

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ СТАЛИ 40Х13 ПРИ ЛАЗЕРНОМ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИИ

Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Ряполов Г.В.

Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула

Ключевые слова: лазерное микроstructuring, микротвердость, горячая прокатка, механическое шлифование, лазерная резка.

Аннотация. В работе изучено влияние режимов лазерного микроstructuring на изменение микротвердости поверхностного слоя стали марки 40Х13 с различным исходным состоянием (после горячей прокатки, механического шлифования, лазерной резки). Определен оптимальный технологический режим лазерного микроstructuring, позволяющий получить максимальную микротвердость поверхностного слоя, вне зависимости от его исходного состояния.

THE EFFECT OF THE INITIAL STATE OF THE SURFACE LAYER ON THE CHANGE IN THE MICROHARDNESS OF 40KH13 STEEL DURING LASER MICROSTRUCTURING

Kutepov S.N., Klementyev D.S., Ryaplov G.V.

Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula

Keywords: laser microstructuring, microhardness, hot rolling, mechanical grinding, laser cutting.

Abstract. The effect of laser microstructuring modes on the change in the microhardness of the surface layer of 40Kh13 grade steel with different initial states (after hot rolling, mechanical grinding, and laser cutting) is studied. The optimal technological mode of laser microstructuring has been determined, which makes it possible to obtain the maximum microhardness of the surface layer, regardless of its initial state.

В современном машиностроении, приборостроении и других высокотехнологичных отраслях промышленности к деталям, изготовленным из высоколегированных сталей, предъявляются повышенные требования по износостойкости, коррозионной стойкости и долговечности. Для удовлетворения этих требований необходимо не только совершенствовать состав материалов, но и разрабатывать эффективные методы модификации их поверхностных свойств. Одним из наиболее перспективных решений в этой области является лазерное микроstructuring [1-5], позволяющее локально и с высокой точностью формировать структуру и свойства поверхностного слоя.

Эффективность лазерного воздействия во многом определяется исходным состоянием поверхностного слоя материала. Наличие окалины, шероховатость, остаточные напряжения, а также характер предварительной механической или термической обработки могут существенно влиять на процессы нагрева, плавления и кристаллизации, протекающие при лазерной обработке. Это, в свою очередь, определяет изменение микротвердости – ключевого параметра, от которого зависят эксплуатационные характеристики изделий.

Несмотря на широкое распространение лазерных технологий, в научной литературе недостаточно систематизированных данных о влиянии исходного состояния поверхности на формирование микроструктуры и изменение микротвердости после лазерного микроструктурирования. Исследование этой взаимосвязи имеет важное значение для оптимизации технологических режимов, повышения качества и надежности изделий, а также для расширения областей применения лазерных методов упрочнения в промышленности.

Цель работы – исследование влияние исходного состояния обрабатываемой поверхности (после горячей прокатки, механического шлифования, лазерной резки) и режимов лазерного микроструктурирования на изменение микротвердости поверхностного слоя стали 40X13.

В качестве объекта исследования была выбрана листовая (толщиной 4 мм) горячекатаная конструкционная высоколегированная сталь марки 40X13. Из данной стали методом лазерной резки были изготовлены специальные образцы в виде прямоугольных и квадратных пластин (рис. 1) размером 167×20×4 мм и 40×40×4 мм соответственно.

Лазерную резку (ЛР) осуществляли с применением волоконного лазера непрерывного действия, снабженного оптической головкой ЭИП1119 производства НТО «ИРЭ-Полюс» по следующему режиму: мощность – 1400 Вт; скорость – 900 мм/мин; положение фокального пятна – (–4,0 мм); диаметр сопла – 1,5 мм. Дополнительно в зону лазерной резки для выдувания продуктов расплава подавали струю сжатого воздуха под давлением 12 атм.

После ЛР две поверхности квадратных образцов (см. рис. 1, б стороны №1 и №2) были подвергнуты механической обработке (шлифованию) с целью удаления зоны лазерного воздействия (0,4 мм), формируемой в процессе газолазерной резки материала [5].

Далее стороны №1...№4 комплектов квадратных образцов №1 и №2 были подвергнуты лазерному микроструктурированию (ЛМ) по режимам, представленным в таблице 1. Комплект №3 не подвергался дополнительной обработке и в дальнейших исследованиях использовался как образец-эталон. Также лазерному микроструктурированию (мощность лазерного излучения – 1200 Вт; частота колебаний гальваносканатора – 50 Гц; плотность «заливки» (перекрытие соседних дорожек лазерного луча) – 96%; ширина развертки лазерного излучения – 50 мм; скорость обработки – 250 мм/мин; число проходов по оси x – 1 шт.) подвергли горячекатаные поверхности прямоугольных пластин (см. рис. 1, а).

