УДК 62-408.2 DOI: 10.15372/PMTF202215216

ЛАЗЕРНЫЙ ПЕРЕПЛАВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МАРКИ 304

Ю. Л. Чэнь, С. Ли, Ц. Я. Лю, И. Ч. Чзан, С. Х. Чэнь*

Технологический университет г. Хэфэй, Хэфэй, Китай

* Университет им. Цзяньчжу провинции Аньхой, Хэфэй, Китай E-mails: chenyuanlong@hfut.edu.cn, lix1117@163.com, ljyhfut@163.com, zyc346121469@163.com, xhenxh@163.com

Изучено влияние скорости лазерного сканирования при переплаве поверхностного слоя нержавеющей стали марки 304 на его микроскопическую морфологию, твердость, шероховатость, адгезию и коррозионную стойкость. Данные проведенных экспериментов показывают, что в результате лазерного переплава поверхность подложки из нержавеющей стали марки 304 упрочняется. Установлено, что твердость по Виккерсу подложки до переплава равна 185, максимальная твердость после переплава — 248,9. С увеличением скорости сканирования шероховатость поверхности постепенно уменьшается, сила сцепления сначала увеличивается, а затем уменьшается. Максимальная сила сцепления составляет 26,1 Н. При скорости сканирования, равной 20 мм/с, распределение фаз в переплавленном слое более равномерное. Максимальный потенциал самокоррозии переплавленного слоя равен -0,718 В, плотность тока, при которой происходит самокоррозия, — 3,872 А/см². Показано, что в результате лазерного переплава свойства поверхностного слоя нержавеющей стали марки 304 улучшаются.

Ключевые слова: лазерный переплав поверхностного слоя, нержавеющая сталь марки 304, скорость сканирования, переплавленный слой

Введение. Нержавеющая сталь марки 304 — аустенитная нержавеющая сталь, обладающая высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Эта сталь широко используется в промышленности при изготовлении теплообменников, химических реакторов и различных резервуаров. Однако низкая поверхностная твердость этого материала ограничивает его применение [1]. Для улучшения таких поверхностных свойств стали марки 304, как твердость и коррозионная стойкость, используются газовое науглероживание, азотирование и борирование. Однако науглероженные и азотированные слои получаются тонкими, борированные слои хрупкие и легко отслаиваются [2]. При лазерном переплаве поверхностного слоя не добавляются какие-либо элементы, лазерный луч быстро расплавляет поверхность, которая затем затвердевает. На поверхности формируется переплавленный слой определенной толщины, механические и физические свойства которого лучше свойств подложки. Этот слой имеет бо́льшие износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление усталости. Лазерный переплав поверхностного слоя — достаточно простой технологический процесс, позволяющий управлять толщиной переплавленного

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда естественных наук Университета им. Цзяньчжу провинции Аньхой (грант № 2019QDZ20) и Главной лаборатории естественных наук провинции Аньхой (грант № КJ2019A0798).

слоя [3]. В последнее время выполнено большое количество экспериментальных исследований технологии лазерного переплава поверхностного слоя.

В работе [4] экспериментально и с использованием моделирования проанализировано влияние параметров процесса лазерной переплавки слоев керамики из оксида циркония, стабилизированного иттрием, на образование трещин и характер распределения напряжений. Установлено, что минимальные остаточные напряжения и минимальное количество трещин в переплавленном слое образуются при мощности излучения 1500 Вт и скорости сканирования 9 мм/с. В [5] исследован механизм формирования затвердевшей микроструктуры при разделении твердой и жидкой фаз с использованием технологии лазерного переплава поверхностного слоя при скорости сканирования 2 и 8 м/мин.

В работе [6] метод лазерного переплава поверхностного слоя использовался для восстановления растрескавшихся элементов из ковкого чугуна. В [7] изучено влияние плотности лазерной энергии на микроструктуру и механические свойства теплозащитного покрытия, полученного с использованием лазерного переплава поверхностного слоя. Установлено, что твердость, размер трещин и толщина переплавленного слоя термозащитных покрытий увеличиваются с увеличением плотности лазерной энергии.

