

УДК 621.373.826

PACS: 79.20.Eb, 81.65.Cf, 81.65.Ps

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-4-340-355

EDN: LFYGIH



## Лазерные технологии, сопутствующие лазерной ударной обработке деталей: очистка, полировка, наплавка (обзор)

В. Ю. Железнов, Т. В. Малинский, В. Е. Рогалин, Р. Р. Хасая, Ю. В. Хомич,  
В. В. Исаков, А. Л. Козлов, И. А. Новиков, Ю. А. Ножницкий, С. А. Шibaев

*Разнообразные лазерные технологии активно используются в металлообработке. В частности, лазерная ударная обработка (ЛУО) является наиболее эффективным способом увеличения ресурса металлоконструкций, подверженных многоцикловой нагрузке. Она используется для увеличения ресурса дорогостоящих элементов конструкции, например, деталей авиационных двигателей. Такой обработке рекомендуется подвергать детали, прошедшие определенный срок эксплуатации. Однако, в дополнение к ЛУО, в технологический цикл имеет смысл добавить некоторые сопутствующие лазерные технологии, такие как очистка, полировка и наплавка. Эти технологии уже давно применяются в обработке металлов. Бывшие в употреблении детали, прежде всего, нуждаются в тщательной очистке перед проведением процесса ЛУО. Для этого наиболее эффективна лазерная очистка. Затем деталь может нуждаться в ликвидации забоин, для чего весьма эффективна лазерная наплавка. После проведения этих операций, а также ЛУО, обычно требуется полировка детали, которая также возможна с использованием лазерной технологии. В данной статье рассмотрены основные лазерные методы очистки, наплавки и полировки металлических конструкций, которые могут быть использованы, как совместно действующие.*

Ключевые слова: полировка, очистка, наплавка, лазер, лопатка газотурбинного двигателя, лазерная ударная обработка (ЛУО).

### Введение

На сегодняшний день считается общепринятым, что метод лазерной ударной обработки (ЛУО) является наиболее эффективным способом увеличения ресурса деталей металлоконструкций, подверженных внешним воздей-

ствиям при нагрузке, разрушение которых происходит по усталостному механизму [1–3]. В авиационной технике ЛУО применяется, прежде всего, для обработки дорогостоящих изделий, наиболее подверженных усталостному разрушению, например, лопаток газотурбинных двигателей.

---

Железнов Вячеслав Юрьевич<sup>1</sup>, н.с.

Малинский Тарас Владимирович<sup>1</sup>, зав. лаб., к.т.н.

Рогалин Владимир Ефимович<sup>1</sup>, зав. лаб., д.ф.-м.н.

E-mail: v-rogalin@mail.ru

Хасая Радмир Рюрикович<sup>1</sup>, зам. директора, к.т.н.

Хомич Юрий Владиславович<sup>1</sup>, с.н.с., к.т.н.

Исаков Владимир Владимирович<sup>2</sup>, с.н.с., к.т.н.

Козлов Андрей Львович<sup>2</sup>, ген. директор.

Новиков Илья Александрович<sup>2</sup>, инженер 2 кат.

Ножницкий Юрий Александрович<sup>2</sup>, директор ИЦ, д.т.н.

Шibaев Сергей Александрович<sup>2</sup>, нач. сектора.

E-mail: sashibaev@ciam.ru

<sup>1</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

<sup>2</sup> ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023

После доработки 10.07.2023

Принята к публикации 15.07.2023

---

© Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Рогалин В. Е., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Исаков В. В., Козлов А. Л., Новиков И. А., Ножницкий Ю. А., Шibaев С. А., 2023

Однако при воздействии интенсивного лазерного излучения на металлы в них происходят разнообразные физико-химические процессы, которые необходимо учитывать, чтобы получить максимально возможный эффект упрочнения [4–6]. Следует также учесть, что конструкционные детали, бывшие в эксплуатации, нуждаются в очистке от загрязнений, залечивании забоин, последующей полировке поверхности. Эти процессы могут быть также весьма эффективно проведены с помощью лазерной техники.

В работе, с развитием метода ЛУО и комплексного применения лазерных технологий, рассматриваются основные механизмы лазерной чистки, полировки и наплавки, их преимущества и перспективы увеличения срока эксплуатации металлоконструкций, подверженных многоцикловой нагрузке.

### Лазерная очистка поверхности

Очистка металлических поверхностей является одной из основных стадий технологического процесса и гарантирует высокий срок службы конечных изделий во многих областях науки, техники и промышленности.

Лазерная очистка поверхности наиболее перспективный метод удаления загрязнений с различных поверхностей, используется не только в авиационной промышленности, но и в других областях, включая реставрацию предметов живописи и скульптур, а также архитектуру [7, 8]. Метод активно используется в микроэлектронике и оптике, где крайне важна чистота поверхности перед нанесением покрытий [9].

В процессе эксплуатации лопатки газотурбинных двигателей подвергаются воздействию высоких температур, химическому воздействию продуктов сгорания топлива и механическому воздействию частиц пыли, в результате чего на их поверхности появляются различного рода дефекты: трещины, коррозионные и эрозионные повреждения [10]. Поэтому они подвергаются регулярной очистке, и в случае необходимости, реставрации, или замене.

Существует задача уменьшения времени простоя двигателя летательного аппарата, а также уменьшения экономических затрат на

ремонт и обслуживание [11]. Эффективная очистка лопаток авиационного двигателя, и двигателя в целом, является весьма трудозатратным этапом ремонта.

На отечественных авиационных предприятиях сегодня наиболее распространенными методами очистки являются методы: химической, механической и смешанной очистки [12]. Однако данные методы очистки уступают лазерному методу по таким показателям, как безопасность, экологичность, скорость, эффективность, качество, компактность, простота.

Применение компактных лазерных приборов для очистки позволяет очищать лопатки турбин без их демонтажа, в отличие от жидких химических реагентов, при которых после проведения очистки требуется провести работы по сборке и балансировке ротора турбины, это существенно увеличивает время простоя оборудования, трудозатраты и экономически неэффективно [13].

Лазерная очистка позволяет проводить удаление разнообразных [14]:

- а) эксплуатационных загрязнений;
- б) гальванических покрытий;
- в) лакокрасочных покрытий;
- г) биологических загрязнений;
- д) следов коррозии;
- е) консервационных покрытий и комбинированных загрязнений;
- ж) нефтепродуктов;
- з) нагара и т. д.

На рисунке 1 представлен внешний вид лопатки турбинного двигателя до лазерной очистки и после нее.

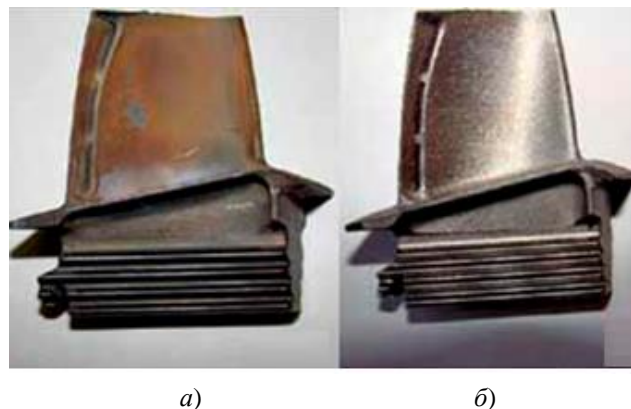


Рис. 1. Лазерная очистка турбинной лопатки от эксплуатационных загрязнений при помощи частотно-импульсного лазера [14]; а) – до очистки, б) – после

На сегодняшний день на рынке представлены как частотно-импульсные лазеры для очистки поверхности, так и непрерывные. Их главное отличие в том, что излучение импульсного лазера может обеспечить нулевое повреждение заготовки после очистки от загрязнения, а также подходит для очистки с высокими требованиями к сохранности формы поверхности очищаемого материала. Непрерывный лазер обладает большей средней мощностью и может применяться для очистки крупных участков поверхности, например, для удаления ржавчины со стальных листов, краски, плотных нефтяных отложений и т. д. Но при этом непрерывное излучение может оказывать необратимое воздействие на поверхность материала, вследствие термодформации поверхности.

Импульсные лазеры нашли применение во всех видах очистительных работ [15–17], но прежде всего, при поведении деликатной очистки поверхностей, при реставрации живописи, предметов древности из керамики и металла, или очистка пресс форм.

