

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Гаврилов Г. Н.<sup>1</sup>, Костромин С. В.<sup>1</sup>, Калинин А. Б.<sup>2</sup>, Пейганович В. Н.<sup>3</sup>, Ермаков Д. Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24);

<sup>2</sup>Выксунский филиал ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», Выкса, Россия (607060, Выкса, ул. Корнилова, 125);

<sup>3</sup>ОАО «ОМК-Сталь», Выкса, Россия (607060, Выкса, Проммикрорайон-7, ЛПК)e-mail:sergeynn@mail333.com.

Лазерное термоупрочнение и наплавка являются перспективными технологиями в процессе производства прокатных валков. Показано, что лазерные технологии дают возможность целенаправленного формирования микроструктуры поверхности изделий и получения нового повышенного комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств. Исследованы структура и свойства поверхностных слоёв сталей с различным содержанием углерода. Комплекс исследований включал определение физико-механических характеристик материалов по стандартным методикам, изучение структуры образцов. Лазерная порошковая наплавка за один проход позволяет формировать поверхностный слой с заданными характеристиками толщиной до 1,5 мм. Многослойная наплавка позволяет получать модифицированные слои с геометрическими размерами, определяемыми техническими условиями на изделие. Проведение дополнительной лазерной обработки приводит к выравниванию уровня микротвердости для каждого исследуемого материала по всему продольному сечению поверхностного слоя.

Ключевые слова: прокатные валки, термообработка, поверхностное упрочнение, лазерная закалка, лазерная наплавка.

## LASER TECHNOLOGY IMPROVEMENT RESISTANCE ROLLING ROLLS

Gavrilov G. N.<sup>1</sup>, Kostromin S. V.<sup>1</sup>, Kalinin A. B.<sup>2</sup>, Peiganovich V. N.<sup>3</sup>, Ermakov D. U.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nizhny novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, Minina 24);

<sup>2</sup>Vyкса branch of Nizhny novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseev, Vyкса, Russia (607060, Vyкса, Kornilovst., 125);

<sup>3</sup>JSC «OMK-Steel», Vyкса, Russia (607060, Vyкса, Prommikroraion-7, LPK) e-mail:sergeynn@mail333.com.

The laser thermal hardening and cladding are promising technologies in the production process of forming rolls. It is shown that laser technologies enable purposeful formation of the microstructure of the surface of the product and get a new set of high mechanical and performance properties. The structure and properties of the surface layers of steels with different carbon contents. Set of studies included a definition of the physical and mechanical properties of materials by standard techniques to study the structure of the samples. Laser powder cladding in a single pass allows you to create a surface layer with specified thickness up to 1.5 mm multi-layer surfacing produces modified layers with the geometric dimensions defined specifications for the product. The additional laser treatment tends to equalize the level of each of the microhardness of the material across the longitudinal plane of the surface layer.

Keywords: rolling rolls, heat treatment, surface hardening, laser hardening, laser cladding.

### Введение

Эксплуатационные характеристики прокатных валков оказывают значительное влияние на производительность прокатных станов, качество и себестоимость готовой продукции.

По условиям эксплуатации прокатные валки подразделяются на три основные группы: валки станов горячей прокатки, валки станов холодной прокатки, опорные валки.

Исходя из условий работы валков, необходимо обеспечить высокую износостойкость по длине и глубине рабочего слоя при высоких температурах и давлениях, разгаростойкость, статическую и усталостную прочность, постоянство диаметра, чистоту поверхности [1].

К прокатным валкам также предъявляются повышенные требования по макро- и микроструктуре стали, определяющие показатели их эксплуатационной стойкости и надежности. Основные требования к качеству материала регламентируются стандартами [7].

Имеются работы, например [8], решающие проблему повышения эксплуатационной стойкости прокатных валков за счёт технологии эффективного микролегирования стали. Так, при легировании ванадием валковой стали 150ХНМ эвтектоид приобретает более тонкое строение, снижается критическая скорость охлаждения в перлитной области, в результате чего происходит увеличение значений эксплуатационных характеристик и твердости валков.

