчатой передачи и высоких требований к рабочим поверхностям зубьев. Поэтому представляет интерес разработка высокоэффективных прецизионных технологий восстановления, позволяющих продлить срок службы зубчатой передачи.

В настоящее время эффективным способом восстановления зубчатых передач является лазерное плакирование [3–6]. Вследствие наличия локальной зоны нагрева обеспечивается надежная связь покрытия с основой [7–11]. Лазерное плакирование широко используется в машиностроении [12–14]. В работах [15–18] выполнено численное моделирование температурных полей, возникающих при лазерном плакировании. В большинстве указанных выше работ исследования проводились для относительно простых образцов. Так, в [19] изучалась упрощенная модель прямого зуба с учетом особенностей конструкции геликоидальной зубчатой передачи. Однако полученные результаты не соответствуют реальному

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 51405141).

© Чен Л., Лиу Ш., Тао Р., Лиу Д., Лу Д., Беннетт П., 2016

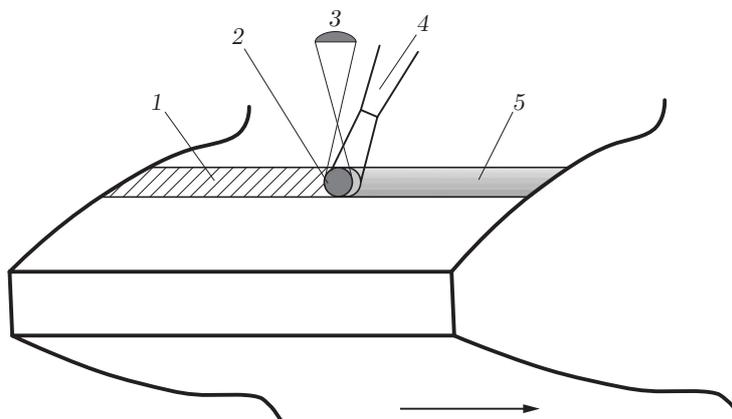


Рис. 1. Схема лазерного плакирования на поверхности зуба:

1 — поверхность зуба, 2 — факел, 3 — фокусирующая линза, 4 — инжектор порошка, 5 — покрытие, стрелка — направление движения образца

распределению температуры в зубчатой передаче в процессе плакирования. В данной работе с использованием метода конечных элементов проведен численный расчет температурного поля в реальной геликоидальной зубчатой передаче со скошенными зубьями.

1. Материалы и оборудование. Эксперименты проводились с помощью CO_2 -лазера с максимальной мощностью 2000 Вт. Четырехосевой трехкоординатный технологический стол CNC Siemens802C использовался в качестве позиционирующего. Порошок подавался с помощью инжектора JFK-6. Частицы порошка из сплава на основе никеля (массовая доля С — $0,6 \div 1,0$ %, Сг — $11 \div 15$ %, В — $2 \div 3$ %, Si — $2,0 \div 3,5$ %, Fe — 5 %, Ni — $72,5 \div 79,4$ %) размером $45 \div 105$ мкм вводились в зону обработки через сопло, прикрепленное к лазерной головке JFK-6. Лазерный луч проходил в потоке несущего газа (аргона). Параметры лазерного плакирования были следующие: выходная мощность лазера 1000 Вт, расход подаваемого порошка 3 г/мин, фокусное расстояние 180 мм, скорость движения образца 2,5 мм/с, диаметр лазерного пятна 4 мм, время непрерывного плакирования 40 с. В качестве образца использовалась небольшая высокоточная геликоидальная шестерня от смазочного насоса паровой турбины, выполненная из стали марки Ст.45. Образец имел следующие геометрические параметры: количество зубьев — 29, нормальный модуль зацепления — 2, угол подъема винтовой линии — $16^\circ 9' 7,76''$, угол давления зубчатого зацепления — 20° , коэффициент модификации зубчатой передачи — 0,2, ширина зуба — 93,5 мм, диаметр делительного конуса — 60,38 мм, диаметр вершин зубьев — 65,16 мм, диаметр вала — 54 мм, длина редуктора — 493,5 мм.

Как известно, наиболее существенному износу подвержена поверхность зуба. На рис. 1 представлена схема процесса лазерного плакирования на поверхности зуба.