В работе [8] с использованием модели неравномерного упрочнения изучено влияние напряженного состояния на распространение трещин в зоне плавления при лазерном переплаве поверхностного слоя. В [9] исследовано влияние лазерного переплава поверхностного слоя стали марки Q235 и лазерного термического напыления аморфных покрытий Al85Ni8Y4Ce3 на коррозионные характеристики в растворе NaCl. Экспериментально установлено, что защитная пленка, полученная при лазерном переплаве поверхностного слоя, имеет высокую коррозионную стойкость и содержит дефекты с низкой плотностью распределения. В работе [10] метод лазерного переплава поверхностного слоя использован для устранения трещин и пористости в термозащитных покрытиях, повышения их стойкости к высокотемпературной коррозии, уменьшения термических напряжений.

В данной работе изучается влияние лазерного переплава поверхностного слоя нержавеющей стали марки 304 на его микроструктуру, шероховатость, твердость, адгезию и коррозионную стойкость.

1. Метод лазерного переплава поверхностного слоя. При лазерном переплаве поверхностного слоя используется высокоэнергетический лазерный луч для непрерывного сканирования заготовки, в результате чего происходит быстрое охлаждение и затвердевание расплава. При этом улучшается структура сплава, уменьшается сегрегация и образуется субстабильная фаза [11].

При лазерном переплаве поверхностного слоя два световых пятна перекрываются. Чем больше площадь перекрытия пятен, тем больше энергия, действующая на поверхность материала. Площадь перекрытия пятен может быть изменена за счет изменения скорости сканирования. Поскольку размеры пятна очень небольшие, а длительность импульса значительно меньше интервала между соседними импульсами, при получении формулы для скорости перекрытия пятна величина, обратная частоте импульсов, аппроксимируется интервалом времени между двумя соседними импульсами [12]:

$$\varphi = \frac{d - v/f}{d}.$$

Здесь φ — скорость перекрытия пятна; d — диаметр пятна; v — скорость сканирования; f — частота лазерного импульса; v/f — расстояние между центрами пятен.

От скорости перекрытия пятен зависит количество лазерной энергии, выделяемой на поверхности нержавеющей стали. При фиксированных значениях частоты лазерного импульса и размера пятна скорость перекрытия пятен зависит только от скорости сканирования. По мере увеличения скорости сканирования расстояние между центрами соседних пятен увеличивается, площадь перекрытия пятен и количество импульсов на единицу площади уменьшаются, что приводит к выделению меньшего количества лазерной энергии на поверхности нержавеющей стали. В экспериментах скорость перекрытия пятен варьировалась путем изменения скорости сканирования v, которая была принята равной 10, 20, 30 и 40 мм/с. Параметры лазерного сканирования имели следующие значения: мощность излучения 5 Вт, расстояние между строками сканирования 0,1 мм, частота лазерного импульса 80 кГц, ширина импульса 100 нс, диаметр пятна 0,5 мм.

2. Параметры испытаний и материалы. В эксперименте использовались образцы размером 20 × 20 × 3 мм, изготовленные из нержавеющей стали марки 304. До начала эксперимента рабочая поверхность очищалась ультразвуком с использованием безводного этанола и высушивалась. Для переплава поверхностного слоя образца использовался импульсный волоконный лазер с длиной волны, равной 1064 нм.

