

**УДК 621.9.048.7**

**Сарычева Валентина Владимировна**, студент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, РФ, г. Улан-Удэ.

**Шурыгин Юрий Леонидович**, научный руководитель, декан, доцент, к/н, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, РФ, г. Улан-Удэ.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ НА  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАКОКРАСОЧНЫХ  
ПОКРЫТИЙ**

**Аннотация**

В статье рассматривается проблема внедрения лазерной маркировки в технологический процесс сборочного производства приборостроительного предприятия. Актуальность работы обусловлена необходимостью замены устаревших методов ручной маркировки и шелкографии, характеризующихся высокой трудоемкостью и значительным процентом рекламаций. Целью исследования являлось определение оптимальных режимов лазерной маркировки для различных типов лакокрасочных покрытий (ЛКП), применяемых на АО «У-У ППО», и оценка влияния лазерного воздействия на их свойства. В работе проведен сравнительный анализ двух типов лазерного оборудования: УФ-лазера ( $\lambda=355$  нм) и иттербиевого волоконного лазера ( $\lambda=1064$  нм). Экспериментально установлены технологические режимы, обеспечивающие формирование контрастной маркировки без сквозного прожога покрытия. Показано, что использование УФ-лазера предпочтительно для термочувствительных покрытий благодаря «холодному» механизму абляции, в то время как иттербиевый лазер обеспечивает высокую производительность на термостойких эмалях. Представлены результаты оценки адгезионной прочности и стойкости маркировки к истиранию. На основе полученных данных разработаны рекомендации по внедрению

технологии, позволяющие сократить время операции на 69% и снизить затраты на расходные материалы на 95%.

### **Annotation**

The article discusses the problem of implementing laser marking into the technological process of assembly production at an instrument-making enterprise. The relevance of the work is due to the need to replace outdated methods of manual marking and silk-screen printing, which are characterized by high labor intensity and a significant percentage of complaints. The aim of the study was to determine the optimal laser marking modes for various types of paint coatings used at JSC «U-U PPO» and to assess the effect of laser exposure on their properties. The study conducted a comparative analysis of two types of laser equipment: a UV laser ( $\lambda = 355 \text{ nm}$ ) and an ytterbium fiber laser ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ). Technological modes ensuring the formation of contrasting marking without through burning of the coating were established experimentally. It is shown that the use of a UV laser is preferable for heat-sensitive coatings due to the "cold" ablation mechanism, while the ytterbium laser provides high productivity on heat-resistant enamels. The results of the assessment of adhesive strength and marking resistance to abrasion are presented. Based on the obtained data, recommendations for the implementation of the technology were developed, allowing to reduce the operation time by 69% and reduce consumable costs by 95%.

**Ключевые слова:** лазерная маркировка, лакокрасочное покрытие, УФ-лазер, иттербиевый лазер, адгезия, оптимизация режимов, приборостроение.

**Keywords:** laser marking, paint coating, UV laser, ytterbium laser, adhesion, process optimization, instrument engineering / instrument making.

### **Введение**

Современные требования к прослеживаемости и идентификации продукции в машиностроении и приборостроении делают операцию маркировки неотъемлемой частью технологического цикла. На многих

отечественных предприятиях, включая АО «У-У ППО», до сих пор используются традиционные методы: ручное нанесение эмалей (например, ЭП-572) и трафаретная печать (шелкография). Как показал анализ внутренней отчетности предприятия за 2020-2025 гг., данные технологии обладают рядом системных недостатков: высокая доля ручного труда, длительный цикл (включая сушку до 2 часов), зависимость качества от человеческого фактора, а также значительные затраты на расходные материалы (краски, растворители, трафареты). Ключевой проблемой является процент рекламаций, связанных с ошибками идентификации (несоответствие номеров на составных частях изделия).

Мировой опыт компаний Siemens и General Electric демонстрирует эффективность перехода на бесконтактные лазерные технологии [1, 2]. Лазерная маркировка обеспечивает высокую скорость, долговечность изображения и возможность интеграции в автоматизированные линии. Однако прямое внедрение данной технологии на предприятии сдерживается отсутствием научно обоснованных режимов для конкретных типов лакокрасочных покрытий (ЛКП), используемых в производстве. Неверный подбор параметров лазера (мощности, скорости, частоты) может привести к дефектам: недостаточному контрасту, прожогу покрытия до подложки или снижению его защитных свойств [3].

Целью данной работы является исследование влияния процесса лазерной маркировки на физико-механические свойства ЛКП и разработка на этой основе технологических рекомендаций для их безопасного и эффективного применения в сборочном цехе АО «У-У ППО».

