

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ.

Баландина Любовь Николаевна, Попов Кирилл Леонидович.

Студенты 4 курса,

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Мельников Д. М.,

аспирант 2 года кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

1. Введение

На сегодняшний день лазерная маркировка – перспективное и динамично развивающееся технологическое направление. Прогресс в области электроники и программного обеспечения существенно повышает конкурентоспособность лазерных методов маркировки по сравнению с традиционными методами маркировки. Хотя процесс нанесения цветных изображений на металлические поверхности широко распространён, существует нехватка теоретических сведений о происходящих физических процессах и влиянии параметров маркировки на конечный результат.

Целью нашей работы является выведение закономерностей получения цветных изображений для различных материалов. Суть цветной маркировки заключается в образовании оксидных плёнок соответствующего состава на поверхности материала. Этот процесс представляет собой химическую реакцию, где повышение температуры поверхности образца, вызываемое воздействием лазерного луча выступает в роли катализатора процесса.

На сегодня, несмотря на многообразие лазеров, реальное коммерческое применение для маркировки получили системы с твердотельными лазерами с длиной волны 1,06 мкм и СО₂-лазерами (10,6 мкм).

Твердотельные лазеры (в отличие от лазеров на СО₂) за счет модуляции добротности могут генерировать мощные импульсы высокой частоты (до десятков кГц) при низкой средней мощности излучения (десятки ватт), обеспечивая плотность мощности излучения в зоне контакта на уровне 10^8 Вт/см² и более. Такие параметры обеспечивают интенсивное воздействие излучения на материал при минимальном общем его нагреве. Это позволяет применять твердотельные лазеры для маркировки металлов, тугоплавких сплавов и сталей, высокотвердой керамики в различных отраслях промышленности.

Процесс лазерной маркировки состоит в модификации поверхности материала под действием лазерного излучения. Оно вызывает локальный разогрев, плавление и частичное испарение материала в области, ограниченной размерами пятна излучения, что обуславливает высокую степень разрешения при небольшом термомеханическом воздействии на маркируемое изделие.

Все твердотельные лазеры, используемые для маркировки, имеют несколько оптимизируемых параметров: частоту и длительность импульса, распределение мощности по пятну нагрева и т.д. Известно, что для лазеров, например с ламповой накачкой, оптимальный диапазон частоты при маркировке металлов составляет 2–5 кГц, а использование такой частоты в ОВ-лазере вообще невозможно. Если, например, сравнивать режимы маркировки в разных системах при одинаковой мощности лазерного излучения, то корректного результата мы не получим, так как временные и энергетические характеристики импульсов различны, не говоря о существенных различиях пространственных характеристик излучения.

2. Условия появления цветного изображения

Как показано в таблице 1, параметром, характеризующим образование оксидной пленки той или иной структуры и цвета, может служить интеграл от температуры поверхности мишени по времени (Φ). Как видно из таблицы 1, каждому цвету соответствует свое значение интегральной температуры, которая при широком изменении параметров режима (мощности, скорости, частоты) лежит в узком диапазоне: для красного цвета 1,12–1,30, для голубого 0,49–0,57, для желтого 1,04–1,09 [3]. Это напоминает закон Бунзена-Росно (в фотохимии): количество продукта фотохимической реакции определяется общим количеством энергии падающего излучения, то есть произведением мощности излучения на время действия, или обобщенным параметром – экспозицией (количеством освещения). При этом фотохимический эффект не меняется для различных значений обобщенного параметра.

Отметим, что цветная маркировка может быть получена и у лазеров с диодной и даже с ламповой накачкой. Однако этот эффект неустойчивый ("плавающий") и трудно воспроизводимый. Условие постоянства интегральной температуры является, видимо, необходимым, но для получения эффекта цветной маркировки, требуются еще какие-то условия, связанные с пространственно-временными характеристиками излучения и их стабильностью. Именно эти последние условия выполняются у ОВ-лазеров, что и определяют возможность получения цветной маркировки.

Эффект цветной лазерной маркировки и возможность его использования требуют дальнейших исследований и изучения, однако уже можно твердо говорить о нем, как о новой технологии.