2.1. Микроморфология поверхности. Морфология поверхности и микроструктура образцов после лазерного переплава исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа, а виды и содержание химических элементов на поверхности анализировались методом рентгеновской спектроскопии. На рис. 1 показаны морфология поверхности и содержание химических элементов в переплавленном слое при различных значениях скорости лазерного сканирования v (ω — массовая доля, A — атомная доля). Видно, что при

a				б			
et en e	T	П	-1 •1	and a second	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		• 2
Элемент	$\omega, \%$	A, %	a here	Элемент	$\omega, \%$	A, %	
0	34,08	64,24		0	32,58	62,50	the start of the
${\rm Fe}$	58,44	31,56		${\rm Fe}$	$52,\!40$	28,80	N Martin and
Cr	5,16	2,99	10	Cr	12,19	7,20	-10
Mn	0,64	0,35		Mn	0,63	0,35	



Рис. 1. Микроморфология поверхности образца из нержавеющей стали после лазерного переплава при различных значениях скорости сканирования: $a - v = 10 \text{ мм/c}, \ \delta - v = 20 \text{ мм/c}, \ \epsilon - v = 30 \text{ мм/c}, \ \epsilon - v = 40 \text{ мм/c}; \ I -$ микротрещина, II — шлак; 1–4 — точки, в которых проводились измерения

скорости сканирования v = 10 мм/с скорость перекрытия пятен, энергия лазера, излучаемая на поверхность нержавеющей стали, и степень изменения поверхности нержавеющей стали наибольшие. Подложка быстрее плавится и испаряется при очень высокой температуре, на поверхности имеется большое количество комковатого расплавленного материала, вследствие чего разрушается образовавшийся переплавленный слой. При этом имеет место большой градиент температуры, в материале наблюдается дисбаланс внутренних тепловых напряжений, на поверхности образуются микротрещины.

При скорости сканирования v = 20 мм/с морфологические изменения в переплавленном слое более четко выражены. В тот момент, когда луч лазера достигает поверхности нержавеющей стали, энергия лазера и поток расплава достигают динамического равновесия. Материал подложки медленнее плавится, а поверхность свободна от микротрещин, при этом качество поверхности переплавленного слоя лучше.

При скорости сканирования v = 40 мм/с скорость перекрытия пятна в единицу времени мала, на поверхности материала образуется тонкий расплавленный слой, микротрещины и шлак отсутствуют, поверхность достаточно светлая и ровная. При этом изменение поверхности нержавеющей стали незначительно.

2.2. Шероховатость поверхности. Для количественного анализа поверхности материалов в микронном и субмикронном масштабах используются трехмерные лазерные измерительные микроскопы. На рис. 2 показана шероховатость h переплавленного поверхностного слоя нержавеющей стали при различных значениях скорости сканирования. С увеличением скорости сканирования шероховатость поверхности нержавеющей стали постепенно уменьшается. При v = 10 мм/с шероховатость поверхности равна 6,331 мкм, при v = 40 мм/с она составляет 4, 373 мкм. При скорости сканирования v = 10 мм/с в области сканирования поверхностью поглощается большое количество лазерной энергии,



Рис. 2. Профили и шероховатость переплавленного поверхностного слоя нержавеющей стали при различных значениях скорости сканирования: $a-v=10~{\rm mm/c}~(R_a=6,331~{\rm mkm}),~\delta-v=20~{\rm mm/c}~(R_a=5,482~{\rm mkm}),~e-v=30~{\rm mm/c}~(R_a=5,121~{\rm mkm}),~e-v=40~{\rm mm/c}~(R_a=4,373~{\rm mkm})$

заготовка быстро нагревается и плавится, при этом под действием поверхностного натяжения постепенно образуются небольшие выпуклости, в результате чего после охлаждения и затвердевания формируется шероховатая плоскость. При v = 40 мм/с поверхность нержавеющей стали поглощает меньшее количество энергии, степень изменения поверхности нержавеющей стали уменьшается, при этом происходит перераспределение ванны расплава под действием капиллярных и термических капиллярных сил (сил Марангони), шероховатость поверхности уменьшается и она становится гладкой [13].

2.3. Адгезия и микротвердость. Силы адгезии (силы сцепления между переплавленным слоем и подложкой) является важным показателем надежности переплавленного слоя. Для определения микротвердости переплавленного слоя использовался автоматический склерометр WS-2005. В эксперименте прикладывалась нагрузка, равная 40 H, длина царапины составляла 3 мм, глубина — 2 мм, частота возвратно-поступательного движения склерометра — 1 1/с, длительность статического прессования — 30 с. Каждая группа образцов испытывалась 3–5 раз.