2. Геометрия модели и расчетная сетка. Геометрия модели покрытия, наносимого с помощью лазерного плакирования, выбиралась на основе результатов исследования микрофотографий реальных покрытий, а температурный режим задавался с учетом способа подачи порошка. Предполагалось, что форма поверхности однородного плакирующего слоя толщиной 0,8 мм повторяет эвольвенту геликоидального зуба. Вследствие движения источника тепла, создаваемого лазерным излучением, при сканировании последовательно активируются участки покрытия, до тех пор пока процесс плакирования не будет завершен.

Зона нагрева, создаваемая лазерным излучением при плакировании, имеет небольшие размеры. Можно предположить, что температурное поле меняется в плакирующем покрытии и в зубе. Для увеличения точности расчетов разрешение расчетной сетки для

покрытия плакируемого зуба должно быть больше, чем для зубчатого колеса. Генерация расчетной сетки для колеса и покрытия проводилась гексаэдрическими элементами типа Solid 70.

3. Граничные условия. Поскольку плакирование сопровождается сложными физическими, химическими, механическими процессами, при расчете были введены следующие упрощающие предположения:

- 1) потерями тепла между плакирующим слоем и основой пренебрегается;
- 2) процессом передачи тепла от образца к экспериментальной платформе пренебрегается;
- 3) основа и покрытие обмениваются теплом с окружающим воздухом за счет конвекции;
- 4) учитывается влияние радиационного теплопереноса на тепловую конвекцию;
- 5) единственным источником вводимого в систему тепла является источник тепла со смещающейся границей.

Инжектируемый поток тепла диспергирован и является импульсно-периодическим. Тепловой поток имеет гауссово распределение [20–22]. В декартовой системе координат интенсивность источника тепла $q(W)$ определяется с использованием уравнения

$$q = \frac{k}{\pi} q_0 e^{-kr^2},$$

где q_0 — мощность эффективного источника тепла; k — коэффициент плотности теплового потока (ширина гауссова распределения); r — расстояние между некоторой точкой и центром теплового источника.

При моделировании поглощение и выделение латентного тепла может быть описано энтальпией, обусловленной фазовыми переходами плавление — отвердевание в процессе плакирования. Приращение количества энтальпии ΔH описывается функцией с независимыми переменными, представляющими собой плотность ρ , удельную теплоемкость c и температуру T :

$$\Delta H = \int \rho c(T) dT.$$

В начальный момент времени температура образца была равна температуре окружающей среды и составляла 20 °С. Характеристики материалов основы и покрытия, зависящие от температуры, приведены в табл. 1, 2 (λ — теплопроводность, γ — коэффициент теплообмена).

4. Анализ температурного поля. На рис. 2 представлено поле температуры в зубчатой передаче в различные моменты времени при лазерном плакировании. Из результатов расчетов следует, что в момент времени $t = 0,5$ с, когда лазерный луч сфокусирован на кромке зубчатой передачи, температура в центре лазерного пятна увеличивается до 2500 °С. Это значение превышает температуру плавления как порошка, так и основы. Иными словами, при таких условиях после прохода лазера формируется расплавленная зона. Температура постепенно стабилизируется и составляет приблизительно 2400 °С. На заключительном этапе температура быстро увеличивается до 3300 °С. В результате экстремального нагрева, вызванного лазерным энергоподводом, воздействующим на основу и покрытие, возможно разрушение на лицевой стороне зубчатой передачи.

На рис. 3 показан профиль температуры в поперечном сечении зуба в окрестности теплового пятна при $t = 10$ с (r — расстояние от центра факела до некоторой точки). Анализ распределений изотерм, температурного градиента и температуры позволяет сделать следующие выводы.

Таблица 1

Характеристики материала покрытия (порошок сплава на основе никеля),
зависящие от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(\text{мм}\cdot^\circ\text{C})}$	$c, \text{Дж/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})}$	$\gamma, \text{Вт/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})}$
20	7820	0,050	460	1,0
250	7700	0,047	480	3,5
500	7610	0,040	530	5,2
750	7550	0,027	675	10,0
1000	7490	0,030	670	15,0
1500	7350	0,035	660	30,0
1700	7300	0,140	780	31,0
2500	7090	0,142	820	35,0

Таблица 2

Характеристики материала основы, зависящие от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(\text{мм}\cdot^\circ\text{C})}$	$c, \text{Дж/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})}$	$\gamma, \text{Вт/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})}$
20	8410	0,0126	410	1,0
250	8410	0,0132	452	3,5
500	8410	0,0140	485	5,2
750	8410	0,0154	546	10,0
1000	8410	0,0183	642	15,0

