

A. V. Grabovskiy, G. A. Petrov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

MULTI-CHANNEL EDDY CURRENT SCANNERS

Presents the problems of nondestructive testing of steel products against the background of increasing production. Provides an overview of modern means of eddy current testing. Describes domestic development, which allows to significantly increase performance of eddy current testing. Presents the examples of usage of this development in the industries.

Eddy current testing, nondestructive testing, multi-channel scanners

УДК 681.7.069.24:620.193.82:069.44

А. Н. Геращенко
Тель-Авивский университет (г. Тель-Авив, Израиль)

И. Ю. Кирцидели
Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН

В. А. Парфенов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (лазерная очистка мрамора и известняка от микроскопических грибов: практические аспекты)¹

Приводятся результаты экспериментальных исследований по разработке лазерной технологии удаления микроскопических грибов с каменных поверхностей. В работе использовался импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1.064 мкм и модельные образцы камня из мрамора и известняка. Цель работы состояла в оптимизации выходных параметров лазеров для определения доз облучения, при которых происходит механическое удаление и инактивация этих микроорганизмов.

Биологические поражения памятников, микроскопические грибы, микромицеты, лазерная очистка, реставрация

Одной из главных причин разрушения памятников истории и культуры из камня является появление на их поверхности биологических загрязнений. Лазерная очистка может рассматриваться как перспективный метод борьбы с микроорганизмами-биодеструкторами [лит.].

В модельных экспериментах споры микроскопических грибов обрабатывались при помощи импульсного Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм. Была показана возможность полного удаления микромицетов под действием лазерного излучения [лит.]. При этом даже в тех случаях, когда споры грибов оставались внешне неповре-

жденными, было выявлено значительное подавление их жизнеспособности. Таким образом, метод лазерной обработки помимо задачи очистки поверхности памятников позволяет решить также задачу инактивации микроорганизмов.

Как продолжение обсуждения проведенных авторами исследований, в данной статье рассматривается возможность использования лазера для удаления микромицетов в реальных условиях, т. е. с поверхности мрамора и известняка. Был изменен не только тип подложки, но изучалось влияние лазерного излучения как на споры, так и на мицелий грибов. Результаты этих исследований приведены далее.

¹ Продолжение. Начало в № 6 за 2016 г.

Подготовка модельных образцов мрамора и известняка. Эксперименты по обработке микромицетов на каменной поверхности проводились на образцах белого мелкозернистого мрамора и известняка, являющихся наиболее распространенными материалами скульптурных памятников Санкт-Петербурга. В качестве биодеструкторов были выбраны микромицеты видов *Aspergillus flavus*, *Chaetomium globosum*, *Ulocladium consortiale* – микроскопические грибы, часто встречающиеся в умеренном климате и отличающиеся друг от друга по морфологическим признакам (наличие пигмента, размер спор и др.).

Культуры микромицетов выращивались на стандартных агаризированных питательных средах в течение 7...10 дней. Затем с поверхности культуры делался смыв стерильной дистиллированной водой для получения первичной суспензии пропагул микроскопических грибов. В дальнейшем проводилось отделение участков мицелия и получения однородной суспензии.

Полученную суспензию спор наносили на поверхности образцов в количестве 0.2 мл на 4 см².

Далее образцы делились на две группы и обрабатывались, соответственно, следующим образом:

1) высушивались при температуре 35 °С в течение 5 ч, что не вызывало гибели спор, но препятствовало их прорастанию, и затем подвергались лазерной обработке;

2) помещались во влажную камеру при температуре 25 °С на 3...4 суток для проращивания спор и образования поверхностного мицелия, после чего подвергались лазерной обработке.

Таким образом, первая группа представляла собой образцы со спорами грибов на поверхности, а вторая – с мицелием грибов.

Для оценки результатов лазерной обработки исследуемых образцов применялся метод смыва спор и мицелия с поверхности субстрата на пита-

тельные среды и их культивирование в чашках Петри в термостате в течение 5...10 дней при температуре 25 °С. После этого проводился подсчет числа выросших колоний.

Результаты экспериментов по лазерному удалению микромицетов. Образцы мрамора и известняка с микроскопическими грибами подвергались лазерной обработке. Сканирование пучком излучения по поверхности образца осуществлялось вручную посредством перемещения фокусатора, закрепленного на конце оптоволоконного кабеля. После лазерной обработки каждый образец помещался в стерильный контейнер для последующего контроля результатов воздействия лазера на микромицеты.

