

УДК 621.375.826

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Вейко, А.А. Кишалов, Т.Ю. Мугин, В.Н. Смирнов

Изложены основные механизмы лазерной очистки металлических поверхностей. Приведены результаты экспериментов по лазерной очистке с применением двух типов лазеров: лазера на длине волны 1,07 мкм с длительностью импульса 200 нс и энергией импульса 1 мДж и лазера на длине волны 1,064 мкм с длительностью импульса 10 нс и энергией импульса 20 мДж. Показаны области применения лазерной очистки и ее перспективы.

Ключевые слова: лазерная очистка, волоконный лазер, YAG:Nd лазер, гигантский импульс.

Введение

В процессе производства и эксплуатации машин и механизмов их детали подвергаются металлургическим, механическим, химическим и термическим воздействиям, которые приводят к значительным изменениям в поверхностном слое. Под влиянием технологических процессов сварки, прокатки, волочения, кузнечно-прессовой обработки, точения, фрезерования, шлифования и других видов механической обработки, а также в процессе эксплуатации на поверхности появляются различного рода загрязнения, как неорганические – окисные пленки, ржавчина, окалина, так и органические – остатки смазочных и охлаждающих жидкостей (СОЖ), масляные пятна и т.д. Все это оказывает неблагоприятное влияние на физико-химические, механические, трибологические и другие эксплуатационные характеристики поверхности и поверхностного слоя, ухудшая механические свойства, уменьшая коррозионную стойкость, снижая мало- и многоцикловую усталостную прочность и другие характеристики деталей машин и механизмов [1].

Если на поверхность детали должны наноситься покрытия (гальванические, лакокрасочные, защитно-декоративные, газотермические и др.), то неудовлетворительное состояние поверхности приводит к резкому уменьшению адгезионной прочности нанесенного покрытия с поверхностью детали и его отслаиванию в процессе эксплуатации.

Традиционно дефекты поверхности и поверхностного слоя металла, органические и неорганические загрязнения удаляются механической, ультразвуковой, химической и электрохимической обработками. К ним относятся шлифование, полирование, крацевание, струйно-абразивная обработка, обезжиривание, травление, активирование.

Химические методы очистки поверхности от загрязнений органического характера имеют такие недостатки, как низкая производительность, потребность в расходных материалах, а также создают экологические проблемы. Кроме того, химические методы очистки позволяют удалять не все виды загрязнений и не позволяют удалять дефекты поверхностного слоя. Основными способами механической обработки поверхности являются шлифование, полирование, крацевание, виброобработка, струйная абразивная и гидроабразивная обработка. Недостатками этих технологий являются остатки абразивов на поверхности обрабатываемых деталей, а также, зачастую, высокие энергозатраты.

Технология лазерной очистки лишена подобных недостатков, так как является бесконтактным, безабразивным, высокопроизводительным и экологически чистым способом очистки поверхностей перед проведением различных технологических операций, в том числе покраски, нанесения защитных покрытий, сварки и т.д. Однако до недавнего времени применение лазерной очистки ограничивалось высокой стоимостью лазеров и их недостаточной надежностью. Ситуация коренным образом изменилась с появлением волоконных лазеров, чьи срок службы и надежность, высокий КПД, стабильность параметров и удобство использования с лихвой окупают издержки на их приобретение и эксплуатацию.

Цель представленной работы состоит в том, чтобы на основе анализа механизма лазерной очистки выявить ее основные возможности и разновидности, опробовать и рекомендовать предпочтительные области ее применения в приборо- и машиностроении.

Механизм лазерной очистки

Рассмотрим воздействие лазерного импульса на загрязненную металлическую поверхность. В большинстве случаев поверхность металла загрязнена неметаллическими веществами, такими как ржавчина, окисные пленки, масло и остатки СОЖ. Распространение света в веществе, как правило, описывается законом Бугера–Ламберта–Бэра:

$$q(x) = q_0(1 - R)\exp(-\lambda x), \quad (1)$$

где q_0 – плотность мощности излучения, падающего на поверхность материала; $q(x)$ – плотность мощности излучения на глубине x ; R – коэффициент отражения вещества; λ – показатель поглощения вещества.