Оптические микроструктурные исследования поверхности образцов после лазерного микроструктурирования выполняли с использованием оптического микроскопа Zeiss Axio Observer.D1m.

Измерения поверхностной микротвердости по Виккерсу проводили с использованием портативного ультразвукового твердомера ТКМ-459С динамическим методом (методом отскока).

Полуколичественный химический анализ белого слоя, проводили с использованием спектрометра BRUKER «QUANTEX QX1».

Результаты исследований микротвердости образцов до и после лазерного микроструктурирования представлены на рисунке 2.

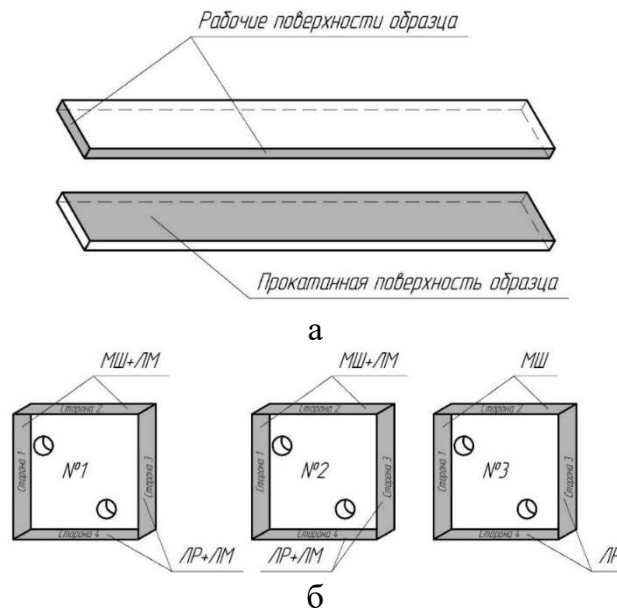


Рис. 1. Эскизы образцов для исследования: а) прямоугольная пластина; б) квадратный образец; МШ – механическое шлифование; ЛР – лазерная резка; ЛМ – лазерное микроструктурирование

Табл. 1. Параметры режимов лазерного микроструктурирования образцов (комплект №1/№2)

Параметры лазерной обработки	Сторона обработки			
	1	2	3	4
	Механическое шлифование		Лазерная резка	
Мощность, Вт	1400/1000	1200/1700	1400/1000	1200/1700
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200/100	50/150	200/100	50/150
Плотность заливки (перекрытие, в %):	96/83	96/96	96/83	96/96
Ширина развертки, мм	50/28	50/32	50/28	50/32
Скорость подачи, мм/мин	1000/300	250/400	1000/300	250/400
Число проходов по плоскости x	1/1	1/1	1/1	1/1
по плоскости y	0/1	0/1	0/1	0/1

Для горячекатаной поверхности микротвердость после лазерного микроструктурирования мощностью 1200 Вт возрастает с 234 до 354,2 HV, что свидетельствует о значительном упрочнении поверхностного слоя.

Для механически шлифованных образцов при мощности лазерного микроструктурирования 1000 и 1200 Вт микротвердость увеличивается до 320,4 и 323,8 HV соответственно. Максимальное упрочнение для этой группы достигается при мощности 1700 Вт (557,8 HV).

Для поверхностей после лазерной резки исходная микротвердость составляет 481,6 HV. Последующее лазерное микроструктурирование приводит к дальнейшему увеличению микротвердости: при мощности 1000 Вт – до 527,4 HV, при 1200 Вт – до 540,4 HV, а при 1700 Вт – максимальное значение 571,4 HV.

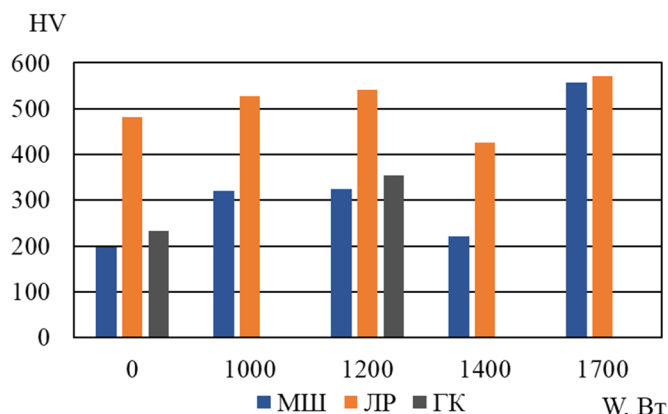


Рис. 2. Микротвердость исследуемых образцов стали 40X13 до и после лазерного микроstructuring: ГК – горячая прокатка; МШ – механическое шлифование; ЛР – лазерная резка. Цифра 0 на оси x (W, Вт) соответствует исходной (не обработанной) поверхности