Запатентовано множество технических решений, связанных с лазерной очисткой разнообразных поверхностей, например, способ, который можно использовать для очистки поверхности металлических конструкций и трубопроводов АЭС [18, 19]. Импульсное наносекундное лазерное излучение вызывает абляцию тугоплавкой оксидной пленки на поверхности материалов, входящих в состав АЭС, и последующее удаление паров с помощью потока газа. Это техническое решение позволяет удалять с поверхности материалов коррозию, масляные пленки, а также дезактивирует радиационно-загрязненные материалы за счет испарения поверхностной оксидной пленки.

В работе [20] описан способ лазерной очистки лопаток газотурбинных двигателей, при котором лопатка из суперсплава с термобарьерным покрытием, которое удаляется частотно-импульсным лазером, так чтобы обработанная поверхность лопатки имела шероховатость  $\sim 4\text{--}10$  мкм. Скорость подачи излучения лазера составляет от 25 мм/с до 1000 мм/с, а частота повторения импульсов  $\sim 12\text{--}50$  кГц. При этом значительно упрощается очистка лопатки от покрытия и снижается вероятность ее повреждения.

Ниже будут проанализированы три стандартных метода очистки лазерным излучением и влияние основных параметров лазера на эффект очистки.

### Сухая лазерная очистка

В настоящее время сухая лазерная очистка (рис. 2) является наиболее широко применяемым методом лазерной очистки. Луч непосредственно облучает поверхность подложки, удаляя частицы и пленки. Механизм очистки частотно-импульсным излучением выглядит следующим образом: при нагреве короткими импульсами загрязнения на поверхности происходит его быстрое тепловое расширение. Далее, после окончания импульса, в загрязняющем слое возникают механические напряжения и инерционные силы [21, 22]. Быстрое тепловое расширение подложки приводит к преодолению силы Ван-дер-Ваальса (если она превосходит силы адгезии) и удалению загрязняющего слоя [23].

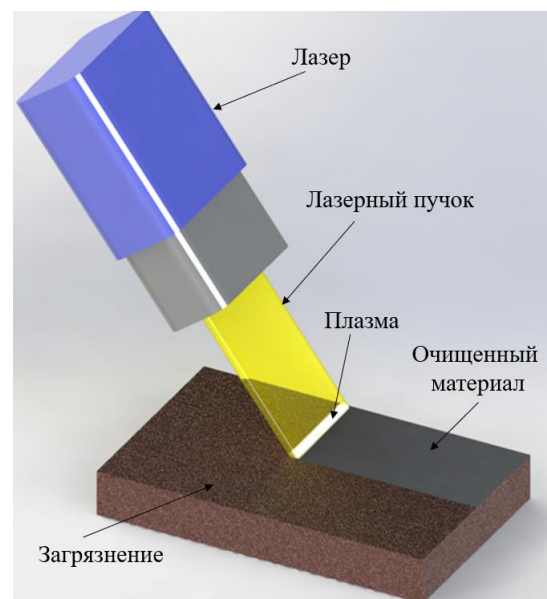


Рис. 2. Сухая лазерная очистка поверхности

Для частиц диаметром менее нескольких микрон сила Ван-дер-Ваальса определяется, как [23]:

$$F_v = \frac{hr}{8\pi z^2} + \frac{hr^2}{8\pi z^3}, \quad (1.1)$$

где  $r$  радиус частиц,  $h$  постоянная Ван-дер-Ваальса и  $z$  расстояние между атомами за-

грязняющих частиц и подложки соответственно.

Этот процесс включает в себя быстрое тепловое расширение материалов, упругую деформацию частиц, локальную абляцию матрицы, вызванную воздействием интенсивного излучения, и взрывное испарение загрязняющих частиц. Эффект очистки зависит от свойств материала (размер частиц, тип частиц, материал подложки) и параметров лазера (интенсивность, длина волны, длительность импульса, частота повторения, угол падения).

### Влажная лазерная очистка

При влажной лазерной очистке поверхность материала перед обработкой покрывают тонким слоем жидкости и, с помощью воздействия лазерного излучения, добиваются ее кипения и затем испарения [21]. Когда лазерный луч поглощается на поверхности очищаемой детали, жидкость вблизи поверхности нагревается до температуры выше точки кипения, что приводит к кипению пузырьков пара. Когда импульс заканчивается, подача энергии к пузырькам прекращается, они становятся меньше и схлопываются в жидкости. Возникает ударная волна в жидкости, которая, распространяясь вглубь материала, вызывает разрушение загрязняющего слоя, выброс жидкости и образующихся продуктов очистки. На рисунке 3 показан механизм влажной лазерной очистки.

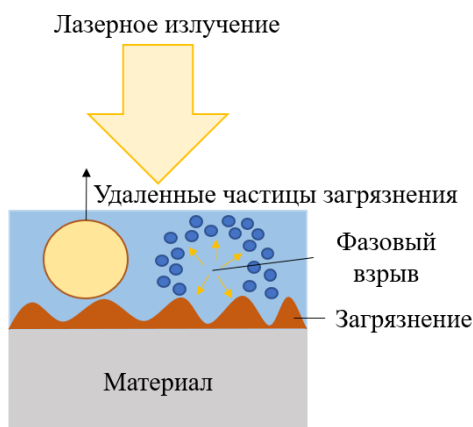


Рис. 3. Механизм влажной лазерной очистки [23]

Адгезия микрочастиц на влажных поверхностях возникает благодаря капиллярной и

Ван-дер-Ваальсовой силам. Капиллярная сила является функцией радиуса частицы и поверхностного натяжения жидкости [23]:

$$F_{cp} = 4\pi r\sigma(T) \quad (1.2)$$

где  $r$  и  $\sigma(T)$  – радиус частицы и поверхностное натяжение жидкости при температуре  $T$ . Погружая прикрепленные частицы в жидкость, силу Ван-дер-Ваальса обычно можно уменьшить примерно в два раза [23]:

$$F_v = \frac{h\delta^2}{8\pi Z^3} \quad (1.3)$$

где  $h$ ,  $\delta$  и  $Z$  – константы Ван-дер-Ваальса материала, радиус присоединенной области и расстояние между атомами между частицей и матрицей.

Порог лазерной очистки определяется как плотность энергии излучения лазера, при которой сила очистки равна адгезии [23]:

$$F_c = [2pc(P_v - P_\infty)vf]^{1/2} \pi r^2 \quad (1.4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $c$  – скорость распространения;  $P_v$  – давление пара внутри пузырька;  $P$  – давление окружающей жидкости;  $v$  – скорость расширения;  $f$  – объемная доля пара.

Для удаления частиц диаметром 60–800 нм порог лазерной очистке равен 50 мДж/см<sup>2</sup>, при длительности импульса равной 8 нс и длине волны лазера  $\lambda = 532$  нм [24].

При превышении порога адгезии, грязь отделяется от поверхности подложки. Сила, действующая на частицы при взрывном испарении воды, более чем на порядок превышает силу адгезии, что свидетельствует о высокой эффективности жидкостной очистки. Однако влажная лазерная очистка не универсальна, например, она не подходит для полупроводников из-за риска образования паровой маски и возможного структурного повреждения.

### Лазерная ударно-волновая очистка

Широкое применение нашла лазерная ударно-волновая очистка. Это бесконтактная технология очистки большой площади, кото-

рая позволяет удалять частицы грязи с поверхности подложки без прямого воздействия лазерного луча. Лазерный луч фокусируется на определенном расстоянии от поверхности подложки. В фокусе генерируется быстро расширяющаяся ударная волна плазмы оптического пробоя воздуха. Этот способ в некоторых случаях используется в атмосфере инертного газа. Лазерная ударно-волновая очистка может эффективно применяться для удаления частиц с поверхности металла, причем подложка защищена от лазерной абляции независимо от используемой длины лазера.

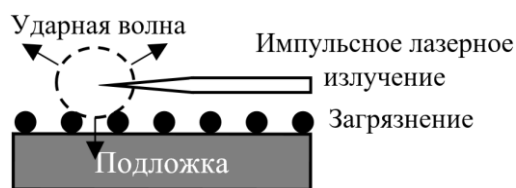


Рис. 4. Процесс сухой лазерной ударно-волновой очистки [25]

Критическое давление, необходимое для отрыва частиц  $P_c$  определяется выражением [26]:

$$P_c = \frac{2a(F + mg)}{A_s (D \cos \theta - 2a \sin \theta)} \quad (1.5)$$

где  $a$  – радиус области контакта между частицей и поверхностью подложки;  $F$  – сила Ван-дер-Ваальса;  $m$  – масса частиц;  $g$  – ускорение свободного падения;  $A_s$  – эффективная площадь по нормали к приложенному давлению;  $\theta$  – угол между приложенной силой и плоскостью, параллельной поверхности подложки;  $D$  – диаметр частицы.