Твердость, являющаяся важным показателем свойств материала, характеризует способность переплавленного слоя сопротивляться прониканию посторонних металлических частиц, а также характеризует прочность, износостойкость, упругопластичность и ударную вязкость переплавленного слоя [14]. Для определения твердости переплавленного слоя использовался микротвердомер HVS-50ZCTC. В экспериментах нагрузка составляла 490 Н, длительность воздействия нагрузки — 10 с, расстояние между точками измерения — 0,8 мм. В данной работе микротвердость измерялась в основном по Виккерсу (HV). В различных точках на поверхности образца проводилось по три измерения, среднее значение принималось в качестве значения микротвердости переплавленного слоя. На рис. З приведены зависимости сил адгезии и микротвердости от скорости сканирования. Видно, что с увеличением скорости сканирования силы адгезии между переплавленным слоем и подложкой сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. При скорости сканирования v = 10 мм/с поверхность нержавеющей стали поглощает большое количество энергии лазера, происходит существенная абляция подложки (см. рис. 1, a), а на поверхности переплавленного слоя появляются скопления шлака и микротрещины, что приводит к уменьшению сил адгезии между переплавленным слоем и подложкой. При увеличении скорости сканирования до v = 20 мм/с формируется плотный переплавленный слой боль-



Рис. 3. Зависимости сил адгези
и F_{ad} (1) и микротвердости HV (2) от скорости сканирования



Рис. 4. Рентгеновские спектрограммы (1, 2) и дифрактограммы (3, 4) поверхности нержавеющей стали марки 304 до (1, 3) и после (2, 4) лазерного переплава

шой толщины, практически не содержащий шлаков и микротрещин, силы сцепления с подложкой увеличиваются. При v = 40 мм/с влияние лазера на изменение поверхности нержавеющей стали ослабевает, появляется только тонкий переплавленный слой, подложка практически не изменяется и силы адгезии уменьшаются.

С увеличением скорости сканирования твердость переплавленного слоя сначала увеличивается, а затем уменьшается. При скорости сканирования v = 10 мм/с поверхность нержавеющей стали аккумулирует большее количество энергии, ее твердость уменьшается и на ней появляются куски шлака и микротрещины. При v = 20 мм/с твердость переплавленного слоя достигает максимума. В основном это обусловлено большей скоростью охлаждения переплавленного слоя, в котором аустенит выделяется из жидкой фазы, а имеющий относительно высокую твердость и бо́льшую температуру плавления феррит остается на границах аустенитных зерен. Воздействие высокой температуры приводит к частичному превращению аустенита в феррит и образованию небольшого количества карбидной фазы, выделяющейся на границе аустенитной и ферритной фаз, что приводит к увеличению его твердости [15]. При увеличении скорости сканирования до значения v = 40 мм/с воздействие лазерного луча на нержавеющую сталь ослабевает, на поверхности образуется только тонкий переплавленный слой, твердость которого уменьшается.

На рис. 4 представлены рентгенограммы поверхности нержавеющей стали марки 304 до и после переплава. После лазерного переплава на поверхности нержавеющей стали образуется оксидный слой, состоящий в основном из оксидов Cr, Fe и Mn. До лазерной обработки химический состав поверхности включал α -Fe и γ -Fe. После лазерной обработки максимальная концентрация γ -Fe увеличилась, а максимальная концентрация α -Fe уменьшилась. Фаза γ -Fe имеет гранецентрированную кубическую решетку, а фаза α -Fe объемно центрированной, фаза γ -Fe имеет бо́льшие твердость и коррозионную стойкость, чем фаза α -Fe.