Показатель поглощения металлов на длине волны 1,06 мкм составляет 10^{-3} – 10^{-4} см⁻¹, тогда как показатель поглощения неметаллических веществ на несколько порядков ниже и составляет 10^{-1} – 10^{-3} см⁻¹. Из соотношения (1) следует, что металлы на этой длине волны поглощают излучение лазера в тонком поверхностном слое, тогда как неметаллические вещества имеют объемное поглощение. Таким образом, для толщин в несколько сотен микрометров допустимо считать, что слой загрязнения относительно прозрачен.

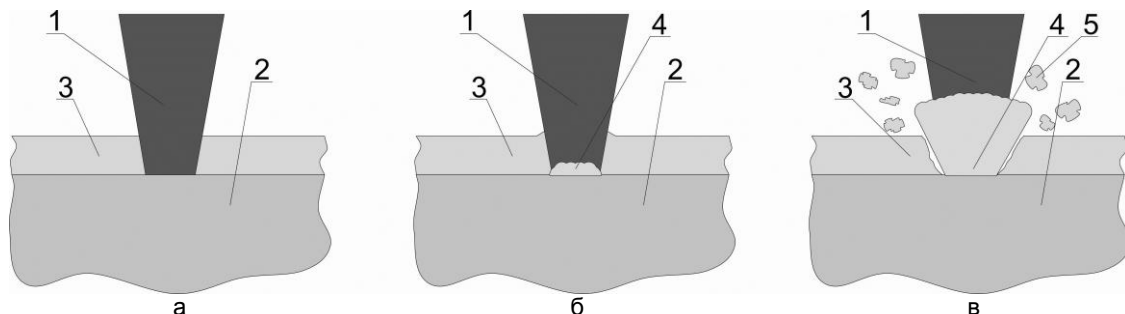


Рис. 1. Механизм лазерной очистки: 1 – лазерный луч; 2 – загрязненный материал; 3 – загрязнение; 4 – облако испаренного вещества; 5 – частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала. Лазерный луч, проходя через пленку загрязнения и попадая на поверхность материала (а), испаряет часть материала на обрабатываемой поверхности (б). Под давлением горячих паров слой загрязнения разрушается (в)

Опираясь на изложенное выше, опишем механизм лазерной очистки. Будем считать, что лазерный импульс, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение без ослабления и поглощается в приповерхностном слое материала (рис. 1, а). В случае, когда плотность мощности лазерного излучения достаточна для того, чтобы разогреть материал до температуры кипения, на границе раздела загрязнение – основной материал начинается испарение материала (рис. 1, б). Под давлением разогретых до высоких температур паров слой неметаллического загрязнения разрушается и удаляется с поверхности материала (рис. 1, в). Кроме того, во многих случаях давление разогретого газа разрушает слой загрязнения не только в области прямого лазерного воздействия, но и в близлежащей зоне, что повышает производительность лазерной очистки.

С энергетической точки зрения задача выбора оптимального режима работы лазера при очистке сводится к обеспечению минимального порога испарения вещества основного металла. Известно, что таковой обеспечивается в импульсном режиме воздействия [2]. Кроме того, чем меньше длительность воздействия, тем меньше глубина прогреваемого слоя вещества и, следовательно, меньше количество образующегося расплава и пара (т.е. меньше повреждение основного вещества) при большем давлении последнего. Глубина прогреваемого слоя вещества определяется соотношением

$$x_{\text{пр}} \sim \sqrt{\alpha\tau}, \quad (2)$$

где α – температуропроводность материала; τ – длительность импульса. Так, согласно соотношению (2), при воздействии гигантского импульса длительностью 10 нс глубина прогреваемого слоя в стали $x_{\text{пр}}$ составляет 10^{-5} – 10^{-6} см, при этом испарение происходит практически без образования расплава на поверхности вещества, и модификация исходной поверхности минимальна.

Таким образом, с позиций оптимизации режима очистки предпочтительным является использование для этой цели импульсного лазерного воздействия.

Очистка при помощи импульсного волоконного лазера

Рассмотрим возможность применения для очистки волоконного импульсного лазера ИЛМИ-1-50 производства IPG Photonix, имеющего следующие характеристики: длина волны излучения 1,064 мкм; частота следования импульсов 50–100 кГц; средняя мощность 50 Вт; энергия импульса до 1 мДж; длительность импульса 200 нс.