Давление необходимое для эффективного удаления частиц диоксида урана  $UO_2$  диаметром 1 микрометр с поверхности стекла твердотельным Nd:YAG лазером составляет  $2,8 \times 10^4$  [26].

Для более эффективного удаления органических или влажных частиц, используют такие виды этого метода, как:

а) подводная лазерная ударно-волновая очистка – лазер применяется для создания ударных волн и образования кавитационных пузырьков под водой. При разрыве пузырьков загрязнения удаляются высокоскоростной струей жидкости;

б) паровая лазерная ударно-волновая очистка осуществляется взрывным испарением пленки жидкости;

в) влажная лазерная ударно-волновая очистка генерирует ударную волну в воздухе посредством лазерно-индуцированной плазмы, а затем использует водяную пленку для воздействия на частицы для завершения очистки;

Процесс удаления загрязнения зависит от плотности жидкости, вязкости и поверхностной энергии. Например, высокая плотность пленки жидкости имеет большее сопротивление частицам, что приводит к более эффективному очищению. Но чем меньше поверхностная энергия заготовки, тем ниже эффективность удаления частиц. Ударно-волновая очистка  $CO_2$  лазером позволила удалить диметилсиликоновое масло с поверхности золотого покрытия, которое было нанесено на подложку из стекла, без повреждения покрытия (размер пятна составлял  $0,8 \text{ мм}^2$ , длина волны  $10,6 \text{ мкм}$ , мощность лазера  $10,8 \text{ Вт}$ , время облучения  $10 \text{ с}$ ) [25].

Любопытный вариант лазерно-химической очистки металлических поверхностей приведен в работе [27]. В процессе работы электроразрядного  $CO_2$  лазера с использованием в смеси легкоионизируемой присадки из триэтиламина было обнаружено, что в процессе эксплуатации лазера присадка постепенно конденсируется на поверхности медного резонаторного зеркала, расположенного на торце кюветы [28]. Этот слой на поверхности зеркала заметно снижал коэффициент отражения и вынуждал производить периодическую очистку зеркала.

В результате была разработана технология бесконтактной химико-механической очистки дорогостоящих лазерных зеркал [29–31]. Было обнаружено, что после каждого цикла очистки коэффициент отражения зеркал постепенно увеличивался и, в конце концов, стал превышать исходное значение, измеренное на свежеполитованном зеркале [31]. Этот результат объяснен тем, что в процессе работы лазера на поверхности зеркала происходит «выгорание» поглощающих включений абразива, шаржированных в процессе шлифовки и полировки зеркала. После химико-механической очистки удалялись остатки этих загрязнений.

Таким образом, лазерная очистка должна предшествовать процессу лазерной ударной обработки деталей авиационной техники, так как при обработке грязной детали возможно легирование поверхностного слоя обрабатываемой детали посторонними примесями, и даже, внедрение в него загрязняющих частиц. Эти частицы могут стать источниками зарождающихся микротрещин, снижающих усталостную прочность изделия.

### Лазерная полировка

Сейчас активно развиваются разнообразные технологии микрообработки поверхностей материалов лазерным излучением. Лазерная полировка металлов свою эффективность в снижении шероховатости по сравнению с другими методами полировки. Например, традиционная пескоструйная обработка и механическая полировка не являются приемлемыми решениями для прецизионных деталей, требующих селективной обработки [32], а химические методы полировки не являются экологически безопасными. В отличие от ручной обработки поверхности, шерохова-

тость, достигаемая лазерной полировкой, составляет всего  $Ra \sim 50$  нм, против  $Ra \sim 5$  нм [33], однако скорость лазерной полировки намного выше. Все вышеперечисленное делает технологию лазерной полировки перспективной с высоким потенциалом развития и применения во всех отраслях промышленности.

Лазерной полировке посвящено множество исследований. Например, в работе [34] сообщается о лазерной полировке сплава Inconel 718 (изготовленного с помощью 3D принтера) в аргоновой газовой камере и на воздухе. Полировку проводили с помощью Yb:YAG лазера (длина волны излучения 1030 нм, мощность до 8 кВт). Показано, что полученная шероховатость  $Ra$  в аргоновой среде меньше, чем на воздухе, а также отсутствует оксидный слой, возникающий при полировке на воздухе.

В работе [35] было проведено сравнение лазерной полировки Ti6Al4V, Inconel 718 и стали 1.2343. Ниже в таблице 1 представлены измеренные с помощью профилометра Zygo New View 7300 шероховатости данных сплавов. Этот прибор был использован при исследовании германия и латуни [35, 36]).

Таблица 1

Сравнение результатов лазерной полировки Ti6Al4V, Inconel 718 и стали 1.2343 [35]

Материал	$Ra_{исх.}$ , мкм	$Ra_{полир.}$ , мкм	Время полировки, с/см <sup>2</sup>	Глубина переплавления, мкм	Твёрдость по Виккерсу, кгс/мм <sup>2</sup>
Ti6Al4V	1	0,16	7	50	530
Inconel 718	1	0,11	10	60	380
Сталь 1.2343	5	0,1	60	70	560

Обнаружено, что лазерная полировка сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 выполняется намного быстрее по сравнению со сталью 1.2343. Результаты демонстрируют, что лазерная полировка может быть использована для уменьшения шероховатости и времени полировки деталей сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 и может быть рекомендована для деталей, изготовленных аддитивным способом [38].

В статье [39] изучалось применение лазерной полировки инструментальной стали DIN 1.2379. В предварительных испытаниях использовались два разных типа лазеров – CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 2,5 кВт и диодный ла-

зер мощностью 3,1 кВт. Шероховатость была снижена в обоих случаях: более 75 % при использовании CO<sub>2</sub>-лазера и более 80 % при использовании диодного.

Предполагается, что лазерная полировка как до, так и после лазерного ударного упрочнения может увеличить износостойкость лопаток ГТД.

### Принцип лазерной полировки

Лазерная полировка – это термодинамический процесс, при котором тонкий поверх-

ностный слой быстро оплавляется и затвердевает под действием лазерного излучения, не оставляя трещин и дефектов. Толщина поверхностного слоя составляет обычно ~ 10–100 мкм. Под воздействием тепловой энергии лазерного излучения поверхность металла (пики шероховатости) начинает плавиться и течь за счет силы тяжести и поверхностного натяжения, заполняя впадины, показанные на рисунке 5, тем самым выравнивая (полируя) поверхность. Процесс не предполагает испарение и, вследствие этого, потери материала.

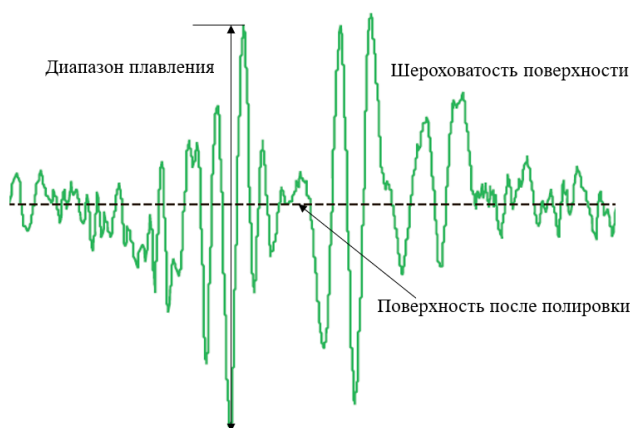


Рис. 5. Принцип лазерной полировки плавлением [40]

Процесс лазерной полировки включает в себя три категории параметров, играющих ключевую роль в области взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металла. В таблице 2 представлены параметры процесса лазерной полировки. Исходная шероховатость поверхности металла является одним из

основных факторов лазерной полировки, так как металл часто бывает неоднороден по уровню шероховатости. В частности, должны быть известны поперечные размеры поверхностных структур. Однородность материала по входящим в его состав примесям и добавкам также является фактором, влияющим на шероховатость поверхности. Поскольку лазерный луч падает на всю поверхность с одинаковой мощностью и интенсивностью, неоднородная поверхность может привести к ухудшению качества обработки поверхности и возникновению сегрегаций и включений. Теплофизические свойства, такие как теплопроводность, вязкость, поверхностное натяжение, температура плавления и испарения, также влияют на шероховатость поверхности. В процессе лазерной полировки необходимо обращать внимание на такие параметры лазера, как диаметр луча, интенсивность излучения и время взаимодействия луча с поверхностью металла, которое сильно влияет на итоговую гладкость поверхности после полировки.