Таблица 1. Интегральная температура и цвет поверхности нержавеющей стали

| Цвет поверхности, воспринимаемый невооружённым глазом | P, Вт | V, мм/с | F, кГц | Φ , К*с |
|---|-------|---------|--------|--------------|
| Красный | 6,5 | 50 | 85 | 1,12 |
| | 6,5 | 45 | 100 | 1,30 |
| | 4,0 | 30 | 100 | 1,25 |
| | 3,0 | 17 | 53 | 1,29 |
| Голубой | 6,5 | 90 | 75 | 0,51 |
| | 5,4 | 60 | 35 | 0,56 |
| | 4,0 | 50 | 40 | 0,49 |
| | 2,8 | 60 | 65 | 0,57 |
| Жёлтый | 5,4 | 35 | 55 | 1,09 |
| | 4,1 | 40 | 50 | 1,06 |
| | 3,0 | 35 | 65 | 1,04 |

Таблица 2. Интегральная температура и цвет поверхности нержавеющей стали

| Цвета | Температура нагрева |
|-------------------------------------|---------------------|
| бледно-желтый | 220 °С |
| бледно - соломенно-желтый | 230 °С |
| золотисто желтый | 246 °С |
| коричнево - желтый до буро-красного | 356 °С |
| пурпурно - красный | 265 °С |

| | |
|-------------------|--------|
| пурпурный | 275 °С |
| лиловый | 280 °С |
| голубой | 290 °С |
| индиго | 300 °С |
| темно - синий | 310 °С |
| цвет морской воды | 320 °С |

Строгого совпадения в обозначении цветов и в фиксировании температур не наблюдается. Ведь качественная оценка цвета — дело чисто субъективное. Главное же, существенное влияние на получение того или иного цвета побежалости оказывает продолжительность нагрева. Более или менее продолжительной обработкой можно вызвать посинение железа при температуре более низкой, чем считающаяся необходимой для вызова даже соломенно-желтой окраски. Точно так же соломенно-желтый налет на железо-стальные изделия можно навести, выдержав последние необходимое число минут при температуре, на несколько десятков градусов более низкой, чем 220°.

С другой стороны, можно поставить нагреваемые предметы в условия, при которых желательные цветовые тона получались бы при сравнительно более высоком нагреве.

При увеличении числа прохождений лазерного излучения по одной и той же поверхности наблюдается изменение цвета оксидной пленки.

Цвета побежалости можно вызывать как на закаленной, так и незакаленной стали и на ковком железе и чугуна столь же хорошо, как и на сталях. При этом состав сплава и структура поверхностной пленки оказывают заметное влияние. Закаленный металл принимает нюансировку медленней, чем мягкий. Значительно сказывается загрязненность поверхности металла. Также имеет значение и чисто механическое состояние поверхности металла, степень ее шероховатости и т. п.

В зависимости от толщины оксидные пленки на металлах принято подразделять на тонкие (невидимые) толщиной до 40 нм, средние (видимые как цвета побежалости), имеющие толщину 40-500 нм; толстые (видимые) толщиной более 500 нм.

Скорость окисления металлов зависит от скорости собственно химической реакции и скорости диффузии окислителя через пленку. Поэтому защитные свойства пленки тем выше, чем лучше ее сплошность и ниже диффузная способность. Оксидная пленка, обладающая защитными свойствами, должна удовлетворять следующим требованиям: быть сплошной, беспористой; иметь хорошее сцепление с металлом; иметь коэффициент термического расширения, близкий к величине этой характеристики для металла; быть химически инертной по отношению к данной агрессивной среде; обладать достаточной твердостью и износостойкостью. Если образовавшаяся оксидная пленка пористая, рыхлая и имеет плохое сцепление с металлом, то даже при условии ее инертности к данной агрессивной среде она не будет характеризоваться защитными свойствами.

Пиллинг и Бедвордс сформулировали условие, при котором образуются сплошные пленки, способные препятствовать дальнейшему окислению металла. Условие сплошности состоит в том, что молярный объем оксида должен быть больше объема металла $V(Мe)$, израсходованного на образование оксида, иначе оксида не хватит, чтобы покрыть металл сплошным слоем. Отношение молярного объема оксида к объему израсходованного металла называется фактором Пиллинга – Бедвордса.

3. Теоретические исследования характера термического влияния на окисление поверхностей металлов.