Излучение данного лазера фокусировалось в пятно диаметром 50–100 мкм, а лазерный луч сканировался по загрязненной поверхности при помощи гальваносканера. Таким образом, максимальная плотность мощности лазерного излучения составляла 200 МВт/см². Для обеспечения меньшей плотности мощности либо уменьшалась энергия импульса, либо увеличивалось фокусное расстояние фокусирующей системы (увеличивался диаметр пятна в фокальной плоскости).

С использованием волоконного импульсного лазера ИЛМИ-1-50 были реализованы следующие режимы лазерной очистки.

- Очистка с минимальной модификацией поверхности. Для обеспечения данного режима плотность мощности лазерного излучения была подобрана таким образом, чтобы давления, созданного испарен-

ным материалом, хватало для удаления слоя загрязнения, но было недостаточно для вытеснения расплава к краям зоны воздействия (рис. 2, а). Данный режим лазерной очистки подходит для очистки материала от тонких оксидных пленок, легких видов загрязнения, а также в тех случаях, когда недопустимо увеличение шероховатости поверхности после очистки.

- Очистка и создание микроструктуры на поверхности материала. Для обеспечения такого режима необходимо подобрать плотность мощности излучения так, чтобы давления испаренного вещества было достаточно для вытеснения расплава к краям зоны воздействия. Таким образом, при правильном выборе скорости сканирования на поверхности материала образуется регулярная структура, представленная на рис. 2, б. Обработка в режиме микроструктурирования обеспечивает наилучшие адгезионные свойства и исключает необходимость применения жидких реагентов для обезжиривания поверхности перед покраской или нанесением защитного покрытия.
- Глубокая очистка. Это режим очистки с максимальной энергией импульса и плотностью мощности. Данный режим отличается наличием наибольшего количества испаренного вещества и самой большой зоной расплава (рис. 2, в). Тем самым режим подходит для удаления глубоких загрязнений, в том числе окалины. Следует заметить, что после глубокой лазерной очистки поверхность приобретает большую шероховатость (Rz 20 и более).

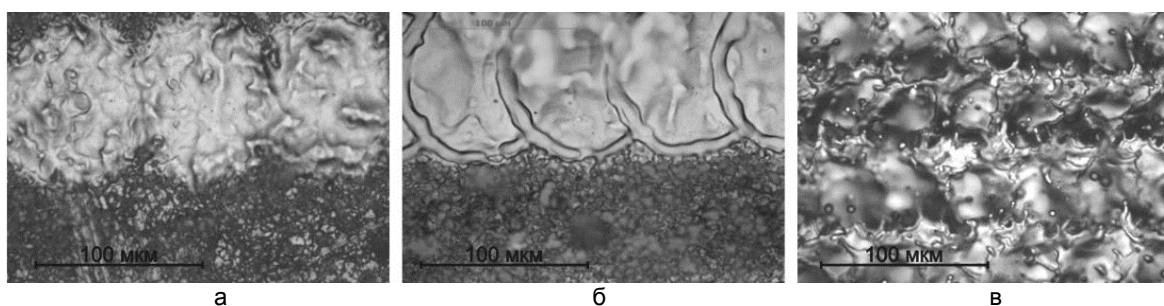


Рис. 2. Режимы лазерной очистки: очистка с минимальной модификацией поверхности (а); очистка в режиме микроструктурирования (б); глубокая очистка с максимальной долей испаренного материала (в)

Как правило, очистка поверхности осуществляется либо с целью подготовки к консервации или переработке изделий, либо для удаления эксплуатационных загрязнений, либо перед нанесением защитных покрытий. Если в первых двух случаях требуется только удаление загрязнений, то в последнем случае очень важную роль в выборе технологии могут играть адгезионные свойства поверхности, которые можно повысить при помощи лазерной обработки.

Очистка с применением твердотельных лазеров в режиме генерации гигантских импульсов

Для исследования процесса лазерной очистки импульсами меньших длительностей был собран YAG: Nd лазер, работающий в режиме генерации гигантских импульсов, имеющий следующие характеристики: длина волны излучения 1,064 мкм; частота следования импульсов до 200 Гц; энергия импульса 20 мДж; длительность импульса 10 нс. С использованием данного лазера были проведены эксперименты по очистке ржавчины со стальной пластины. Для этого лазерный импульс фокусировался в пятно диаметром 0,2 мм. Сканирование пучка по образцу осуществлялось при помощи двухкоординатной системы с шагом между импульсами 0,2 мм. В результате слой ржавчины был полностью удален, изменения шероховатости поверхности не выявлено.