Процесс лазерной полировки можно разделить на три составляющие [41]:

- а) полировка больших площадей путем абляции;
- б) полировка, при которой с помощью регулирования плотности мощности расплавляются только шероховатости до уровня поверхности;
- в) полировка повторным плавлением.

На рисунке 6 показан принцип лазерной полировки непрерывным лазерным излучением.

Таблица 2

Основные параметры, влияющие на лазерную полировку металла

Наименование	Параметры
Заготовка из металла	Исходная топография материала: размер, шероховатость поверхности, однородность поверхности, тепловые и оптические параметры
Лазер и лазерная оптика	Мощность лазера, длительность импульса, частота импульсов, диаметр луча, форма луча, смещение фокуса и интенсивность луча
Процесс лазерного сканирования	Траектория движения, количество перекрытий, процент перекрытий и скорость подачи, время взаимодействия между лазером и металлической поверхностью

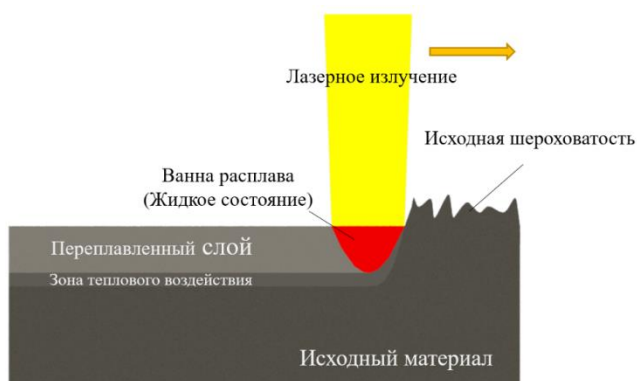


Рис. 6. Принцип лазерной полировки непрерывным лазерным излучением

Лазерная полировка делится на макро- и микрополировку. Макрополировка используется для сглаживания канавок фрезерования, а микрополировка увеличивает уровень блеска металла, то есть идет снижение величины  $Ra$ .

В процессе макрополировки происходит сглаживание макроструктур с помощью непрерывного лазерного излучения, под действием которого создается ванна расплава. При перемещении лазерного луча по поверхности с заданной скоростью сканирования поверхность материала плавится на одной стороне ванны расплава, а затем затвердевает на другой стороне. Шероховатость поверхности сглаживается в процессе переплавки благодаря силам тяжести и поверхностного натяжения расплавленного материала. Расплавленная поверхность затвердевает без каких-либо дефектов, пор и трещин. С помощью непрерывного лазерного излучения в процессе макрополировки можно достигнуть шероховатость переплавленного слоя равной десяткам микрометров.

Процесс микрополировки представляет собой комбинацию переплавки тонкого поверхностного слоя (менее 5 мкм) и испарения микрограней под действием импульсного лазерного излучения [42]. На рисунке 7 представлен принцип микрополировки импульсным лазерным излучением.

Лазерная микрополировка представляет собой дискретный процесс (в отличие от макрополировки). Импульсное лазерное излучение поглощается поверхностью металла, создает ванну расплава, а затем затвердевает до того, как на поверхность попадет следующий импульс и процесс повторится.



Рис. 7. Принцип лазерной полировки импульсным лазерным излучением [43]

Самыми важными параметрами микролазерной полировки являются длительность импульса и распределение интенсивности лазерного пучка в зоне воздействия.

При выборе типа полировки (макро или микро) необходимо учитывать исходную шероховатость поверхности. Макрополировка эффективна для поверхностей, шероховатость которых  $\sim 80$ – $1280$  мкм. При полировке металла, меньшей шероховатости (для случая шлифованных и алмазно-фрезерованных поверхностей), образуются мартенситные структуры при охлаждении. В этом случае необходимо использовать микрополировку. Из-за меньшей глубины ванны расплава и ее относительно короткого времени жизни, зависящего от длительности импульса, достигается значительно более высокая скорость затвердевания. Неровности с шероховатостью менее 80 мкм сильно увеличивает блеск поверхности. Поэтому с помощью лазерной микрополировки можно улучшить функциональные свойства даже для поверхностей, на которых заметно выражена зернограничная анизотропия [43].

### Физические механизмы лазерной полировки

Существует два основных механизма лазерной полировки: мелкое поверхностное плавление (МПП) и поверхностное переплавление (ПП). Эти механизмы зависят от мощности лазера и скорости сканирования поверхности [44].

МПП также называют частично расплавленной металлической поверхностью, оно обусловлено высокой скоростью сканирования и низкой энергией лазера, при этом плавится тонкий поверхностный слой. Тогда расплавленный металл перетекает из пиков во



впадины под действием капиллярного давления; впадины заполняются расплавом. Это приводит к уменьшению толщины поверхностного слоя.

С другой стороны, при увеличении плотности энергии и уменьшении скорости сканирования увеличивается интенсивность пучка и объем ванны расплава. При достижении объема большего, чем расстояние между пиком и впадиной, расплав выливается за пределы впадины и превращает поверхность в ванну расплава – этот эффект называется ПП. В работе [45] разработана теплофизическая модель для анализа эффекта проплавления полированных поверхностей в режиме ПП. Обнаружено, что в данном режиме шероховатость поверхности  $Ra$  увеличивается.

Из-за наличия термического градиента между расплавленной зоной и фронтом затвердевания расплавленный материал уносится в сторону фронта затвердевания. Когда материал затвердевает, появляются поверхностные волны и возникает рябь, (рис. 8) [46]. Из-за неоднородности расстояния между пиком и впадиной, итоговая шероховатость будет зависеть от механизма воздействия в данной точке поверхности (ПП или МПП).

Плотность энергии можно регулировать, изменяя мощность лазера и скорость сканирования; выражение выглядит следующим образом:

$$E = \frac{P}{D \cdot V}, \quad (1.6)$$

где  $E$  – плотность энергии ( $\text{Дж}/\text{мм}^2$ );  $P$  – мощность лазера ( $\text{Вт}$ );  $V$  – скорость сканирования ( $\text{мм}/\text{с}$ );  $D$  – диаметр лазерного пятна ( $\text{мм}$ ).



Рис. 8. Механизм лазерной полировки непрерывным лазерным излучением [46]

Чем меньше длина волны лазера, тем меньше плотность энергии, которая требуется

для полировки поверхности. Но чем больше длина волны лазера, тем выше должна быть мощность лазера и скорость сканирования, однако качество полировки в данном случае станет хуже [41]. Это объясняется, тем, что с уменьшением длины волны обычно снижается коэффициент отражения металла, то есть поглощается большая доля излучения [47]. Лучший результат достигается при использовании последовательно двух этих механизмов полировки, ПП для грубой полировки и МПП для более тонкой.

### Проблемы лазерной полировки

При проведении лазерной полировки нужно учитывать, что на воздухе поверхность металла окисляется, что может привести к неровностям на поверхности, а также образованию трещин, поэтому необходимо использование камеры с инертным газом, например аргоном, для предотвращения окисления [48].

Размер пятна является наиболее сложным параметром для контроля, так как он зависит не только от характеристик лазера, но и от фокусного расстояния оптической системы. Существует проблема, связанная с дифракционным пределом лазерного излучения, который не позволяет получить лазерное пятно, меньше, чем:

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}, \quad (1.7)$$

где  $d$  – минимальный диаметр пятна;  $\lambda$  – длина волны лазера;  $n$  – показатель преломления луча;  $\alpha$  – угол расходимости луча.

Преимущество использования лазерного пучка минимального диаметра в том, что можно добиться большей плотности энергии излучения при меньшем энергопотреблении лазера.

Ключевые проблемы лазерной полировки: увеличение рабочего расстояния; очистка поверхности от загрязнений; увеличение производительности, которая пока уступает химической и механической полировке [49]; контроль интенсивности излучения и диаметра лазерного пучка; влияние зернограничной структуры металла на лазерную полировку; снижение стоимости полировки.