#### Объекты и методика исследования

Объектами исследования служили образцы-свидетели из алюминиевого сплава Д16Т ГОСТ 4784-2019 с нанесенными лакокрасочными покрытиями, типичными для номенклатуры предприятия: эпоксидные эмали ЭП-91 и ЭП-1143, эмаль МЛ-165, полиуретановая эмаль ВЛ-725, перхлорвиниловая эмаль ХВ-16, термостойкое покрытие ОС-92-07 и гидроизоляционное покрытие УР-

231. Образцы прошли полный цикл сушки и отверждения согласно действующим технологическим инструкциям.

Маркировка наносилась с использованием двух типов промышленных лазерных маркеров:

1. УФ-лазер: модель G-MARK 100 с излучателем JPT UV (длина волны 355 нм, мощность 5 Вт). Выбор обусловлен высокой фотонной энергией, обеспечивающей «холодную» абляцию полимерных материалов.

2. Иттербиевый волоконный лазер: модель G-MARK 1000 (длина волны 1064 нм, мощность 20 Вт). Данный тип лазеров наиболее распространен для маркировки металлов и некоторых пластиков благодаря высокому КПД и компактности.

Эксперимент проводился в два этапа. На первом (поисковом) этапе для покрытия ОС-92-07 варьировались ключевые параметры (скорость сканирования, частота, ток/мощность, длительность импульса) для определения граничных «рабочих окон» каждого лазера. Критериями оценки являлись наличие видимого контраста и отсутствие сквозного прожога покрытия. На втором этапе для каждого типа покрытия подбирались оптимальные режимы, обеспечивающие максимальное качество изображения при минимальном термическом воздействии.

Контроль качества маркировки осуществлялся по ОСТ 1 90210-85 (п.1.8.2) – визуально с использованием стерео микроскопа MC-4-ZOOM LED. Глубина маркировки измерялась индикатором ИЧ-10. Адгезионная прочность покрытия в зоне маркировки оценивалась методом решетчатого надреза по ГОСТ 32702.2-2014 (аналог ISO 2409). Стойкость маркировки к истиранию проверялась по ОСТ 1 90210-85 (п.1.4.7) путем 5-6-кратного протирания сухим марлевым тампоном.

Результаты и их обсуждение

В ходе поискового эксперимента на покрытии ОС-92-07 были выявлены принципиальные различия в механизмах воздействия двух типов лазеров. УФ-лазер (355 нм) продемонстрировал преобладание фотомеханического и

фотохимического воздействия. Благодаря высокому коэффициенту поглощения органическими компонентами покрытия в УФ-диапазоне, удаление материала происходило путем точной абляции с минимальной зоной термического влияния. Это позволило получать четкие знаки при средней скорости 300-1000 мм/с и частоте 50-100 кГц. Глубина маркировки при оптимальных режимах составила 30-60 мкм, что достаточно для визуального контраста, но недостаточно для повреждения металлической подложки.

Воздействие иттербиевого лазера (1064 нм) носило преимущественно тепловой характер. Для достижения контраста требовалась более низкая скорость сканирования (150-250 мм/с), что приводило к карбонизации (обугливанию) верхнего слоя покрытия. При превышении пороговой энергии наблюдался пережог с образованием кратера и обнажением подложки. Оптимальная глубина маркировки для данного типа лазера составила 25-40 мкм.

На основе полученных данных была составлена матрица экспериментов для всех типов покрытий. В таблице 1 представлены сводные результаты по оптимальным режимам, обеспечивающим наилучшее сочетание контрастности и целостности покрытия.

Таблица 1. Оптимальные режимы лазерной маркировки для различных ЛКП

Тип покрытия	Рекомендуемый тип лазера	Скорость, мм/с	Частота, кГц	Мощность (ток), %	Примечание
ОС-92-07	УФ	5000	100	100 (ток 1)	Высокий контраст, четкая граница
ЭП-91	УФ	3000	100	100 (ток 1)	Глубина 20 мкм, равномерный слой
ХВ-16	ИК (1064 нм)	1000	50	15 (мощность)	Риск прожога при превышении скорости
МЛ-165	ИК (1064 нм)	2000	50	10	Хороший контраст, без деструкции

УР-231	ИК (1064 нм)	4000	20	10	Высокая скорость необходима
ВЛ-725	ИК (1064 нм)	2000	40	10	Слабый контраст, требуется точная фокусировка
ЭП-1143	ИК (1064 нм)	3000	30	10	Равномерная маркировка

Примечание: Для УФ-лазера регулируемым параметром являлся ток, для иттербиевого – мощность в Вт.