Процесс распространения теплоты при нагреве полубесконечного тела подвижным источником с нормальным распределением плотности потока рассматривается с использованием принципа наложения. [4] Этот принцип заключается в суммировании процессов распространения теплоты от действующих друг за другом мгновенных источников, располагаемых последовательно по линии перемещения источника. Таким образом, выводится уравнение подвижного источника теплоты. Более простое выражение получается при переходе к представлению мощного быстро движущегося распределенного источника. Процесс распространения теплоты в этом случае описывается следующим уравнением:

$$T(y_0, z_0, t) = \frac{2q \cdot e^{-\frac{y_0^2}{4at}} \cdot e^{-\frac{z_0^2}{4a(t-t_0)}}}{\sqrt{4\pi at} \cdot \sqrt{4\pi a(t-t_0)}}$$

t — время, отсчитываемое от момента, когда центр распределенного источника пересекает плоскость y_0Oz_0 ;

y_0, z_0 — координаты рассматриваемой точки А, лежащей в плоскости y_0Oz_0 .

4. Проведение экспериментов

В данной работе для экспериментов мы использовали лазерную установку LRS-150А на базе активного элемента из алюмоиттриевого граната с неодимом.

В таблице 3 показаны технические характеристики этой установки.

В качестве измерителя мощности излучения использовался измеритель на базе термоголовки «Ophir 150 W», технические характеристики которого показаны в таблице 4.

Последовательность подготовки к экспериментам:

- Измерение энергетических параметров лазера;
- Очистка поверхности образцов (в случае, если присутствуют следы коррозии – шлифовка, иначе только протирка от грязи);
- Оценка соответствия текущих режимов ранее исследованным.

Направления исследовательской работы:

- Исследование влияния погонной энергии на получение цветных изображений;
- Исследование вклада импульсного воздействия;
- Исследование повторного воздействия на окисленную зону;
- Исследование целесообразности использования покрытий.

На рисунке 1 показаны отобранные режимы получения цветов по направлению погонной энергии. В таблице 5 сведены результаты исследований.

Таблица 4

| | |
|------------------------|-------------------------------------|
| Поглотитель | ФД, 0,15-6 мкм |
| Апертура | 12 мм |
| Шкала | 150 Вт |
| Мак плотность мощности | $2,5 \cdot 10^5$ Вт/см ² |
| Уровень шума | 4 мкВт |
| Термические искажения | 5-30 мкВт |
| Точность | 3% |
| Линейность мощности | 1,5 % |
| Охлаждение | Конвекция |

Таблица 3 – Технические характеристики установки:

| | |
|---|-------------------------|
| Тип активного элемента | YAG:Nd ³⁺ |
| Длина волны излучения | 1.064 мкм |
| Режим работы | Импульсно-периодический |
| Максимальная энергия импульса излучения | 60 Дж |
| Длительность импульса излучения | 0.2-20 мс |
| Частота повторения импульсов излучения | До 20 Гц |
| Максимальная средняя мощность излучения | 150 Вт |
| Максимальная пиковая мощность излучения | 6 кВт |
| Диаметр сфокусированного пучка | 0.3-2 мм |



Полученные цвета слева – направо:

- серебристый $P_{cp} = 6$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- бледно-жёлтый $P_{cp} = 7$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- оранжевый $P_{cp} = 8$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- фиолетовый $P_{cp} = 9$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- тёмно-синий $P_{cp} = 10$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- синий $P_{cp} = 11$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- голубой $P_{cp} = 12$ Вт, $V = 1,5$ м/мин
- светло-зелёный $P_{cp} = 13$ Вт, $V = 1,5$ м/мин

Рисунок 1 – цветовой диапазон получаемых результатов

5. Выводы

В ходе выполненной научной работы нами был освоен первый этап исследования процесса цветной лазерной маркировки низкоуглеродистых сталей.

Было исследовано влияние погонной мощности на получаемый цвет, определены теоретические основы процесса. По совокупности полученных теоретических и экспериментальных результатов мы определили опорные точки соответствия режимов лазерного воздействия на цветовой спектр маркировки.

Литература

1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Инженерные основы создания технологических лазеров. – М.: Высшая школа, 1988.
2. Горный С.Г., Емельченков И.Р. Лазерная маркировка. В кн.: Лазерная технология и ее применение в металлообработке. – Л.: ЛДНТП, 1990, с.42–47.
3. Валиулин А., Горный С., Гречко Ю., Патров М., Юдин К., Юревич В. Лазерная маркировка материалов // Фотоника. 2007 №3, с.16-22.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки, – М., Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.