### Преимущества лазерной полировки

Несмотря на некоторые недостатки, преимущества лазерной полировки во многом превосходят другие виды полировки:

- 1) возможность полировки шлифованных, точеных, эрозионных и фрезерованных поверхностей;
- 2) высокая скорость полировки;
- 3) экологичность, так как после полировки не остается отходов;
- 4) возможность селективной полировки, так как лазерный луч может быть сфокусирован на определенных областях, не затрагивая другие;
- 5) процесс может быть полностью автоматизирован и не нуждается в квалифицированной рабочей силе.

### Лазерная наплавка

В аэрокосмической, нефтехимической и автомобильной отраслях многие нагруженные детали находятся в условиях высокой температуры, давления и подвержены износу и коррозии. Следовательно, необходимо дальнейшее улучшение износостойкости и стабильности при высоких температурах. В настоящее время лазерная наплавка широко используется при ремонте различных деталей благодаря таким преимуществам, как более низкая скорость разбавления, небольшая зона термического воздействия, а также хорошей металлургической связи между покрытием и подложкой. Лазерная наплавка особенно эффективна при ремонте дорогостоящих высокоточных изделий, например, пресс-форм [50] или лопаток газотурбинного двигателя [51].

В работе [52] сообщается, что лазерная наплавка с использованием порошка в порошковой ванне наиболее эффективно восстанавливает геометрию лопатки газотурбинного двигателя НК-12МП из жаропрочного литейного сплава ЖС6К. При этом качество наплавки довольно высокое, а нагрев материала лопатки (а, следовательно, термодетформации) минимален.

В статье [53] исследовалась лазерная наплавка торца пера лопаток ГТД с помощью импульсного лазера. Наплавка производилась проволокой диаметром 0,4 мм, материал кото-

рой был идентичен материалу лопатки. Было обеспечено восстановление геометрических размеров лопаток и повышение износостойкости. Трещин, несплавлений и дефектов не было обнаружено.

В работе [54] лазерная наплавка выполнена порошком титанового сплава с гранулами сферической формы размерами ~ 40–120 мкм. Показана перспективность наплавки торца пера лопатки, а также входной и выходной кромки пера. Твердость наплавленного слоя превышала не только значения твердости основного материала, но и была выше значений, которые присущи аргонодуговой сварке. На рисунке 9 представлены лопатки авиационного двигателя после лазерной наплавки и механической обработки.



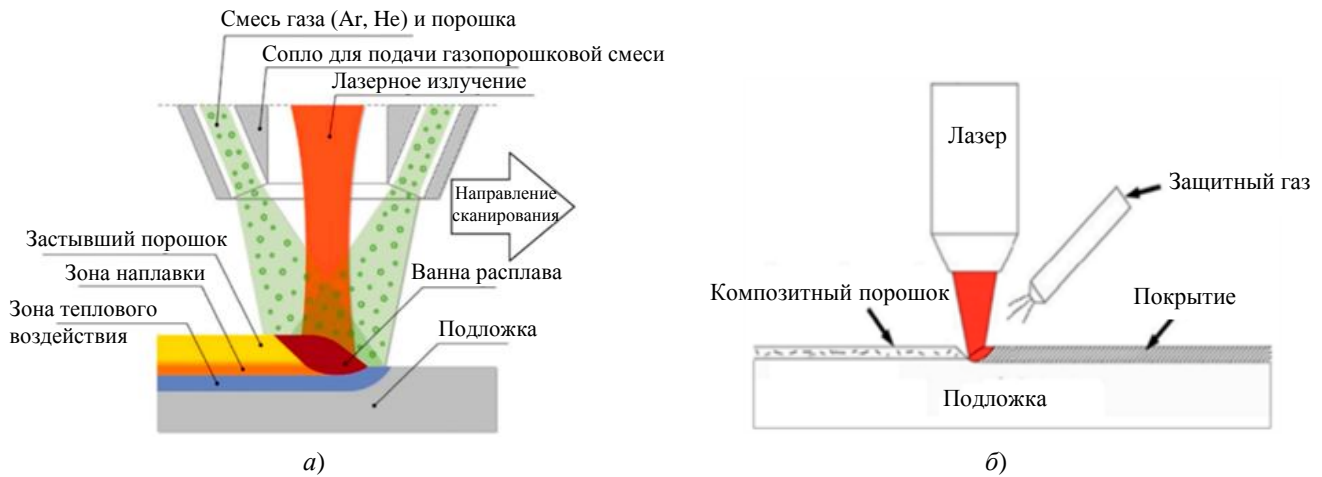
Рис. 9. Авиационные лопатки после лазерной наплавки и механической обработки [54]

Лазерная наплавка – это метод ремонта или изменения поверхности металлической заготовки путем расплавления металлического порошка, проволоки или ленты лазером в месте поверхностного дефекта, который застывая, образует прочную связь с поверхностью заготовки.

Существует четыре метода подачи порошка:

- 1) коаксиальная подача порошка;
- 2) боковая (внеосевая) подача порошка;
- 3) предварительное размещение порошка по поверхности заготовки;
- 4) подача в виде проволоки или ленты.

Чаще всего применяются методы коаксиальной подачи порошка и метод предварительного размещения порошка. Эти два метода продемонстрированы на рисунке 10.



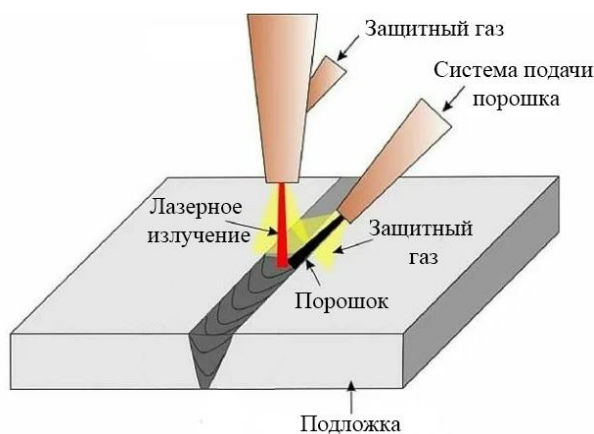
**Рис. 10.** Схема наплавки с коаксиальной подачей порошка (а) и с предварительно распределенным по поверхности порошком (б) [56]

Лазерная наплавка с коаксиальной подачей порошка выглядит следующим образом. Лазерное излучение перемещается по поверхности подложки и образует ванну расплава в точке соприкосновения луча с порошком, который после взаимодействия с излучением застывает и образует плакирующий слой. Порошок подается симметрично со всех сторон. Для того чтобы избежать окисления, в зону наплавки из сопла подают инертный газ (смесь гелия и аргона). Данный метод наплавки позволяет равномерно формировать валики, обеспечивает симметрию относительно направления наплавки, обладает высокой производительностью.

При лазерной наплавке с боковой подачей порошка покрытие создается путем впрыскивания порошка в ванну расплава, причем система подачи порошка может быть располо-

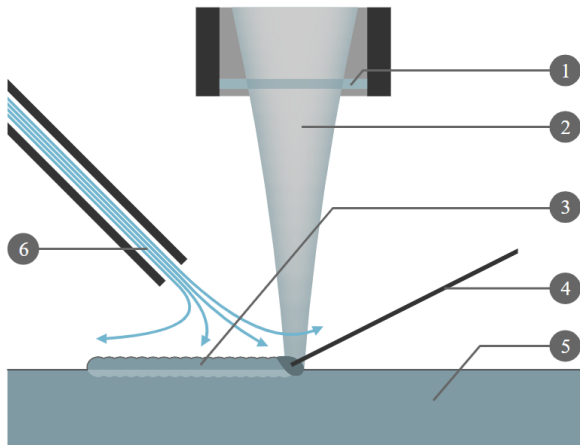
жена как сбоку, так и навстречу движению лазерного излучения [55]. Несимметричность подачи порошка является недостатком данного метода. Процесс лазерной наплавки боковой подачей порошка продемонстрирован на рисунке 11.

В случае, когда порошок предварительно нанесен на поверхность подложки, лазерный луч сканирует поверхность и расплавляет порошок, который затем быстро охлаждается и образует плакирующий слой [56]. Данная система достаточно проста в эксплуатации и обеспечивает хорошее качество наплавленного покрытия, однако есть трудности в контроле глубины проникновения (масса изделия слишком велика по сравнению с нанесенным порошком). Процесс лазерной наплавки с предварительно распределенным по поверхности порошком показан на рисунке 10,б.



**Рис. 11.** Схема наплавки с боковой подачей порошка [57]

При ручной лазерной наплавке проволокой [53] луч создает ванну расплава на поверхности заготовки, а оператор добавляет туда присадочную проволоку. Такой метод наплавки эффективен для устранения небольших дефектов, но для дефектов больших размеров необходимо использовать наплавку с автоматической подачей проволоки. Процесс лазерной наплавки с подачей проволоки показан на рисунке 12.