Оценка адгезионной прочности методом решетчатых надрезов показала, что при использовании оптимальных режимов (исключающих прожог до металла) лазерное воздействие не оказывает статистически значимого негативного влияния на адгезию покрытия. На большинстве образцов отслоения в зоне маркировки отсутствовали (балл 0 по ISO 2409), либо были незначительными (балл 1). Небольшое локальное снижение адгезии (коэффициент снижения адгезии  $K_{ад} \approx 1.1-1.2$ ) наблюдалось только на образцах с покрытием УР-231 при маркировке иттербиевым лазером на пониженных скоростях, что связано с термомеханическими напряжениями в эластичном материале.

Испытания на стойкость к истиранию подтвердили преимущество лазерной маркировки перед печатными методами. Все образцы, маркированные на оптимальных режимах, успешно выдержали 5-6-кратное протирание сухим марлевым тампоном: изображение оставалось четким, без признаков стирания. Это полностью соответствует требованиям ОСТ 1 90210-85 и превосходит стойкость традиционной маркировки эмалями, которая подвержена механическому износу.

#### Технико-экономическая эффективность внедрения

На основе экспериментально установленных режимов был разработан проект нового технологического процесса маркировки. Сравнительный анализ с действующим КДТП (комплект документов технологического процесса) показал следующее:

1. Сокращение времени цикла. Исключение операций обезжиривания, сушки на воздухе и в термокамере (суммарно до 2 часов) позволяет сократить общее время маркировки с 210-230 минут до 120-121 минуты. При учете времени на изготовление трафаретных форм для шелкографии (до 275 минут) сокращение достигает 69%.

2. Снижение затрат на материалы. Отказ от красок, растворителей (этилцеллозольв, циклогексанон, ацетон, толуол) и расходных материалов для трафаретов позволяет снизить затраты на материалы для маркировки одного изделия с 19,94-21,37 руб. до 1,05 руб., что дает экономию до 95%.

3. Экономическая эффективность. Расчет срока окупаемости лазерного комплекса (стоимостью 800 тыс. – 1,75 млн руб.) с учетом годовой экономии на времени и снижении брака (около 700 тыс. руб.) составляет от 1,3 до 3,4 лет, что является приемлемым показателем для модернизации производства.

#### Заключение

В результате проведенного исследования были решены следующие задачи:

1. Установлены оптимальные режимы лазерной маркировки для семи типов лакокрасочных покрытий, применяемых в сборочном производстве АО «У-У ППО».

2. Экспериментально подтверждено, что при использовании корректных режимов (исключающих сквозной прожог) лазерное воздействие не приводит к критическому ухудшению физико-механических свойств покрытий (адгезии).

3. Доказано, что лазерная маркировка обеспечивает требуемую стандартами предприятия стойкость к истиранию.

4. Определены области предпочтительного применения лазеров: УФ-лазер (355 нм) является универсальным и наиболее безопасным для всех типов ЛКП благодаря «холодному» механизму абляции; иттербиевый лазер (1064 нм) может эффективно использоваться для термостойких и пигментированных покрытий при тщательном подборе скоростных режимов.

Разработанные рекомендации позволяют предприятию осуществить техническое перевооружение участка маркировки, обеспечив повышение производительности, исключение человеческого фактора и значительную экономию эксплуатационных затрат.

### **Список литературы**

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мирзаев Р.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 456 с.
2. Weber R., Graf T., Schmidt M. Laser Marking in Industrial Production: A Review of Techniques and Applications // Journal of Laser Applications. – 2019. – Vol. 31, № 2. – P. 022002.
3. Веденеев В.В., Подрабнович П.А. Влияние режимов лазерной обработки на контрастность маркировки инструментальных сталей // Вестник МГТУ "Станкин". – 2021. – № 1(56). – С. 16-20.
4. ОСТ 1 90210-85. Специальные маркировочные краски для приборов и электроагрегатов. Общие технологические требования.
5. ГОСТ 32702.2-2014 (ИСО 2409:2013). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза.

### **References**

1. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Mirzaev R.G. Fundamentals of Laser Materials Processing. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2017. – 456 p.
2. Weber R., Graf T., Schmidt M. Laser Marking in Industrial Production: A Review of Techniques and Applications // Journal of Laser Applications. – 2019. – Vol. 31, No. 2. – P. 022002.
3. Vedeneev V.V., Podrabnovich P.A. Influence of Laser Processing Modes on the Contrast of Tool Steel Marking // Bulletin of MSTU "Stankin". – 2021. – No. 1(56). – Pp. 16–20.

4. OST 1 90210-85. Special Marking Paints for Instruments and Electrical Units. General Technological Requirements.

5. GOST 32702.2-2014 (ISO 2409:2013). Paint and Varnish Materials. Determination of Adhesion by the Cross-Cut Method.