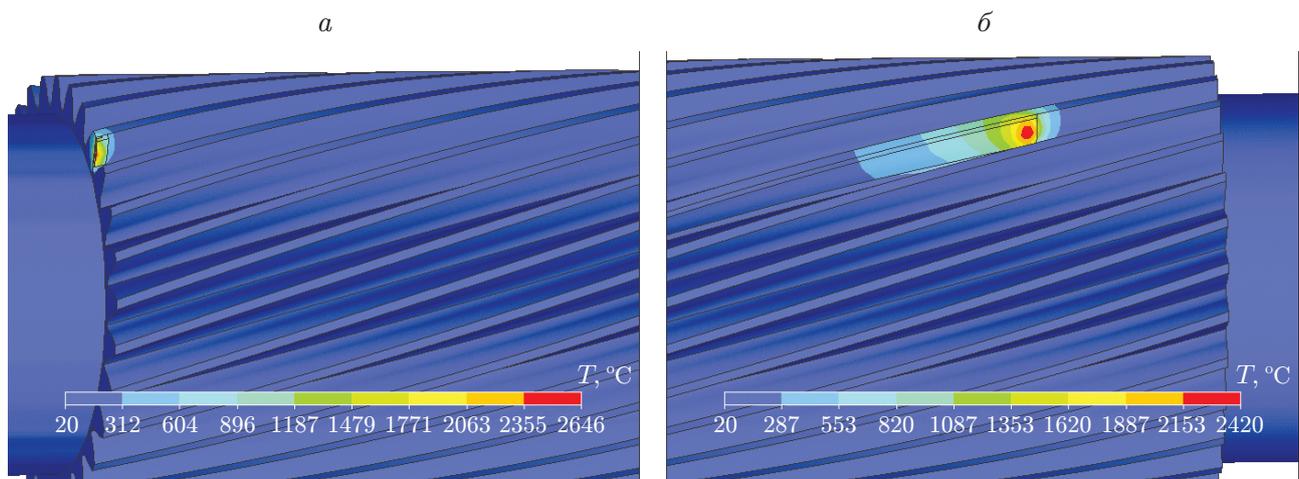


Рис. 2. Поле температуры на поверхности зуба геликоидальной передачи при лазерном плакировании:
 a — $t = 0,5$ с, b — $t = 28$ с

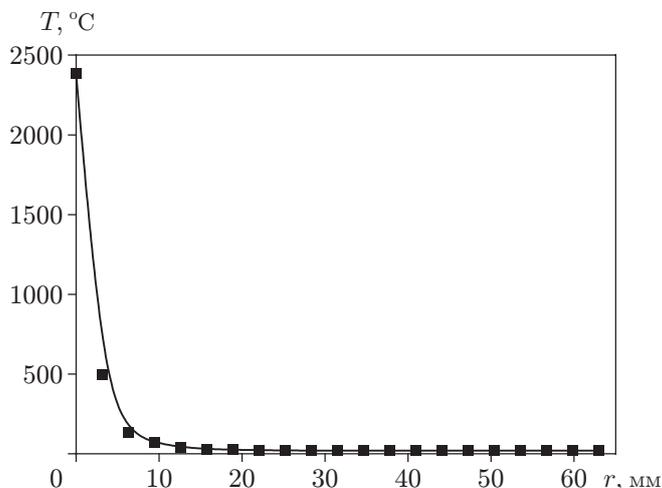


Рис. 3. Распределение температуры в поперечном сечении зуба в окрестности теплового пятна при $t = 10$ с

При $t = 10$ с изотерма, соответствующая температуре $T = 1400$ °C, проходит по границе наносимого слоя покрытия и даже смещается вглубь основы зубчатой передачи. Таким образом, слой наносимого покрытия и поверхность зуба плавятся одновременно, за счет чего обеспечивается их соединение.

Максимум градиента температуры имеет место между плакирующим слоем и основанием зуба. Высокая концентрация температурных напряжений в этой области способствует появлению трещин в плакирующем слое на поверхности зуба [23].

В процессе лазерного плакирования температура на расстоянии от теплового пятна, равном 10 мм, быстро уменьшается до значения, практически равного температуре окружающей среды. Большая часть тепла, генерируемого лазером, сконцентрирована внутри восстанавливаемого зуба, и тепло практически не распространяется внутрь зубчатой передачи и вала.

