

УДК 621.78.72:621.431.73

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

И.М. Саковец, И.В. Царенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Задачи повышения износостойкости деталей машин чаще всего решаются путем применения специальных легированных дорогостоящих материалов, с помощью объемной или поверхностной ТВЧ закалки, наплавкой высокотвердыми износостойкими материалами с последующей механообработкой, либо за счет хромирования или азотирования поверхности и т.д. Эти процессы широко известны, и в определенной степени повышают износостойкость и срок службы деталей. Однако они достаточно трудоемки, энерго- и материалоемки, имеют продолжительный технологический цикл.

В качестве способа кардинально повышающего износостойкость предлагается технология локального лазерного упрочнения быстроизнашивающихся участков поверхностей деталей [1]. Это способ повышения износостойкости и срока службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоемких и энергоемких подготовительных и последующих доводочных операций. Повышение износостойкости поверхности после лазерной закалки достигается за счет структурно-фазовых изменений поверхностного слоя на глубину 0,3-1,0 мм без оплавления поверхности, без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали. Такая возможность обеспечивается за счет заданного распределения плотности мощности в пятне излучения многолучевого лазера. Благодаря возможности локального упрочнения только быстроизнашивающихся участков (а не всей детали), высокой линейной скорости обработки и автоматизации управления технологическим процессом, лазерное поверхностное термоупрочнение отличается от известных уже традиционных методов коротким технологическим циклом, оперативностью выполнения работ, относительно низкой удельной энерго-, трудо-, материалоемкостью и, соответственно, низкой стоимостью.

Технологические параметры лазерной закалки, такие как, удельная мощность, время прогрева, скорость плавления и кристаллизации определяет структуру поверхностного слоя и, как следствие, и его свойства.

При лазерной закалке высокопрочного чугуна можно получить сложную структуру закаленного слоя состоящего из феррита, аустенита, мартенсита и цементита в зависимости от выбранных технологических

режимов [2]. Согласно исследованиям механизма растворения углерода [3] упрочненный при лазерной обработке чугуна с шаровидным графитом состоит из четырех слоев: (1) оплавленный слой со структурой ледебурита, метастабильного аустенита и мартенсита; (2) полуоплавленный слой со структурой остаточного шаровидного графита, отростки ледебурита вокруг шаровидного графита, мартенсита и остаточного аустенита; (3) слой продуктов превращения в твердом состоянии со структурой остаточного шаровидного графита, остаточного феррита, скрытокристаллического мартенсита и небольшого количества остаточного аустенита; (4) переходная прослойка со структурой шаровидного графита, дисперсного феррита, скрытокристаллического мартенсита и перлита. Было установлено, что наибольшей износостойкостью обладает оплавленная прослойка, на втором месте прослойка продуктов превращения в твердом состоянии. Относительная толщина каждой прослойки может регулироваться параметрами лазерной обработки.

Лазерное оплавление чугуна с поперечным перемещением луча приводит к повышению твердости и не вызывает растрескивание, причем увеличение твердости сложным образом зависит от скорости перемещения луча, и у каждого типа чугунов по-своему. Формирующаяся после лазерного оплавления структура высокопрочного чугуна зависит от скорости охлаждения и температурного градиента на поверхности раздела жид-кость/твердая фаза. Износостойкость высокопрочного чугуна в результате лазерной обработки может быть повышена почти в 100 раз. Сравнительные исследования показали, что глубина и микротвердость упрочненной в результате лазерной закалки зоны при одинаковых технологических параметрах лазерной обработки у высокопрочного чугуна выше, чем у серого чугуна.