*Рис. 12. Схема процесса лазерной наплавки с подачей проволоки [58]: 1 – защитное стекло объектива; 2 – лазерное излучение; 3 – наплавленный материал; 4 – присадочная проволока; 5 – деталь; 6 – защитный газ*

Благодаря тому, что лазерный луч фокусируется на площади небольшого размера, обычно используют проволоку—малого диаметра  $\sim 0,15\text{--}0,8$  мм [58]. Высокая плотность энергии луча позволяет свести к минимуму локальные термодформации и не требует предварительного нагрева детали [59].

По сравнению с другими методами лазерной наплавки, наплавка проволокой имеет следующие преимущества:

- 1) металлическая проволока дешевле металлических порошков [60];
- 2) при подаче проволоки расходуется меньше материала;
- 3) проволока адаптируется к положению наплавки.

Но все же порошки получили большее применение благодаря тому, что они могут варьировать состав наплавленного сплава практически неограниченно. Сферические частицы порошка размером  $\sim 20\text{--}200$  мкм больше всего подходят для лазерной наплавки

[61]. Они могут быть произведены из таких сплавов как: алюминиевые, титановые, магниевые, никелевые, медные и т. п.

После лазерной наплавки необходимо провести механическую обработку поверхности.

Одним из ключевых преимуществ лазерной наплавки по сравнению с традиционными методами дуговой наплавки (сварки) является также значительно меньшая глубина зоны смешения, что приводит к уменьшению зоны термического влияния. Высокая удельная мощность приводит к высокой скорости нагрева и охлаждения, что приводит к высокой твердости наплавленного слоя [62, 63].

### Заключение

Сегодня ЛУО является наиболее эффективным способом увеличения ресурса металлоконструкций, подверженных многоцикловой нагрузке, в том числе лопаток ГТД. В совокупности с технологиями лазерной очистки, полировки и наплавки срок эксплуатации может быть повышен. Лазерная очистка позволяет удалить загрязнение и упрощает очистку бывших в эксплуатации металлоконструкций без их повреждения. В случае повреждения детали в процессе эксплуатации с появлением забоин, до процесса ЛУО, необходимо произвести ремонт с помощью лазерной наплавки. Перспективным методом может оказаться лазерная полировка, следующая после ЛУО, которая позволит убрать пики шероховатостей (поверхностные дефекты), зародыши микротрещин и заполнить впадины. Это позволит увеличить износостойкость детали. Описанные выше лазерные технологии целесообразно использовать в комплексе с ЛУО, чтобы не только получить максимально возможный эффект упрочнения, но и увеличить прочностную надежность авиационных деталей. Совместно действующее применение технологий лазерной очистки, наплавки, ударного упрочнения и полировки, позволяет выполнять восстановительный ремонт компрессорных лопаток двигателей бывших в эксплуатации. При этом может быть получен синергетический эффект, состоящий в том, что интегральная эффективность лазерных технологий превышает сумму эффектов от каждой технологии в отдельности. В итоге та-

кого комплексно-сопряженного восстановления лопатки получают прочностные свойства, превышающие таковые для новых лопаток.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков И. А., Ножницкий Ю. А., Шибяев С. А. / *Авиационные двигатели*. 2022. Т. 2. № 15. С. 59–81.
2. Sundar R., Ganesh P., Sunil Kumar B., Gupta R. K., Nagpure D. C., Kaul R., Ranganathan K., Bindra K. S., Kain V., Oak S. M., Singh B. / *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. № 9. P. 3710–3724.
3. Wang B., Cheng Li., Li D. // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 156. P. 106668.
4. Панченко В. Я. *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
5. Григорьянц А. Г., Мисуров А. И. *Технологические процессы лазерной обработки.* – М.: МГТУ им Н. Э. Баумана, 2006.
6. Атаманюк В. М., Володин О. В., Дяченко И. В., Захаров Н. С., Коваленко А. Ф., Козлов А. В., Комаров С. А., Михайлова Т. А., Никонов А. В., Роголин В. Е., Сахаров М. В., Суханов И. П., Суханов Я. А., Федичев А. В. *Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники.* – Сергиев Посад: ЦФТИ МО РФ, 2004.
7. Bertasa M., Korenberg C. / *Journal of Cultural Heritage*. 2022. Vol. 53. P. 100–117.
8. Чулин А. В., Парфенов В. А. / *Оптический журнал*. 2007. Т. 74. № 8. С. 56–60.
9. Leiderer P., Boneberg J., Dobler V., Mosbacher M., Münzer H.-J., Chaoui N., Siegel J., Solis J., Afonso C. N., Fourrier T., Schrems G., Bäuerle D. / *Proc. of SPIE*. 2000. Vol. 4065. P. 249–259.
10. Добрынин Д. А., Алексеева М. С., Афанасьев-Ходыкин А. Н. / *Труды ВИАМ*. 2021. Т. 5. № 99. С. 3–13.
11. Планковский С. И., Цегельник Е. В., Головин И. И., Мельничук П. И. // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. Т. 10. С. 54–57.
12. Ночовная Н. А., Никитин Я. Ю. / *Труды ВИАМ*. 2017. Т. 3. № 51. С. 43–52.
13. Вейко В. П., Смирнов В. Н., Чирков А. М., Шахно Е. А. *Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении.* – СПб.: НИУ ИТМО, 2013.
14. Волков М., Кишалов А., Орлов Н., Серебряков В., Смирнов В., Филатов А. / *Фотоника*. 2014. Т. 3. № 45. С. 34–44.
15. Вейко В. П., Кишалов А. А., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н. / *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. Т. 3. № 79. С. 50–54.
16. Струсевич А. В., Вейко В. П., Супро С. В. / *Сборник трудов VIII Конгресса молодых ученых.* – Санкт-Петербург, 2019. С. 313–316.
17. <https://clean.tokagama.ru/>
18. Слипченко Н. Н., Михайленко С. А., Крымский М. И. *Устройство очистки поверхности материала от оксидной пленки. Патент на изобретение № 2112078 (РФ)*. 1998.
19. Крымский М. И., Польских С. Д., Свиридов К. Н., Поливко В. П., Нащекин С. А., Белкин Н. Д., Шамашов А. Ф., Константинов Л. В., Хачересов Г. А., Фролов Б. П., Белоус В. Н., Носков А. А., Черкашов Ю. М. *Способ очистки поверхности материалов. Патент на изобретение № 2104846 (РФ)*. 1998.
20. Юго Ж., Бурдэн Ф., Феврие Т., Жестэн Ж. *Способ очистки и зачистки лопатки газотурбинного двигателя посредством импульсного лазера. Патент на изобретение № 2604406 (РФ)*. 2016.
21. Вейко В. П., Шахно Е. А. / *Изв. РАН. Сер. Физическая*. 2001. Т. 65. № 4. С. 584–587.
22. Парфенов В. А., Геращенко А. Н., Геращенко М. Д., Григорьева И. Д. / *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2010. Т. 2. № 66. С. 11–17.
23. Zhu G., Xu Z., Jin Y., Chen X., Yang L., Xu J., Shun D., Chen Y., Guo B. / *Optics and Lasers in Engineering*. 2022. Vol. 157. P. 107–130.
24. Mosbacher M., Chaoui N., Siegel J., Dobler V., Solis J., Boneberg J., Afonso C. N., Leiderer P. / *Applied Physics A*. 1999. Vol. 69. P. 331–334.
25. Ye Y., Yuan X., Xiang X., Cheng X., Miao X. / *Optik*. 2012. Vol. 123. № 12. P. 1056–1060.
26. Kumar A., Prasad M., Bhatt R. B., Behere P. G., Afzal M., Kumar A., Nilaya J. P., Biswas D. J. / *Optics and Lasers in Engineering*. 2014. Vol. 57. P. 114–120.
27. Роголин В. Е. / *Материаловедение*. 2013. № 9. С. 34–42.
28. Аполлонов В. В., Васьяковский Ю. М., Жаворонков М. И., Прохоров А. М., Ровинский П. Е., Роголин В. Е., Устинов Н. Д., Фирсов К. Н., Ценина И. С., Ямщиков В. А. / *Квантовая Электроника*. 1985. Т. 12. № 1. С. 5–9.
29. Дробот А. Д., Ильин М. К., Нарусбек Э. А., Роголин В. Е., Филлин С. А., Ямпольский В. И. *Способ очистки оптической поверхности изделий из металлов и их сплавов. Патент на изобретение № 2049155 (РФ)*. 1995.
30. Дробот А. Д., Ильин М. К., Роголин В. Е., Филлин С. А., Ямпольский В. И. *Способ очистки поверхности изделий из металлов и их сплавов. Патент на изобретение № 2070621 (РФ)*. 1996.
31. Каплунов И. А., Роголин В. Е., Филлин С. А. / *Цветные металлы*. 2014. № 7. С. 72–75.
32. Marimuthu S., Triantaphyllou A., Antar M., Wimpenny D., Morton H., Beard M. / *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 95. P. 97–104.
33. Посмитная Я. С., Букатин А. С., Макаров Д. А., Юдин К. В., Евстратов А. А. / *Научное приборостроение*. 2017. Т. 27. № 2. С. 13–20.
34. Świkła M., Dziędzic R., Reiner J. / *Materials*. 2021. Vol. 14. № 6. P. 1479.
35. Kumstel J., Kirsch B. / *Physics procedia*. 2013. Vol. 41. P. 362–371.
36. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Роголин В. Е., Филлин С. А., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И. / *Письма в Журнал технической физики*. 2021. Т. 47. № 14. С. 18–20.