5. Оптимизация процесса плакирования. Из результатов расчетов следует, что плотность изотерм очень высока вблизи кромки зуба. Изотерма, соответствующая значению температуры, равному температуре плавления материала зуба, глубоко проникает в материал вблизи кромки. Таким образом, при одновременном плакировании поверхности зуба и его кромки кромка нагревается до температуры, превышающей температуру плавления.

При лазерном плакировании в случае перегрева происходит разрушение кромки зуба, при этом нарушается геометрия зубчатой передачи.

Из результатов анализа полученных температурных полей следует, что в процессе плакирования поверхности зуба необходимо выполнять два прохода лазером. При первом проходе диаметр лазерного луча должен быть уменьшен для предотвращения облучения кромки зуба. Это позволит избежать неэффективного и некачественного плакирования.

После первого прохода зубчатое колесо необходимо повернуть на определенный угол α , чтобы касательная плоскость к покрытию вблизи кромки и плоскость вершины зуба O располагались под одним и тем же углом к горизонтали (рис. 4). Затем выполняется второй проход.

Эффективность описанного выше способа лазерного плакирования вершины зуба с использованием двух проходов лазером подтверждается экспериментальными данными. При этом отсутствуют повреждения на кромке зуба. Толщина покрытия на вершине зуба составляла приблизительно 1 мм.

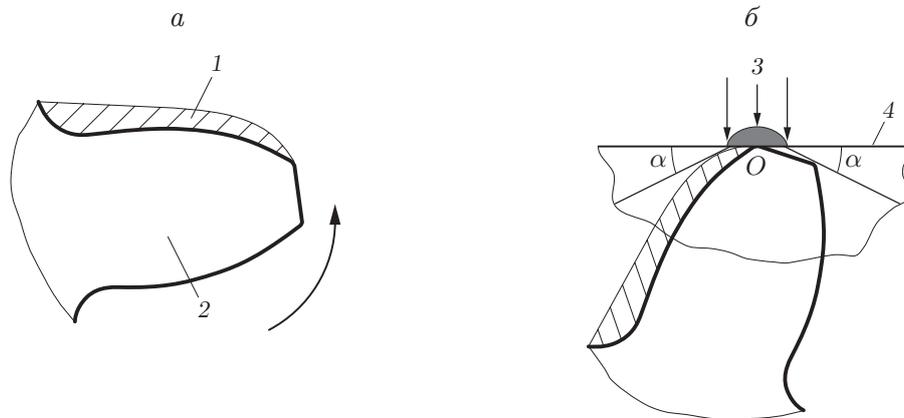


Рис. 4. Схема оптимального процесса лазерного плакирования на кромке зуба:
a — покрытие, *б* — покрытие на вершине зуба; 1 — покрытие, 2 — зуб, 3 — лазерный луч, 4 — горизонтальная плоскость

Заключение. В работе приводятся результаты численного моделирования поля температур при лазерном плакировании. Выполнено сравнение расчетных данных и результатов экспериментов. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Большая часть тепла, генерируемого лазерным излучением, сконцентрирована внутри зуба. При этом имеет место большой градиент температуры. Вблизи кромки зуба изотермы расположены достаточно плотно. В случае если рабочая поверхность и кромка зуба обрабатываются за один проход лазером, возможны чрезмерное плавление и повреждение кромки зуба.