Исследования поверхности ковкого чугуна после лазерной поверхностной закалки показали, что основным фактором, определяющим толщину упрочненного слоя, является плотность мощности лазера, которая определяет оптимальный диапазон скорости перемещения и, соответственно, максимальную температуру поверхности. Было обнаружено, что глубина упрочнения увеличивается с увеличением плотности мощности. Чтобы избежать расплавления поверхности при увеличении плотности мощности, так же увеличивали и скорость перемещения. Полученное в результате увеличение скорости охлаждения приводит к подавлению мартенситного превращения и снижению твердости упрочненного слоя. В исследуемом диапазоне плотности мощности лазера 40,4-80,8 Вт/мм² максимальная глубина зоны лазерной закалки составила 200 мкм [4].

Результаты лазерной закалки ковкого чугуна с перлитно-ферритной матрицей и графитовыми включениями показали, что увеличение скорости охлаждения во время затвердевания увеличивается содержание углерода в

аустенитной фазе, что ингибирует мартенситное превращение [5]. Кроме этого, увеличение скорости охлаждения во время затвердевания улучшает эвтектику ледебурита. На твердость зоны расплава также влияет доля остаточного аустенита как морфология эвтектики ледебурита. Из-за высокой доли ледебурита его морфология оказывает значительное влияние на твердость зоны плавления. Кроме того, было обнаружено, что области первичного и эвтектического аустенита содержат сеть пластинчатых вторичных цементитных выделений и нанометрических сферических третичных цементитных выделений. Наиболее высокую среднюю твердость 895 HV_{0.2} показали образцы, упрочненные при мощности излучения 2000 Вт и скорости перемещения 3,33 мм/с.

В зоне лазерного упрочнения серого чугуна с типичной перлитной матрицей и хлопьевидным графитом была получена однородная микроструктура, значения твердости которой варьируются от 700 до 800 HV [6]. Самый глубокий упрочняющий слой, полученный при 1100°C и скорости 4 мм/с, составил 0,4 мм. Область перекрытия, имеющая протяженность примерно от 16,7% до 20,8% от номинальной ширины упрочняющей дорожки, является неизбежным негативным эффектом: в области перекрытия наблюдается резкое снижение значений микротвердости из-за повторного нагрева ранее полученного мартенсита.

В лазерном упрочнении обычно используют двух- или трехстадийные термические циклы. Сравнительный анализ этих циклов по результатам проведения поверхностной закалки различных сталей дан в работах [7, 8]. При двухстадийном термическом цикле нагрев определяется либо длительностью лазерного импульса (при закалке лазерами импульсного действия), либо временем прохождения лазерного луча над заданной точкой поверхности (при закалке лазерами непрерывного действия). А время охлаждения определяется скоростью отвода тепла в глубь детали. Трехстадийный термический цикл включает дополнительно стадию выдержки, во время которой может происходить более полное фазовое и структурное превращение и увеличение глубины закаленного слоя. В сталях с содержанием углерода до 0,5% двухстадийный термический цикл, обеспечивает условия закалки без образования дефектов в виде трещин. Для закалки сталей с содержанием углерода более 0,5% более эффективно применение трехстадийного термического цикла, так как, стадия выдержки детали при высокой температуре обеспечивает более существенное перераспределение углерода по объему. Однако, в высоколегированных сталях сложного состава с большим содержанием углерода длительности лазерного нагрева может быть недостаточно для завершения фазовых превращений, которые определяются временем диффузионных процессов. Лазерная термообработка высоколегированных сталей в некоторых случаях приводит к образованию закалочных структур низкоуглеродистого мартенсита или к появлению наряду с мартенситом большой доли аусте-

нитной фазы. А такой состав, не обеспечивает требуемые механические свойства и износостойкость поверхностей трения [7, 8].

Изучение структуры поверхностного слоя стали 45 после лазерного упрочнения (рис. 1) показало наличие нескольких зон [9]. В верхнем слое глубиной 20...25 мкм наблюдается полное растворение ферритной сетки. Микротвердость в этой зоне 7500...8200 МПа. Ниже следует зона закалки из твердого состояния с микротвердостью 7200...8500 МПа. На месте бывших перлитных зерен образуется мартенсит с небольшим количеством остаточного аустенита. Глубина зоны термического влияния составляет 0,55...0,60 мм при ширине зоны 9,8 мм. Микротвердость ферритных зерен составляет 2800–3500 МПа при исходной твердости феррита 980...1100 МПа.