37. Kaplunov I. A., Mikolutskiy S. I., Rogalin V. E., Khomich Y. V., Zheleznov V. Y., Ivanova A. I. / Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2022. Vol. 1049. P. 11–17.
38. Lee S., Ahmadi Z., Pegues J. W., Mahjouri-Samani M., Shamsaei N. / Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 134. P. 106639.
39. Ukar E., Lamikiz A., de Lacalle L. L., Del Pozo D., Arana J. L. / International Journal of machine tools and manufacture. 2010. Vol. 50. № 1. P. 115–125.
40. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филлин С. А., Хомич Ю. В., Ямщицков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 23. № 3. С. 203–212.
41. Krishnan A., Fang F. / Frontiers of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 14. № 3. P. 299–319.
42. Shao T. M., Hua M., Tam H. Y., Cheung E. H. / Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 197. № 1. P. 77–84.
43. Temmler A., Willenborg E., Wissenbach K. / SPIE. 2012. Vol. 8243. P. 171–183.
44. Hofele M., Schanz J., Roth A., Harrison D. K., De Silva A. K. M., Riegel H. / Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2021. Vol. 52. № 4. P. 409–432.
45. Ramos J. A., Bourell D. L., Beaman J. J. / MRS Online Proceedings Library (OPL). 2002. Vol. 758. P. LL1-9.
46. Li J., Zuo D. / Optical Engineering. 2021. Vol. 60. № 2. P. 020901.
47. Малинский Т. В., Рогалин В. Е., Ямщицков В. А. / Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. № 2. С. 192–199.
48. Либенсон М. Н., Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008.
49. <https://solidiron.ru/obrabotka-metalla/polirovka/lazernaya-polirovka-metalla.html>
50. Смелов В. Г., Сотов А. В., Кяримов Р. Р., Агаповичев А. В. / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика СП Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14. № 3-2. С. 432–437.
51. Gorunov A. I. / Metallurgist. 2017. Vol. 61. № 5-6. P. 498.
52. Климов В. Г., Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю., Козтева А. В. / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2-4. С. 782–788.
53. Сотов А. В., Смелов В. Г., Носова Е. А., Косырев С. А. / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-4. С. 973–977.
54. Морозов Е. А., Долговечный А. В., Ханов А. М. / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 665–668.
55. Барзыкин Д. Р., Мамченкова А. А. Образование, наука, производство. – Белгород, 2015. С. 1609–1614.
56. Zhu L., Xue P., Lan Q., Meng G., Ren Y., Yang Z., Xu P., Liu Z. / Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 138. P. 106915.
57. <https://smithlaser.ru/>
58. <https://laser-bulat.ru/>
59. Capello E., Colombo D., Previtali B. / Journal of materials processing technology. 2005. Vol. 164. P. 990–1000.
60. Kim J. D., Peng Y. / Optics and lasers in engineering. 2000. Vol. 33. № 4. P. 299–309.
61. Каменев С. В., Искандаров В. З. / Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург, 2018. С. 703–708.
62. Birger E. M., Moskvitin G. V., Polyakov A. N., Arkhipov V. E. / Welding International. 2011. Vol. 25. № 03. P. 234–243.
63. Исаков В. В. / Сборник тезисов НТКД-2022. – Москва, 2022. С. 384–386.

PACS: 79.20.Eb, 81.65.Cf, 81.65.Ps

## Laser technologies accompanying laser impact machining of parts: cleaning, polishing, surfacing (a review)

V. Yu. Zheleznov<sup>1</sup>, T. V. Malinskiy<sup>1</sup>, V. E. Rogalin<sup>1</sup>, R. R. Khasaya<sup>1</sup>, Yu. V. Khomich<sup>1</sup>,  
V. V. Isakov<sup>2</sup>, A. L. Kozlov<sup>2</sup>, I. A. Novikov<sup>2</sup>, Yu. A. Nozhnitsky<sup>2</sup> and S. A. Shibaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Electrophysics and Electric Power RAS  
18 Dvortsovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: v-rogalin@mail.ru

<sup>2</sup> FSUE “CIAM named after P. I. Baranov”  
2 Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russia

Received 28.06.2023; revised 10.07.2023; accepted 15.07.2023

***A variety of laser technologies are actively used in metalworking. In particular, laser shock peening (LSP) is the most effective way to increase the service life of metal structures sub-***

*jected to high-cycle loading. It is used to increase the resource of expensive structural elements, for example, aircraft engine parts. It is recommended to subject parts that have passed a certain period of operation to such processing. However, in addition to LSP, it makes sense to add some related laser technologies to the technological cycle, such as cleaning, polishing and cladding. These technologies have long been used in metal processing. Used parts, first of all, need to be thoroughly cleaned before the LSP process. Laser cleaning is most effective for this. Then the part may need repairing of the nicks, for which laser cladding is very effective. After carrying out these operations, as well as LSP, polishing of the part is usually required, which is also possible using laser technologies. This article discusses the main laser methods for cleaning, cladding and polishing metal structures.*