В экспериментах были использованы следующие рабочие параметры лазерного излучения: длина волны 1.064 мкм, энергия импульса 0.2...0.6 Дж, частота повторения импульсов 5 Гц, диаметр пучка 2 мм, время облучения одного образца (размером 2 × 2 см²) – 60 с. В табл. 1 приведены рабочие параметры лазерного излучения в экспериментах по удалению микроскопических грибов с образцов мрамора: F – плотность энергии его излучения, $E_{\text{общ}}$ – общее количество энергии (доза облучения), $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность и $q_{\text{ср}}$ – средняя плотность мощности.

Плотность энергии лазерного излучения вычислялась по формуле

$$F = E_{\text{имп}} / S_{\text{п}} = E_{\text{имп}} / (\pi r^2),$$

где $E_{\text{имп}}$ – энергия лазерного импульса; $S_{\text{п}}$ – площадь пятна облучения; r – радиус лазерного пучка. Общая доза облучения вычислялась по формуле

$$E_{\text{общ}} = nE_{\text{имп}} = t f_{\text{имп}},$$

где n – количество импульсов за время облучения образца t ; f – частота повторения импульсов, Гц.

Для вычисления средней мощности ($P_{\text{ср}}$) и средней плотности мощности ($q_{\text{ср}}$) использовались следующие расчетные соотношения:

Таблица 1

$E_{\text{имп}}$, Дж	τ , мкс	F , Дж/см ²	$E_{\text{общ}}$, Дж	$P_{\text{ср}}$, Вт	$q_{\text{ср}}$, Вт/м ²
0.2	32	6.4	60	1.0	2500
0.3	37	9.5	90	1.5	3750
0.4	39	13.0	120	2.0	5000
0.5	43	16.0	150	2.5	6250
0.6	43	19.0	180	3.0	7500

Таблица 2

Средняя плотность мощности, Вт/м ²	Плотность энергии, Дж/см ²	<i>Chaetomium</i>		<i>Ulocladium</i>		<i>Aspergillus</i>	
		Споры	Мицелий	Споры	Мицелий	Споры	Мицелий
2500	6.4	43.3	45.1	57.3	67.9	63.3	74.9
3750	9.5	28.7	26.0	28.9	26.7	27.0	39.3
5000	13.0	16.7	22.2	10.7	17.0	11.9	8.0
6250	16.0	11.2	5.2	8.4	8.0	7.3	3.8
7500	19.0	0.2	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0

$$P_{\text{ср}} = E_{\text{имп}} f,$$

$$q_{\text{ср}} = P_{\text{ср}} / S_{\text{обр}},$$

где $S_{\text{обр}}$ – площадь образца.

В табл. 2 представлены усредненные результаты, полученные в трех сериях экспериментов по лазерному облучению микромицетов. Количество жизнеспособных спор, оставшихся на поверхности образца после лазерной обработки, определялось стандартными микологическими методами. Графики, иллюстрирующие полученные результаты, представлены на рис. 1 (количество спор микромицетов) и 2 (количество пропагул мицелия микромицетов).

Данные табл. 2 (количество оставшихся на поверхности образца мрамора пропагул микроскопических грибов в зависимости от энергетических параметров излучения и вида микромицета; данные приведены в процентах от количества микромицетов на контрольном образце) иллюстрируют зависимость эффективности удаления микромицетов от значения плотности энергии лазерного излучения. Несмотря на некоторые различия в особенностях воздействия лазерного излучения на разные виды микроскопических грибов, можно сделать вывод, что при очистке мрамора большая часть (80–90 %) пропагул (т. е. спор и участков мицелия) микромицетов удаляется при значениях плотности энергии лазерного излучения 13...16 Дж/см². При значении плотности энергии 19 Дж/см² происходит уничтожение практически всех (99–100 %) пропагул.

Эксперименты с образцами известняка проводились аналогичным образом. Однако для эффективного удаления микроскопических грибов в этом случае требовались более высокие значения плотности энергии лазерного излучения. Рабочие параметры лазерного излучения в экспериментах по удалению микроскопических грибов с образцов известняка представлены в табл. 3. Частота повторения импульсов составляла 10 Гц, диаметр



Рис. 1
□ – *Ulocladium*; ◇ – *Aspergillus*; ▲ – *Chaetomium*



Рис. 2
□ – *Ulocladium*; ◇ – *Aspergillus*; ▲ – *Chaetomium*

пучка 2 мм, время облучения одного образца (размером 2 × 2 см²) – 90 с.

