

УДК 533.9.082; 533.924; 621.373.8

Е.С. Воропай¹, К.Ф. Ермалицкая¹, Е.П. Барадынцева², Т.П. Куренкова²,
Т.Ю. Труханович², А.П. Зажогин¹

АНАЛИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КОРДОВОЙ СТАЛИ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ СПЕКТРОВ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

¹Белорусский государственный университет, Беларусь 220030 Минск,
проспект Независимости, 4,
zajogin_an@mail.ru

²РУП «Белорусский металлургический завод», Беларусь 247210, г. Жлобин,
ул. Промышленная 37

Стали являются одним из самых распространенных конструкционных сплавов в промышленности. Несмотря на большой прогресс в технике спектрального анализа многокомпонентных сплавов в последние десятилетия, до сих пор не разработаны методы позволяющие проводить количественный анализ структурных неоднородностей, образующихся при кристаллизации стали. Размеры неоднородностей, как правило, не превышают нескольких десятков микрометров. Стандартные источники испарения вещества образца и возбуждения спектров, такие как электрические разряды (дуга, искра и т.д.), не обладают возможностью локального отбора пробы. Предпочтительным источником возбуждения спектра для анализа структурных неоднородностей является сфокусированное лазерное излучение [1]. Помимо минимальной степени повреждения поверхности при анализе к преимуществам лазерной спектроскопии относится отсутствие необходимости предварительной механической и химической обработки поверхности образца.

Одним из наиболее перспективных методов лазерной спектроскопии является использования для возбуждения спектров сдвоенных лазерных импульсов с микросекундными межимпульсными интервалами. Под воздействием первого импульса испаряется вещество образца, образуется плазма. При распространении плазма охлаждается, и атомы и ионы объединяются в жидкие капли и конденсированные частицы. Второй лазерный, сдвинутый относительно первого на время Δt , взаимодействует не только с поверхностью мишени, но и с каплями и частицами в приповерхностной области. Таким образом, использование сдвоенных лазерных импульсов позволяет увеличить регистрируемую интенсивность спектральных линий элементов по сравнению с одиночными лазерными импульсами [2].

Сталь для производства металлокорда традиционно относят к классу так называемых чистых сталей, производство которых требует самых современных технологических процессов [3]. Требования к химическим, металлографическим и механическим характеристикам катанки для производства металлокорда, предъявляемые производителями корда, очень жестко регламентированы. Это связано с тем, что эксплуатационные свойства корда в значительной мере определяются величиной усталостной прочности и разрывным усилием. Эти

характеристики проволоки в значительной мере зависят от металлургической чистоты кордовой стали по газам, вредным примесям и неметаллическим включениям (НВ). Частота обрыва корда при волочении и свивке находится в прямой зависимости от предела прочности стали на разрыв. До 80% обрывов проволоки при производстве корда связано с наличием недеформируемых оксидных включений. Обрывы происходят преимущественно при свивке металлокорда, когда к проволоке прикладываются изгибающие и крутящие нагрузки. При этом наиболее негативное влияние на свойства металла оказывают недеформируемые оксидные включения, поскольку вокруг них возникают наиболее сильные деформационные поля, приводящие к росту трещин и полостей [3].

Химический и фазовый состав включений, их размер и характер распределения в матрице в значительной мере определяются способом раскисления и внепечной обработки металла. Металлургическая операция связывания кислорода для улучшения свойств металла и получения высокого качества изделий может оказаться причиной возникновения ряда дефектов вызываемых конечными продуктами раскисления. Конечное содержание кислорода в металле, состав и морфология НВ и форма кривой размерных распределений определяются применяемыми раскислителями, их составом, количеством, последовательностью и способом ввода в расплав.

Согласно [3], концентрация алюминия, растворенного в расплаве, в значительной степени определяет содержание Al_2O_3 в НВ. Экспериментально установлено, что содержанию 0,0004-0,0006% растворенного алюминия в жидкой стали соответствует предельное содержание Al_2O_3 в деформируемых НВ, что весьма сложно контролировать химическими методами.

Многие вопросы, возникающие при создании оптимальных условий для проведения исследований поверхности сплавов и одновременного экспресс-анализа удаляемых и остающихся элементов с поверхности могут быть эффективно решены при использовании лазерного многоканального атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1 [4, 5]. Спектрометр включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (до 80 мДж), так и временного интервала между сдвоенными импульсами (0-100 мкс) излучения. Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц и максимальной энергией излучения каждого из сдвоенных импульсов до 80 мДж, на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов \approx 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может изменяться с шагом 1 мкс. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм.