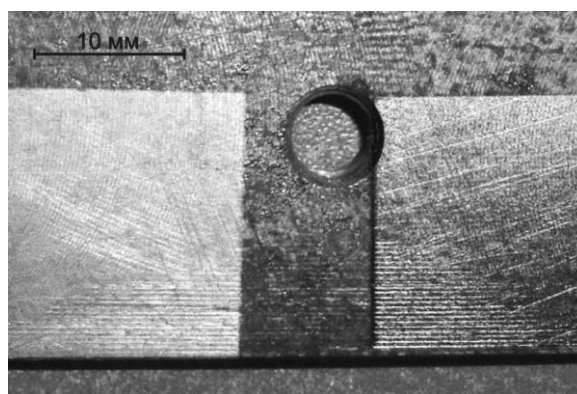


Рис. 3. Лазерная очистка стальной пластины от ржавчины при помощи лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов (слева), и при помощи волоконного лазера (справа)

На рис. 3 изображена стальная пластина, очищенная от ржавчины при помощи лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов (слева) и при помощи волоконного лазера (справа).

Применение лазерной очистки в промышленности

На базе изложенных исследований по запросам промышленности были проведены эксперименты по исследованию возможностей применения лазерной очистки на следующих операциях в различных производствах:

- очистка турбинных лопаток от эксплуатационных загрязнений (рис. 4);
- дезактивация узлов и агрегатов атомных энергетических установок;
- очистка внутренних поверхностей труб теплообменников от солевых отложений;
- очистка растриванных полиграфических валов (анилоксов) от различных типов красок;
- очистка режущего инструмента;
- очистка железнодорожных вагонов от старой краски;
- очистка изделий двойного назначения от многослойных лакокрасочных покрытий;
- очистка ступеней эскалаторов в метрополитене;
- очистка кромок деталей перед сваркой;
- очистка изделий от изношенных гальванических покрытий;
- очистка поверхностей алюминиевых сплавов от окисных пленок перед нанесением олеофобных покрытий;
- очистка памятников и произведений искусства от биологических и других видов загрязнений [3].

Некоторые результаты этих экспериментов приведены на рис. 4–7.

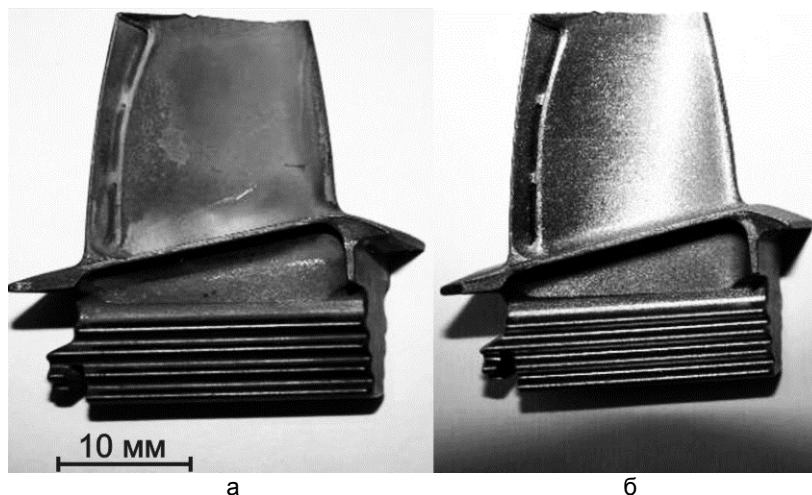


Рис. 4. Лазерная очистка турбинной лопатки от эксплуатационных загрязнений при помощи импульсного волоконного лазера. Внешний вид лопатки до (а) и после (б) лазерной очистки