Рабочая поверхность и кромка зуба должны плакироваться последовательно за два прохода лазером. При первом проходе следует уменьшить диаметр лазерного пятна и скорректировать положение образца, чтобы избежать появления дефектов покрытия на кромке зуба. Далее зубчатое колесо нужно повернуть на определенный угол и провести обработку кромки зуба. Эксперименты показали, что данным способом можно получить качественное плакирующее покрытие на всех восстанавливаемых поверхностях зуба. Проведен численный анализ температурного поля для геликоидальной зубчатой передачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zou J. S., Xu F., Lu L.** The status quo of gear surface modification technology // J. Jiangsu Univ. Sci. Technol.: Natural Sci. Ed. 2009. V. 23, N 2. P. 113–116.
2. **Zhao L. J., Shi H.** Overview on gear transmission wear and its repair // J. Construct. Machinery. 2007. V. 5, N 2. P. 243–246. (In Chinese.)
3. **Song J. L., Deng Q. L., Chen C. Y., et al.** Rebuilding of metal components with laser cladding forming // Appl. Surf. Sci. 2006. V. 252. P. 7934–7940.
4. **Tian Y. S., Chen C. Z., Li S. T., Huo Q. H.** Research progress on laser surface modification of titanium alloys // Appl. Surf. Sci. 2005. V. 242. P. 177–184.
5. **Hazra M., Mondal A. K., Kumar S., et al.** Laser surface cladding of MRI 153M magnesium alloy with (Al + Al₂O₃) // Surface Coat. Technol. 2009. V. 203, N 16. P. 2292–2299.
6. **Gary J. E., Luan B.** Protective coatings on magnesium and its alloys: a critical review // J. Alloys Compounds. 2002. V. 336. P. 88–113.
7. **Huang F. X., Jiang Z. H., Liu X. M., et al.** Microstructure and properties of thin wall by laser cladding forming // J. Mater. Process Tech. 2009. V. 209. P. 4970–4976.

8. **Huang Y. J., Zeng X. Y.** Investigation on cracking behavior of Ni-based coating by laser-induction hybrid cladding // J. Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256. P. 5985–5992.
9. **Guo C., Zhou J. S., Chen J. M., et al.** High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings // J. Wear. 2011. V. 270. P. 492–498.
10. **Cui C. Y., Guo Z. X., Liu Y. H., et al.** Characteristics of cobalt-based alloy coating on tool steel prepared by powder feeding laser cladding // J. Opt. Laser Technol. 2007. V. 39. P. 1544–1550.
11. **Zhou S. F., Dai X. Q., Zheng H. Z.** Analytical modeling and experimental investigation of laser induction hybrid rapid cladding for Ni-basedWC composite coatings // J. Opt. Laser Technol. 2011. V. 43. P. 613–621.
12. **Liu X. B., Yu Y. M.** Recent developments in laser surface treatments and rapid manufacturing // J. Laser Optoelectron. Progress. 2005. V. 42, N 4. P. 48–52.
13. **Grum J., Slabe J. M.** A comparison of tool-repair methods using CO₂ laser surfacing and arc surfacing // J. Appl. Surf. Sci. 2003. V. 208/209. P. 424–431.
14. **Liu H. X., Wang C. Q., Zhang X. W., et al.** Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surface by laser cladding with Ni60CuMoW alloy powder // Surface Coat. Technol. 2013. V. 228. P. S296–S300.
15. **Hao M. Z., Sun Y. W.** A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 64. P. 352–360.
16. **Luo F., Yao J. H., Hu X. X., Chai G. Z.** Effect of laser power on the cladding temperature field and the heat affected zone // J. Iron Steel Res., Intern. 2011. V. 18. P. 73–78.
17. **Jendrzejewski R., Śliwiński G., Krawczuk M., Ostachowicz W.** Temperature and stress fields induced during laser cladding // Comput. Structures. 2004. V. 82. P. 653–658.
18. **Smurov I., Doubenskaia M., Zaitsev A.** Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation // Surface Coat. Technol. 2013. V. 220. P. 112–121.
19. **Chen L., Gu C. Z., Xie P. L.** Numerical analysis and experimental research of collapsing of tooth-tip in laser cladding on teeth surfaces // Proc. of the 3rd Intern. conf. on advanced comput. theory engng, 20–22 Aug. 2010. Chengdu: IEEE, 2010. V. 4. P. 293–297.
20. **Hirsch J. W., Olson L. G., Nazir Z., Alexander D. R.** Axisymmetric laser welding of ceramics: comparison of experimental and finite element results // Opt. Lasers Engng. 1998. V. 29. P. 465–484.
21. **Alimardani M., Toyserkani E., Huissoon J. P.** A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process // Opt. Lasers Engng. 2007. V. 45. P. 1115–1130.
22. **Yilbas B. S., Akhtar S. S., Karatas C.** Laser surface treatment of Inconel 718 alloy: thermal stress analysis // Opt. Lasers Engng. 2010. V. 48. P. 740–749.
23. **Song J. L., Deng Q. L., Ge Z. J., et al.** The cracking control technology of laser rapid forming nickel-based alloys // J. Shanghai Jiaotong Univ. 2006. V. 40, N 3. P. 548–552.

*Поступила в редакцию 24/III 2014 г.,
в окончательном варианте — 8/X 2014 г.*