**Keywords:** polishing, cleaning, cladding, laser, gas turbine engine blade, laser shock peening (LSP).

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-4-340-355

#### REFERENCES

1. Novikov I. A., Nozhnitsky Yu. A. and Shibaev S. A., *Aviatsionnye dvigateli* **2** (15), 59–81 (2022) [in Russian].
2. Sundar R., Ganesh P., Sunil Kumar B., Gupta R. K., Nagpure D. C., Kaul R., Ranganathan K., Bindra K. S., Kain V., Oak S. M. and Singh B., *Journal of Materials Engineering and Performance* **25** (9), 3710–3724 (2016).
3. Wang B., Cheng Li and Li D., *International Journal of Fatigue* **156**, 106668 (2022).
4. Panchenko V. Ya. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovaniy i prikladnyh razrabotok*. Moscow, FIZMATLIT, 2009 [in Russian].
5. Grigoryants A. G. and Misyurov A. I. *Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki*. Moscow, MSTU named after N. E. Bauman, 2006 [in Russian].
6. Atamanyuk V. M., Volodin O. V., Dyachenko I. V., Zakharov N. S., Kovalenko A. F., Kozlov A. V., Komarov S. A., Mikhailova T. A., Nikonov A. V., Rogalin V. E., Sakharov M. V., Sukhanov I. P., Sukhanov Ya. A. and Fedichev A. V., *Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s materialami optiko-elektronnoj tekhniki*. Sergiev Posad, CFTI MO RF, 2004 [in Russian].
7. Bertasa M. and Korenberg C., *Journal of Cultural Heritage* **53**, 100–117 (2022).
8. Chulin A. V. and Parfenov V. A., *Journal of Optical Technology* **74** (8), 56–60 (2007) [in Russian].
9. Leiderer P., Boneberg J., Dobler V., Mosbacher M., Münzer H.-J., Chaoui N., Siegel J., Solis J., Afonso C. N., Fourier T., Schrems G. and Bäuerle D., *Proc. of SPIE* **4065**, 249–259 (2000).
10. Dobrynin D. A., Alekseeva M. S. and Afanasiev-Khodykin A. N., *Trudy VIAM*. **5** (99), 3–13 (2021) [in Russian].
11. Plankovsky S. I., Tsegelnik E. V., Golovin I. I. and Melnichuk P. I., *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* **10**, 54–57 (2016) [in Russian].
12. Nochovnaya N. A. and Nikitin Ya. Yu., *Trudy VIAM* **3** (51), 43–52 (2017) [in Russian].
13. Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M. and Shakhno E. A., *Lazernaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii*. St. Petersburg, NRU ITMO, 2013 [in Russian].
14. Volkov M., Kishalov A., Orlov N., Serebryakov V., Smirnov V. and Filatov A., *Fotonika* **3** (45), 34–44 (2014) [in Russian].
15. Veiko V. P., Kishalov A. A., Mutin T. Yu. and Smirnov V. N., *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* **3** (79), 50–54 (2012) [in Russian].
16. Strusevich A. V., Veiko V. P. and Sirro S. V. *Sbornik trudov VIII Kongressa molodyh uchenyh*. St. Petersburg, 2019. pp. 313–316 [in Russian].
17. <https://clean.tokagama.ru/>
18. Slipchenko N. N., Mikhajlenko S. A., Krymskij M. I. Device for removal of oxide film from material surface. Patent for invention № 2112078 (RF). 1998.
19. Krymskij M. I., Pol'skikh S. D., Sviridov K. N., Polivko V. P., Nashchekin S. A., Belkin N. D., Shamashov A. F., Konstantinov L. V., Khachersov G. A., Frolov B. P., Belous V. N., Noskov A. A. and Cherkashov Ju. M. Material surface cleaning method. Patent for invention № 2104846 (RF). 1998.
20. Jugo Z. H., Burden F., Fevrie T. and Zhesten Z. H. Method of cleaning and fining gas turbine engine blade by pulse laser. Patent for invention № 2604406 (RF). 2016.
21. Veiko V. P. and Shakhno E. A., *Izv. RAN. Ser. fizicheskaya* **65** (4), 584–587 (2001) [in Russian].
22. Parfenov V. A., Gerashchenko A. N., Gerashchenko M. D. and Grigor'eva I. D., *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* **2** (66), 11–17 (2010) [in Russian].
23. Zhu G., Xu Z., Jin Y., Chen X., Yang L., Xu J., Shun D., Chen Y. and Guo B., *Optics and Lasers in Engineering* **157**, 107–130 (2022).
24. Mosbacher M., Chaoui N., Siegel J., Dobler V., Solis J., Boneberg J., Afonso C. N. and Leiderer P., *Applied Physics A* **69**, 331–334 (1999).

25. Ye Y., Yuan X., Xiang X., Cheng X. and Miao X., *Optik* **123** (12), 1056–1060 (2012).
26. Kumar A., Prasad M., Bhatt R. B., Behere P. G., Afzal M., Kumar A., Nilaya J. P. and Biswas D. J., *Optics and Lasers in Engineering* **57**, 114–120 (2014).
27. Rogalin V. E., *Materialovedenie* **9**, 34–42 (2013) [in Russian].
28. Apollonov V. V., Vaskovskii Yu. M., Zhavoronkov M. I., Prokhorov A. M., Rovinskii R. E., Rogalin V. E., Ustinov N. D., Firsov K. N., Tsenina I. S. and Yamschikov V. A., *Soviet Journal of Quantum Electronics* **15** (1), 1–3 (1985).
29. Drobot A. D., Il'in M. K., Rogalin V. E., Filin S. A., Jampol'skij V. I. and Narusbek Eh. A. Method for cleaning the optical surface of products from metals and alloys. Patent for invention № 2049155 (RF). 1995.
30. Drobot A. D., Il'in M. K., Rogalin V. E., Filin S. A. and Jampol'skij V. I. Process of purifying surface of objects of metals and their alloys. Patent for invention № 2070621 (RF). 1996.
31. Kaplunov I. A., Rogalin V. E. and Filin S. A., *Cvetnye metally*, № 7, 72–75 (2014) [in Russian].
32. Marimuthu S., Triantaphyllou A., Antar M., Wimpenny D., Morton H. and Beard M., *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **95**, 97–104 (2015).
33. Posmitnaya Ya. S., Bukatin A. S., Makarov D. A., Yudin K. V. and Evstrapov A. A., *Nauchnoe priborostroenie* **27** (2), 13–20 (2017) [in Russian].
34. Ćwikła M., Dziedzic R. and Reiner J., *Materials* **14** (6), 1479 (2021).
35. Kumstel J. and Kirsch B., *Physics procedia* **41**, 362–371 (2013).
36. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Mikolutsky S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Khomich Yu. V., Yamschikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *Technical Physics Letters* **47** (10), 734–736 (2021).
37. Kaplunov I. A., Mikolutskiy S. I., Rogalin V. E., Khomich Y. V., Zheleznov V. Y. and Ivanova A. I., *Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd* **1049**, 11–17 (2022).
38. Lee S., Ahmadi Z., Pegues J. W., Mahjouri-Samani M. and Shamsaei N., *Optics & Laser Technology* **134**, 106639 (2021).
39. Ukar E., Lamikiz A., de Lacalle L. L., Del Pozo D., and Arana J. L., *International Journal of machine tools and manufacture* **50** (1), 115–125 (2010).
40. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Mikolutsky S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Khomich Yu. V., Yamschikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *Russian Microelectronics* **50**, 649–656 (2021).
41. Krishnan A. and Fang F., *Frontiers of Mechanical Engineering* **14** (3), 299–319 (2019).
42. Shao T. M., Hua M., Tam H. Y. and Cheung E. H., *Surface and Coatings Technology* **197** (1), 77–84 (2005).
43. Temmler A., Willenborg E. and Wissenbach K., *SPIE* **8243**, 171–183 (2012).
44. Hofele M., Schanz J., Roth A., Harrison D. K., De Silva A. K. M. and Riegel H., *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **52** (4), 409–432 (2021).
45. Ramos J. A., Bourell D. L. and Beaman J. J., *MRS Online Proceedings Library (OPL)* **758**, LL1-9 (2002).
46. Li J. and Zuo D., *Optical Engineering* **60** (2), 020901 (2021).
47. Malinskii T. V., Rogalin V. E. and Yamshchikov V. A., *The Physics of Metals and Metallography* **123** (2), 178–185 (2022).
48. Libenson M. N., Yakovlev E. B. and Shandybina G. D., *Interaction of laser radiation with matter (power optics)*. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO, 2008 [in Russian].
49. <https://solidiron.ru/obrabotka-metalla/polishing/lazernaya-polishing-metalla.html>
50. Smelov V. G., Sotov A. V., Kyarimov R. R. and Agapovichev A. V., *Vestn. Academician SP Korolev (National Research University)* **14** (3-2), 432–437 (2015) [in Russian].
51. Gorunov A. I., *Metallurgist* **61** (5-6), 498 (2017) [in Russian].
52. Klimov V. G., Zhatkin S. S., Shchedrin E. Yu. and Kogteva A. V., *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta im. akademika SP Korolyova (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* **17** (2-4), 782–788 (2015) [in Russian].
53. Sotov A. V., Smelov V. G., Nosova E. A. and Kosyrev S. A., *Izv. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* **15** (6-4), 973–977 (2013) [in Russian].
54. Morozov E. A., Dolgovechny A. V. and Khanov A. M., *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* **14** (1-2), 665–668 (2012) [in Russian].
55. Barzykin D. R. and Mamchenkova A. A. *Obrazovanie, nauka, proizvodstvo*. Belgorod, 2015. pp. 1609–1614 [in Russian].
56. Zhu L., Xue P., Lan Q., Meng G., Ren Y., Yang Z., Xu P. and Liu Z., *Optics & Laser Technology* **138**, 106915 (2021).
57. <https://smithlaser.ru/>
58. <https://laser-bulat.ru/>
59. Capello E., Colombo D. and Previtali B., *Journal of materials processing technology* **164**, 990–1000 (2005).
60. Kim J. D. and Peng Y., *Optics and lasers in engineering* **33** (4), 299–309 (2000).
61. Kamenev S. V. and Iskandarov V. Z., *Universitetskij kompleks kak regional'nyj tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferentsii*. Orenburg, 2018. pp. 703–708 [in Russian].
62. Birger E. M., Moskvitin G. V., Polyakov A. N. and Arkhipov V. E., *Welding International* **25** (03), 234–243 (2011).
63. Isakov V. V., *Sbornik tezisev NTKD-2022*. Moscow, 2022. pp. 384–386 [in Russian].