Динамика распределения алюминия и кальция в НВ исследовалась при воздействии сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов ($\lambda = 1,064$ мкм, $q \approx 10^9$ Вт/см²) на образцы катанки кордовой стали 75К от временной задержки между импульсами в интервале 1-20 мкс. Размер пятна повреждения ≈ 50 мкм.

Исследована динамика поступления Al и Ca при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на точку с включением НВ и рядом. Установлено, что воздействие на образец второго импульса с задержкой 1-10 мкс, приводит к существенному увеличению поступления вещества в плазму. При задержке 20 мкс интенсивность плазмообразования уменьшается примерно в 3-4 раза. В этих условия НВ испаряется значительно медленнее и можно детальнее изучить распределение элементов по глубине и плоскости, что в принципе дает возможность определить и форму включения.

В результате исследований установлено, что при изменении плотности мощности падающего излучения изменением энергии накачки (энергия накачки 10-15 Дж, энергия излучения 20-80 мДж) скорость испарения алюминия и кальция постепенно возрастает, в то время как при изменении пятна фокусировки наблюдается периодичность, зависящая от энергии падающего излучения.

Основные эксперименты проводились при использовании режима сдвоенных лазерных импульсов и временной задержке между импульсами 20 мкс. В качестве примера на рисунке 1 приведены динамика изменения интенсивности линий Al (396,153 нм) и Ca II (393,367 нм) в последовательных импульсах для одной из точек НВ и рядом с ней.

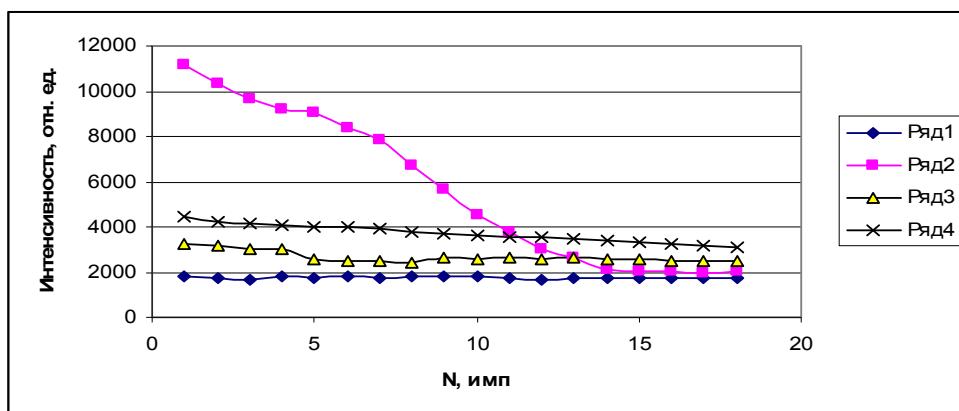


Рис. 1. Динамика изменения интенсивности линий Al (396,153 нм) и Ca II (393,367 нм) в последовательных импульсах для одной из точек НВ (ряд 2 и ряд 4) и рядом с ней (ряд 1 и ряд 3).

Интенсивность линий Ca на чистом месте чуть меньше, чем на точке НВ. По мере увеличения числа последовательных импульсов интенсивность линий на чистом месте сначала

незначительно падает, а затем остается примерно одинаковой. Для точки НВ интенсивность постепенно уменьшается, приближаясь к интенсивности для чистого места.

Интенсивность линий Al в точке НВ значительно, для первых импульсов примерно в 6 раз, превышает интенсивность на чистом месте. По мере увеличения количества лазерных импульсов интенсивность быстро падает, приближаясь к интенсивности линий для чистого места.

Согласно проведенным исследованиям большинство исследованных включений (10) можно отнести к шлаковым включениям, близким к печному шлаку состава $\text{CaO}\text{-}\text{SiO}_2\text{-}\text{Al}_2\text{O}_3$.

Результаты экспериментов по сравнительному анализу содержания Al и Ca в чистых местах и в точках неметаллических включений методом лазерного атомно-эмиссионного спектрального анализа с использованием сдвоенных лазерных импульсов показали перспективность использования этого метода для анализа микродефектов в сталях.

Литература

1. Sturm V., Vrenegor J., Noll R., Hemmerlin M.// *J. Anal. At. Spectrom.* -2004. – V.19. – P. 451-459.
2. Colao F., Lazic V., Fantoni R., Pershin S. // *Spectrochim. Acta Part B.* – 2002. – V.57. – P. 1167 -1176.
3. Григорович К.В. //Бюллетень «Черная металлургия» - 2006. - №10. - С. 63-68.
4. Сухов Л.Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск. – 1990.
5. Зажогин А.П., Фадаин А.Р. // Вестник БГУ. Серия 1. – 2008. - №3. – С.15-18.