Однако химический состав сталей не может однозначно определять качество валков горячей прокатки, поскольку сопротивление износу и зарождению трещин зависит и от множества других факторов, определяемых, прежде всего, термической обработкой.

Термическая обработка валков, как правило, является окончательной термообработкой послековки и состоит из нормализации и длительной выдержки при температуре высокого отпуска. Цель нормализации заключается в снижении внутренних напряжений и измельчении зерна, что приводит к повышению механических свойств.

Особенности термообработки прокатных валков подробно описаны в [3]:

Все виды термообработки стальных валков предусматривают одновременно снятие внутренних напряжений, которые особенно велики у *валков из стали эвтектоидного состава*. Для этого их подвергают медленному нагреву до 550–650<sup>0</sup>С и выдерживают при этой температуре 6–12 ч. С увеличением диаметра валка и содержания углерода в стали скорость нагрева снижают, а продолжительность выдержки увеличивают.

Наиболее вязкими являются *валки из доэвтектоидной стали* (0,5–0,8 % С), но их крупнозернистая перлитоферритная структура плохо противостоит истиранию, вызывает прилипание прокатываемого материала к поверхности, что ведет к их быстрому износу. Термической обработкой таких валков можно несколько измельчить зерно, но износостойкость их при этом всё же останется невысокой. Легирование валков эвтектоидного состава хромом и никелем с соответствующим уменьшением содержания углерода упрочняет перлитную матрицу, а применение нормализации при температуре 900–950<sup>0</sup>С приводит к повышению дисперсности структуры, износостойкости рабочего слоя и прочности валков.

Наибольшее применение имеют литые стальные *валки иззаэвтектоидных сталей*, как углеродистых, так и легированных (0,9–2,0 %С). Режим термообработки представляет собой

комбинации двух-трех периодов нормализации, заканчивающиеся отпуском для снятия внутренних напряжений путем замедленного охлаждения с 600 до 100–150<sup>0</sup>С.

Для повышения эксплуатационных характеристик прокатных валков применяют также различные методы поверхностного упрочнения [4, 6]. Это индукционная закалка, поверхностное пластическое деформирование, электродуговая, вибродуговая или плазменная наплавка, упрочнение сжатой сканирующей дугой прямого действия и т.п.

Существенным недостатком применяемых в настоящее время способов обработки поверхности с использованием термического или химико-термического воздействия является их длительность, высокая трудо- и энергоемкость, низкая экологическая защищенность, возникновение коробления деталей.

Некоторые из перечисленных проблем решаются при использовании новых технологических приемов поверхностной обработки путем применения в качестве источника нагрева концентрированных потоков энергии [5].

Наибольшее распространение среди высокоэнергетических методов все больше получает лазерная обработка материалов. По сравнению с другими видами поверхностного упрочнения лазерная обработка обладает следующими основными преимуществами [2]: высокой концентрацией энергией, возможностью локального упрочнения, отсутствием коробления и деформации деталей, возможностью передачи энергии луча на значительные расстояния. При лазерном термоупрочнении устраняется необходимость в закалочных средах, что способствует улучшению условий труда и повышению экологической чистоты производства в целом.

При использовании лазерной наплавки изделия, например, опорные прокатные валки могут изготавливаться из дешевых, технологичных материалов с высокой вязкостью, а дорогие и дефицитные компоненты расходуются только на создание упрочненного поверхностного слоя.

В связи с этим актуальной задачей является получение новых экспериментальных данных о формировании микроструктуры в процессе лазерной обработки при фазовых превращениях в конструкционных и инструментальных сталях в зависимости от исходных матричных структур. Необходимо также установление корреляционных связей механических свойств со структурным состоянием поверхностных слоев материалов после лазерного термического упрочнения и наплавки.

### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследования являлись образцы из сталей 45, У8А, У10А, 9ХС, ХВГ и Х12Ф с различной исходной структурой – после отжига, нормализации, улучшения. Лазерная обработка проводилась на установке «Латус-31» в непрерывном режиме в интервале

плотностей мощности  $W = 3.0-7.5 \text{ кВт/см}^2$ . Выбранные режимы соответствовали области гарантированного лазерного упрочнения для исследованных сталей.

Лазерная наплавка стали 45 порошками ПР-10Р6М5 и ПР-17Х5ВЗМФ5С осуществлялась в непрерывном режиме. Порошки подавались в зону действия лазерного луча с помощью специального устройства - питателя.

При исследовании режимов дополнительной лазерной обработки наплавленных слоев плотность мощности лазерного излучения изменялась от нижней границы диапазона, соответствующего режиму термического упрочнения без оплавления поверхности ( $W = 8-9 \text{ кВт/см}^2$ ) до верхней – режиму наплавки ( $W = 15-16 \text{ кВт/см}^2$  для порошков типа ПГ, и  $W = 22-29 \text{ кВт/см}^2$  для порошков типа ПР). На наплавленную поверхность перед обработкой наносилось поглощающее покрытие (жёлтая гуашь).

Комплекс исследований включал изучение микроструктуры сталей после лазерного термоупрочнения и наплавки с помощью оптического и растрового электронного микроскопов, определение твёрдости и микротвёрдости по стандартным методикам.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Поскольку скорости охлаждения при лазерной закалке ( $10^3-10^4 \text{ C/c}$ ) намного превышают критические скорости закалки сталей, то образуется мартенситная структура, обладающая особенной чувствительностью к последующему распаду. При этом заметной устойчивостью к самоотпуску обладает лишь высокоуглеродистый пластинчатый мартенсит. В речном же мартенсите с содержанием углерода менее 0,4 % в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения развиваются процессы самоотпуска, снижая тем самым склонность стали к трещинообразованию.

На поверхности зоны лазерного воздействия при обработке сталей 9ХС и ХВГ располагается слаботравящийся слой, имеющий при малых плотностях мощности излучения ( $W = 2-3 \text{ кВт/см}^2$ ) структуру мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. По мере увеличения плотности мощности лазерного излучения (до  $W = 5-7 \text{ кВт/см}^2$ ) происходит растворение цементита и карбидов хрома, вследствие чего насыщение остаточного аустенита углеродом и легирующими элементами повышается.

Переходный слой зоны лазерного воздействия у сталей 9ХС и ХВГ состоит из перлитных участков с колониями мартенсита в окружении сетки избыточного цементита и карбидов округлой формы. Лазерная обработка стали Х12Ф1 приводит к образованию в верхней части зоны лазерного воздействия микроструктуры из мартенсита и значительного количества остаточного аустенита (до 20 %); микротвердость слоя составляет  $\sim 6000 \text{ МПа}$ . Такое низкое значение микротвердости, по-видимому, связано со значительной степенью диссоциации карбидов хрома и насыщением аустенита высвободившемся углеродом. При увеличении плотности мощности лазерного излучения толщина слоя возрастает, а

микротвердость остается практически на прежнем уровне. Ниже располагается слой, состоящий из более крупноугольчатого мартенсита, значительного количества карбидных частиц, а также остаточного аустенита. Микротвердость этого слоя составляет ~7500 МПа. Еще ниже располагается узкий переходный слой, состоящий из перлита и избыточных карбидов; микротвердость его снижается до твердости исходной структуры.