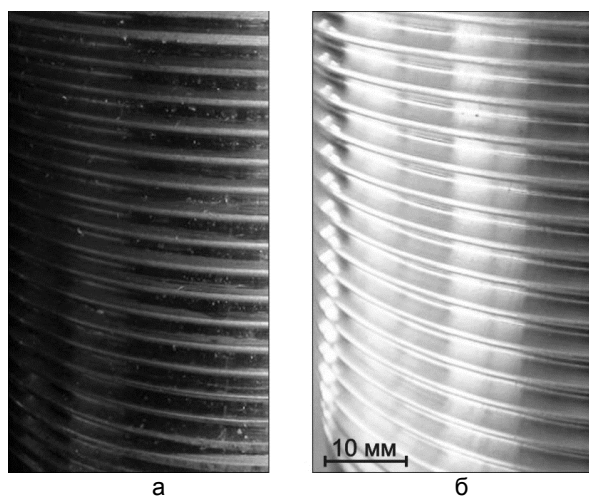


Рис. 5. Лазерная очистка поверхности резьб труб при помощи импульсного волоконного лазера. Внешний вид поверхности резьбы трубы до (а) и после (б) лазерной очистки

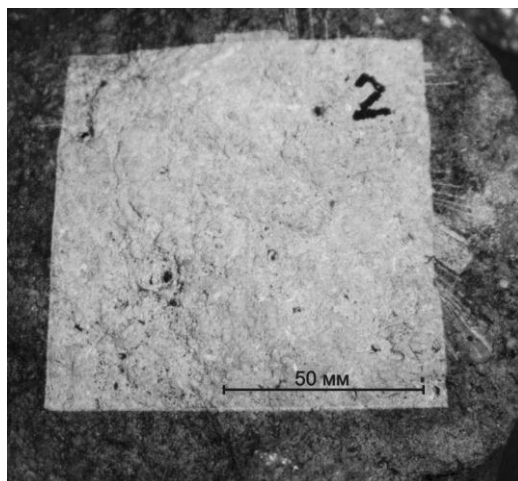


Рис. 6. Очистка известняка от биологических загрязнений при помощи импульсного волоконного лазера

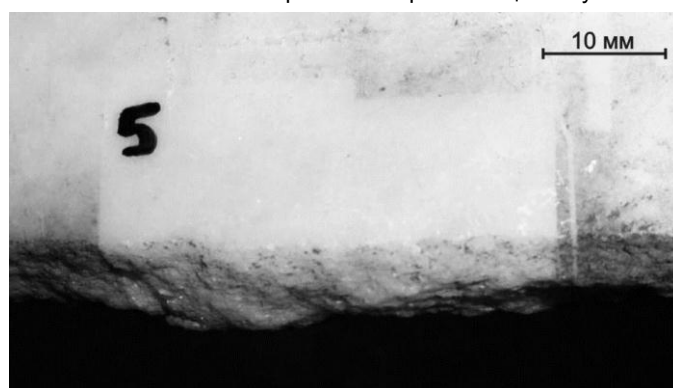


Рис. 7. Очистка мрамора при помощи лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов (длительность импульса 10 нс, энергия импульса 20 мДж)

Заключение

В настоящей работе описаны две группы экспериментов по лазерной очистке поверхности с применением лазеров микронного диапазона длин волн. При помощи импульсного волоконного лазера ИЛМИ-1-50 реализованы три режима очистки: с минимальной модификацией поверхности, с созданием микрорельефа на поверхности металла и режим глубокой очистки. При помощи импульсного твердотельного лазера, работающего в режиме генерации гигантских импульсов, реализован режим очистки без модификации поверхности. Кроме того, показаны возможные области применения лазерной очистки материалов в промышленности.

Работа выполнена при поддержке госконтракта РФ №11.519.11.4017, гранта Президента РФ по поддержке ведущей научной школы НШ-619.2012.2 и гранта РФФИ 10-02-00208.

Литература

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
3. Парфенов В.А., Геращенко А.Н., Геращенко М.Д., Григорьева И.Д. Лазерная очистка исторических памятников // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 2 (66). – С. 11–17.

- Вейко Вадим Павлович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, veiko@lastech.ifmo.ru
- Кишалов Антон Александрович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, grinfo@mail.ru
- Мутин Тимофей Юрьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, timofeymutin@yandex.ru
- Смирнов Валентин Николаевич** – ООО «НПП «Лазерные технологии», кандидат технических наук, генеральный директор, valentin56@mail.ru