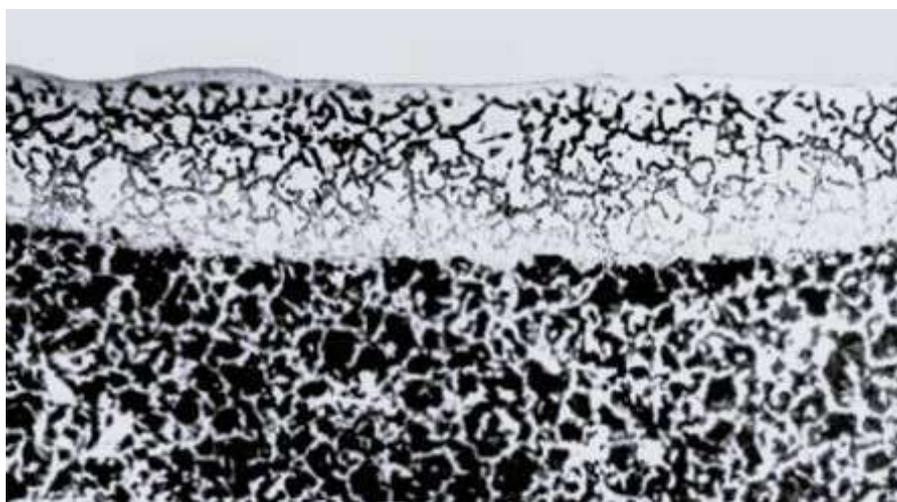


Рис. 1 – Микрошлиф поверхности стали 45, упрочненной сканирующим лазерным лучом

Широкие технологические возможности технологии лазерной закалки: применение различных термических циклов (двух-, трехстадийных), различных режимов лазерного воздействия на поверхность (импульсного, импульсно-периодического, непрерывного) открывают широкие возможности для получения оптимальных закаленных структур металла, в зависимости от его химического состава и требуемых свойств.

Литература

1. Аблаев А.А., Савченко П.В. Восстановление и упрочнение деталей машин на лазерных технологических комплексах //Труды ГОСНИТИ. – 2013. – С.192 – 195

2. Казаков С.С., Гоева В.В. Структурообразование высокопрочного чугуна поршневых колец в зоне лазерного термоупрочнения//Карельский научный журнал. – 2015. – № 2(11). – С. 123 – 128.

3. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.

4. Bomberaer M., Boa M., Akin O. Laser remelting of cast iron microstructure and wear properties // Z. Metallik. 1988, № 12, pp. 806 – 812

5. Czuprynski A., Janicki D., Górkа J., Grabowski A., Wygedacz B., Matus K., Karski W. High-Power Diode Laser Surface Transformation Hardening of Ferrous Alloys // Materials. 2022, vol. 15, pp.1915.

6. Janicki D., Górkа J. Kwasny W., Pakieła W., Matus K. Influence of Solidification Conditions on the Microstructure of Laser-Surface-Melted Ductile Cast Iron // Materials. 2020, vol. 13, 1174 P. pp. 1174 – 1182.

7. Liu A., Previtali B. Laser surface treatment of grey cast iron by high power diode laser // Physics Procedia. 2010, vol. 5, pp. 439 – 448.

8. Бертяев Б.И., Завестовская И.Н., Игошин В.И., Сравнительный анализ двух- и трехстадийных термических циклов при поверхностной лазерной закалке сталей. – Физика и химия обработки материалов, // 1986, №5 С. 88.

9. Бирюков В.П. Лазерное упрочнение и легирование стали. // Фотоника. – 2011. №3. С. 34 – 37.

10. Бирюков В.П., Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3. С. 1 – 14