2.4. Коррозионная стойкость. Чем больше потенциал самокоррозии переплавленного слоя, тем меньше скорость диффузии и больше коррозионная стойкость. Для определения коррозионной стойкости материалов обычно используются потенциал самокоррозии E_c и



Рис. 5. Потенциодинамические поляризационные кривые для поверхности нержавеющей стали, полученные до лазерного переплава (1) и после лазерного переплава при различных значениях скорости сканирования (2–5): 2 — v = 10 мм/c, 3 - v = 20 мм/c, 4 - v = 30 мм/c, 5 - v = 40 мм/c

Поверхность нержавеющей стали	E_c, \mathbf{B}	$I_c \cdot 10^6, {\rm A/cm^2}$
До переплава	-0,820	16,720
После переплава при:		
v = 10 MM/c	-0,763	4,969
v = 20 MM/c	-0,718	$3,\!872$
v = 30 MM/c	-0,798	4,335
v = 40 MM/c	-0,809	5,288

Электрохимические данные для подложки и переплавленного слоя

сила тока I_c , при которой происходит коррозия. Поляризационная кривая переплавленного слоя определялась с использованием электрохимического анализатора серии CHI600E. Электрод сравнения представлял собой насыщенный каломельный электрод, в качестве вспомогательного электрода использовался платиновый электрод, диапазон напряжения при сканировании составлял $-2 \div 4$ В. В качестве электролита использовался раствор NaNO₃, скорость сканирования составляла 5 мB/с.

На рис. 5 представлены полученные в эксперименте поляризационные кривые. В таблице приведены электрохимические данные о подложке и переплавленном слое. Из таблицы следует, что с увеличением скорости сканирования потенциал самокоррозии и плотность тока самокоррозии переплавленного слоя сначала увеличиваются, а затем уменьшаются.

При скорости сканирования v = 10 мм/с на поверхности нержавеющей стали накапливается большое количество энергии (см. рис. 1,*a*), при этом образуется расплавленный материал, появляются микротрещины, раствор NaNO₃ через трещины поступает в переплавленный слой, вследствие чего этот слой имеет низкую коррозионную стойкость. При v = 20 мм/с на поверхности нержавеющей стали в процессе лазерного переплава образуется плотный переплавленный слой, который практически не разрушается анионами в растворе NaNO₃, защищая материал при электрохимических реакциях. При этом корро-



Рис. 6. Макроизображения после воздействия коррозии при различных значениях скорости сканирования:

a-v=10 мм/с, $\delta-v=20$ мм/с, s-v=30 мм/с, z-v=40 мм/с

зионная стойкость увеличивается. При v = 40 мм/с изменение поверхности нержавеющей стали под действием лазерного луча незначительно, на поверхности формируется только тонкий переплавленный слой, коррозионная стойкость увеличивается незначительно.

Также исследовались морфология поверхности при воздействии коррозии и механизм коррозии. На рис. 6 представлены макроизображения поверхности нержавеющей стали после воздействия коррозии.

Заключение. Проведено исследование влияния лазерного переплава на микроструктуру, механические свойства и коррозионную стойкость переплавленного слоя на поверхности нержавеющей стали марки 304. Получены следующие основные результаты.

При скорости сканирования, равной 10 мм/с, на поверхности переправленного слоя появляются микротрещины и имеется большое количество комков, образовавшихся из расплавленного материала. При скорости сканирования, равной 20 мм/с, практически не накапливается шлак и не появляются микротрещины, при этом образуется плотный переплавленный слой большой толщины. При скорости сканирования, равной 40 мм/с, формируется тонкий и рыхлый переплавленный слой, воздействие лазерного луча незначительно.

С увеличением скорости сканирования сила адгезии между переплавленным слоем и подложкой сначала увеличивается, а затем уменьшается; максимальная сила сцепления составляет 26,1 Н.

До лазерного переплава твердость подложки по Виккерсу равна 185, после лазерного переплава ее максимальное значение составляет 248,9.