Некоторое исключение составляет обработка по режиму $W = 1400$ Вт; $V = 1000$ мм/мин, при которой микротвердость несколько уменьшается. Снижение микротвердости поверхностного слоя при высоких скоростях лазерной обработки может быть связано с особенностями протекания структурно-фазовых превращений в металле – при высокой скорости перемещения лазерного луча время воздействия на каждую точку поверхности становится очень коротким, в результате чего не успевают завершиться такие превращения, как растворение и выделение упрочняющих фаз, формирование мелкодисперсных структур, перераспределение углерода и легирующих элементов [5].

Данный вывод подтверждается результатами микроструктурного (рис. 3) и полуколичественного химического анализа белого слоя (табл. 2).

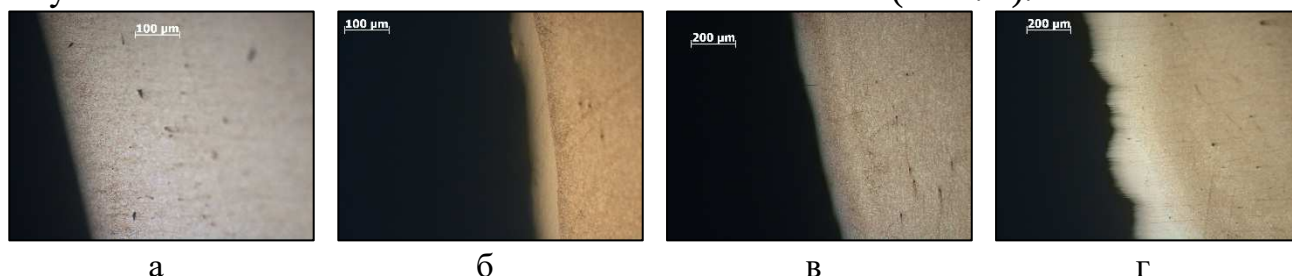


Рис. 3. Структура поверхностного слоя образцов стали 40X13 (комплект №1) после лазерного микроstructuring: а) сторона 1, $\times 200$; б) сторона 2, $\times 200$; в) сторона 3, $\times 100$; г) сторона 4, $\times 100$

Табл. 2. Полуколичественный химический анализ белого слоя в стали 40X13 после лазерного микроstructuring

Место замера содержания углерода	Содержание углерода, масс. %			
	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 3	Сторона 4
Белый слой	Не выявлен	5,26	Не выявлен	4,65
Основной металл	0,41			

На основе полученных результатов по лазерному микроstructuring стали марки 40X13 можно утверждать, что предлагаемая технология является эффективным инструментом, который возможно применять для упрочнения

поверхностей деталей машин с различным исходным состоянием поверхностного слоя.

Список литературы

1. Афанасьева Л.Е., Третьяков С.А., Иванова А.И., Гречишкин Р.М. Лазерное микроструктурирование поверхности стали // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14, №7(163). – С. 297-302.
2. Дайно А.В., Попов В.О., Смирнов С.Н., Шаромов А.А. Лазерное модифицирование // РИТМ Машиностроения. – 2016. – №10. – С. 30-33.
3. Тескер Е.И., Асеева Е.Н., Соломатин А.В. Исследование процессов формирования поверхностных слоев при лазерной обработке деталей узлов трения из конструкционных сталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – №3(213). – С. 121-124.
4. Минаев И.В. Влияние лазерного микроструктурирования на структуру и свойства поверхностного слоя деталей из углеродистой стали марки У8А // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2025. – Т. 15, №1. – С. 61-70.
5. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М. Влияние лазерного микроструктурирования на изменение структуры и микротвердости поверхностного слоя деталей из конструкционных сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2025. – Т. 21, №5(245). – С. 210-216.

Сведения об авторах:

Кутепов Сергей Николаевич – к.п.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса»;

Клементьев Денис Сергеевич – преподаватель кафедры «Технологии и сервиса»;

Ряполов Глеб Владимирович – магистрант.