Анализ микроструктуры образцов и распределения микротвердости в зоне лазерного воздействия показывает, что для инициирования фазовых превращений в образцах с исходной неравновесной структурой требуется значительно меньше энергии по сравнению со структурами, близкими к равновесным. Это связано с тем, что энергия лазерного излучения на крупных зернах расходуется не только на продвижение фронта фазового превращения вглубь, но и на завершение подготовительных (перед аустенитизацией) процессов. Поэтому для аустенитизации крупнозернистой исходной структуры требуется значительно больше энергии, чем для мелкозернистой. Следовательно, с повышением дисперсности исходных структур сталей глубина упрочненного слоя увеличивается.

Превращения структур в металлических сплавах при тепловом воздействии связаны с изменением и движением межфазных и межзеренных границ. При этом скорость миграции границ не может быть произвольной – она лимитируется диффузией на границе раздела фаз (например, при аустенитизации) или, наоборот, не сдерживается диффузией, как в случае рекристаллизации. Поэтому происходящие в сталях при лазерной обработке различные фазовые превращения и диффузионные процессы и приводят к формированию в поверхностном слое обработанного материала многослойной микроструктуры, отличающейся от традиционных видов микроструктур, формирующихся при обычных термических циклах, используемых при объемном термическом упрочнении.

Это обусловлено более трудными процессами зарождения, обособления и коагулирования легированных карбидных частиц и более медленным их растворением, связанным с диссоциацией карбидов, парциальной диффузией легирующих элементов, выравниванием химического состава аустенита в зависимости от скорости диффузии легирующих элементов и т.д.

Преимущества лазерной наплавки также достигаются за счёт возможностей локального ввода энергии и её высокой концентрации. Толщина наплавленного слоя на поверхности образцов за один проход при мощности лазерной установки 1,0 кВт составляла 0,4–1,5 мм.

Анализируя строение зоны лазерной наплавки, можно отметить, что в зависимости от энергетических параметров лазерного излучения возможно осуществление процесса формирования биметаллического соединения с различной степенью прогрева металла основы: от незначительного прогрева до расплавления основного металла в зоне наплавки.

Анализ микроструктуры образцов после лазерной порошковой наплавки показывает, что в процессе наплавки формируется литая структура. Она состоит, либо из дендритной структуры с различной величиной и степенью выраженности дендритов, либо из разнотельной микроструктуры по всему сечению. Это связано с разными условиями охлаждения и теплоотвода, а именно – с различной степенью переохлаждения расплавленного металла в верхней части наплавленного слоя по сравнению с внутренними. В центральной и нижней частях наплавленного слоя столбчатые дендриты имеют четкую пространственную ориентировку в обратном направлении от основного металла.

В результате нагрева основного металла в процессе лазерной наплавки в его микроструктуре формируются три слоя: первый слой – зона полной закалки с мартенситной структурой, второй слой – зона термического влияния со структурой, имеющей признаки как частичной, так и неполной закалки, третий слой – основной металл с исходной структурой.

Анализ микроструктур наплавленных слоев порошками инструментальных сталей до и после дополнительной лазерной обработки на электронном микроскопе РЭМ-200 подтверждает, что при дополнительной лазерной обработке происходит измельчение структуры наплавленного слоя. Однако признаки наследования общей дендритной ориентировки структуры, хоть и незначительно, но все же проявляются. Значения микротвердости по высоте наплавленного слоя после дополнительной лазерной термической обработки несколько выше и имеют стабильный характер.

Среднее значение микротвердости для слоев, наплавленных порошками инструментальных сталей ПР-10Р6М5 и ПР-17Х5В3МФ5С, составляют соответственно: 9500 и 10400 МПа. Для наплавленных слоев порошками самофлюсующихся сплавов ПГ-СР2 и ПГ-СР4 значения микротвердости 5800; 7800 МПа соответственно.

Таким образом, дополнительная лазерная обработка наплавленных слоев по режимам, близким к режиму наплавки ( $W=(0,85-0,90)W_{\text{Напл}}$ ), приводит к перекристаллизации и измельчению микроструктуры, а также к повышению стабильности микротвердости по всему сечению наплавленных слоев. При этом, в отличие от объемной термической обработки, лазерная обработка более технологична и сохраняются все преимущества лазерной наплавки.