С увеличением скорости сканирования потенциал самокоррозии и плотность тока самокоррозии переплавленного слоя сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. При скорости сканирования, равной 20 мм/с, максимальный потенциал самокоррозии переплавленного слоя составляет -0,718 В, что на 0,102 В больше потенциала самокоррозии подложки. Максимальная плотность тока самокоррозии переплавленного слоя составляет 3,872 A/cm², что в 4,3 раза меньше плотности тока подложки.

ЛИТЕРАТУРА

- Dywel P., Szczesny R., Domanowski P., Skowronski L. Structural and micromechanical properties of nd:yag laser marking stainless steel (AISI 304 and AISI 316) // Materials. 2020. V. 13, N 9. 2168.
- Chen X. X., Huang C. W., Xu Z. L., et al. Study on surface boronizing modification of Ti-55531 alloy with lamellar microstructure // Rare Metals Cemented Carbides. 2022. V. 50, N 3. P. 65–71 (in Chinese).
- Kotarska A. The laser alloying process of ductile cast iron surface with titanium // Metals. 2021. V. 11, N 2. 282.
- Yi P., Zhu X. Y., Jiang Y. L., et al. Research of laser remelting on the thermal-mechanical behaviors and heat treatment of yttria-stabilized zirconia coatings // Intern. J. Appl. Ceram. Technol. 2020. V. 17, N 5. P. 2171–2181.
- Zhang L. T., Yu G., He X. L., et al. Phase separated characteristics affected by cooling rate of immiscible Cu–Cr alloy by laser surface melting // J. Alloy Compounds. 2019. V. 772. P. 209–217.
- Ma S. Y., Zhou T., Zhou H., et al. Bionic repair of thermal fatigue cracks in ductile iron by laser melting with different laser parameters // Metals. 2020. V. 10, N 1. 101.
- Xu S. Q., Zhu C., Zhang Y. Effects of laser remelting and oxidation on NiCrAlY/8Y₂O₃-ZrO₂ thermal barrier coatings // J. Thermal Spray Technol. 2017. V. 27, N 2. P. 1–11.
- Yang H., Zhou T., Wang Q., Zhou H. Effects of laser melting distribution on wear resistance and fatigue resistance of gray cast iron // Metals. 2020. V. 10, N 9. 1257.
- Pei C. G., Guo Z. X., Xiao J. G. Effect of laser remelting on the corrosion properties of laser thermal sprayed Al85Ni8Y4Ce3 amorphous coatings // Lasers Engng. 2021. V. 51, iss. 1–5. P. 15–27.
- Pakseresht A. H., Kimiayi A., Alizadeh M., et al. Microstructural study and hot corrosion behavior of bimodal thermal barrier coatings under laser heat treatment // Ceram. Intern. 2020. V. 46, N 11. P. 19217–19227.
- 11. Chen Y. L., Li X., Liu J. Y., et al. Effect of scanning speed on properties of laser surface remelted 304 stainless steel // Micromachines. 2022. V. 13. 1426.
- Wen T., Chen H., Wang Q., et al. Effects of laser cleaning overlap rate on surface morphology and corrosion performance of 5A06 aluminum alloy // Hot Working Technol. 2022. V. 51, N 18. P. 98–102 (in Chinese).
- Xu J. L., Zou P., Wang W. J., Yang X. L. Numerical modeling and analysis of laser polishing based on ablation principle // J. Northeastern Univ. (Natural Sci.) 2020. V. 41, N 12. P. 1760–1766 (in Chinese).
- Fomin V. M., Golyshev A. A., Malikov A. G., et al. Creation of a functionally gradient material by the selective laser melting method // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2020. V. 61, N 5. P. 878–887.
- Zhao Y., Hao G. J., Deng C., Ma W. Study of orthogonal test of the tribological properties of the surface texturing coating // Procedia Engng. 2011. V. 24. P. 53–58.

Поступила в редакцию 11/X 2022 г., после доработки — 23/XI 2022 г. Принята к публикации 28/XI 2022 г.