При изготовлении и восстановлении деталей и инструмента требуется создание наплавленных слоев более широких или более высоких по сравнению с геометрическими размерами одиночного слоя, получаемого за один проход при лазерной наплавке. Поэтому изучение структуры и свойств формируемого массивного слоя при лазерной многослойной наплавке является важной задачей, решение которой расширяет возможности применения этого способа наплавки. Показано, что наиболее рациональным является коэффициент пе-

рекрытия  $K_n=0,6-0,8$ . В этом случае формируется ровная внешняя наплавляемая поверхность и не происходит значительного прогрева основного металла в зонах сплавления слоев.

Как следует из анализа результатов многослойной наплавки, в зонах сплавления наблюдается повышение уровня микротвердости, что, безусловно, связано с тепловым воздействием на материал каждого предыдущего слоя при нанесении последующего. В этих зонах, вследствие интенсивного теплового лазерного воздействия и контакта с расплавленным порошковым материалом, происходит прогрев ранее нанесенного слоя до температур близких к температуре лазерной обработки. Это обеспечивает измельчение микроструктуры и превращению ее из литого состояния в термически обработанное.

### **Выводы**

1. Лазерное термоупрочнение и наплавка являются перспективными технологиями в процессе производства прокатных валков. При этом появляется возможность целенаправленного формирования микроструктуры поверхности изделий за счет ориентированной кристаллизации, локальной химико-термической обработки и, как следствие, получения нового повышенного комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств.
2. Микротвердость и глубина поверхностного слоя, в котором прошли закалочные процессы, определяется химическим составом стали, режимами предварительной объемной термической обработки и лазерной упрочняющей обработки и зависят от вида исходной структуры.
3. Микротвердость переходного слоя зоны лазерного воздействия зависит от исходной структуры стали. Фиксируя изменение микротвердости по глубине можно оценить толщину зоны отпуска в случае лазерного упрочнения исходных структур, полученных в результате объемной закалки, а также глубину переходной зоны со структурами неполной (частичной) закалки при лазерной обработке отожжённой стали.
4. Лазерная порошковая наплавка за один проход позволяет формировать поверхностный слой с заданными характеристиками толщиной до 1,5 мм.
5. Многослойная лазерная наплавка позволяет получать модифицированные слои с геометрическими размерами, определяемыми техническими условиями на изделие.
6. Проведение дополнительной лазерной обработки изделий с многослойной наплавкой приводит к выравниванию уровня микротвердости для каждого исследуемого материала по всему продольному сечению поверхностного слоя.

## Список литературы

1. Безнос М. П. Валки крупносортовых и рельсобалочных станов. – М.:Металлургия, 1966. – 148 с.
2. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.:МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.
3. Ильин С. И., Корягин Ю. Д. Технология термической обработки сталей: учебное пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.
4. Кочанов А. В., Горбатюк С. М. Разработка конструкции устройства и технологии упрочнения валков листовых станов поверхностным пластическим деформированием // Черные металлы. – 2013. – № 2. – С. 14–18.
5. Особенности формирования структуры сталей при лазерном термическом цикле / Г. Н. Гаврилов, В. Кастро, И. Брауэр, Е. С. Беляев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 12. – С. 38–41.
6. Патент РФ № 2398892. Способ поверхностного упрочнения прокатных валков. Опубл. 10.09.2010.
7. Теория и технологияковки / Под ред. Л. Н. Соколова. – Киев: Вища школа, 1989. – 317 с.
8. Эффективность микролегирования стали 150ХНМЛ ванадием при получении прокатных валков / В. А. Коровин, И. О. Леушин, А. С. Киров, С. В. Костромин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 44–47.

### Рецензенты:

Чернышов Евгений Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплофизика, автоматизация и экология печей» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Пачурин Герман Васильевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Производственная безопасность и экология» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.