Усредненные результаты, полученные в трех сериях экспериментов, представлены в табл. 4, где отражено количество оставшихся на поверхности образца известняка пропагул микроскопических

Таблица 3

$E_{имп}, Дж$	$\tau, мкс$	$F, Дж/см^2$	$E_{общ}, Дж$	$P_{ср}, Вт$	$q_{ср}, Вт/м^2$
0.8	55	25.0	720	8.0	20 000
0.9	59	29.0	810	9.0	22 500
1.0	66	32.0	900	10.0	25 000
1.1	78	35.0	990	11.0	27 500
1.2	83	38.0	1080	12.0	30 000

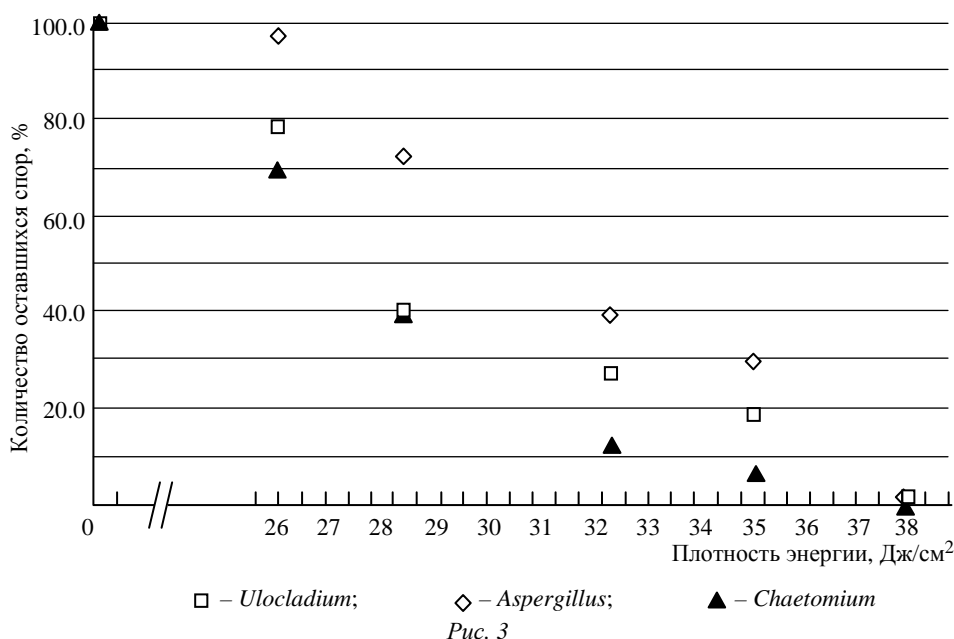
Таблица 4

Средняя плотность мощности, Вт/м ²	Плотность энергии, Дж/см ²	<i>Chaetomium</i>		<i>Ulocladium</i>		<i>Aspergillus</i>	
		Споры	Мицелий	Споры	Мицелий	Споры	Мицелий
20 000	25.0	70.6	78.3	78.4	86.3	97.9	82.0
22 500	29.0	39.6	33.3	40.0	49.1	72.3	64.6
25 000	32.0	13.0	20.8	27.3	26.4	39.6	39.5
27 500	35.0	6.3	8.9	18.4	15.4	29.8	21.2
30 000	38.0	0.0	1.0	1.4	0.0	1.8	0.0

грибов в зависимости от энергетических параметров и вида микромицета (в процентах от контрольного образца). Количество жизнеспособных спор, оставшихся на поверхности образца после лазерной обработки, также определялось микологическими методами. Графики эффективности удаления спор и мицелия с образцов известняка представлены на рис. 3 (количество спор микромицетов) и рис. 4 (количество пропагул мицелия микромицетов).

Полученные результаты продемонстрировали высокую эффективность удаления микроскопических грибов с поверхности известняка. При значении плотности энергии 38 Дж/см² происходит полное уничтожение ($\geq 98\%$) спор и мицелия микромицетов.

Заметим, что в ходе экспериментов по лазерной обработке мрамора и известняка отдельно проверялось влияние лазерного излучения на состояние их поверхности. Для этого проводился контроль микрорельефа поверхности до и после облучения лазером с помощью методов оптической и сканирующей электронной микроскопии. Примеры полученных изображений представлены на рис. 5 (а – поверхность известняка со спорами и мицелием грибов до лазерной очистки; б – чистая поверхность без повреждений после лазерной обработки) и рис. 6 (СЭМ-изображения поверхности мрамора до (а) и после (б) лазерной очистки: микроорганизмы отсутствуют, микрорельеф



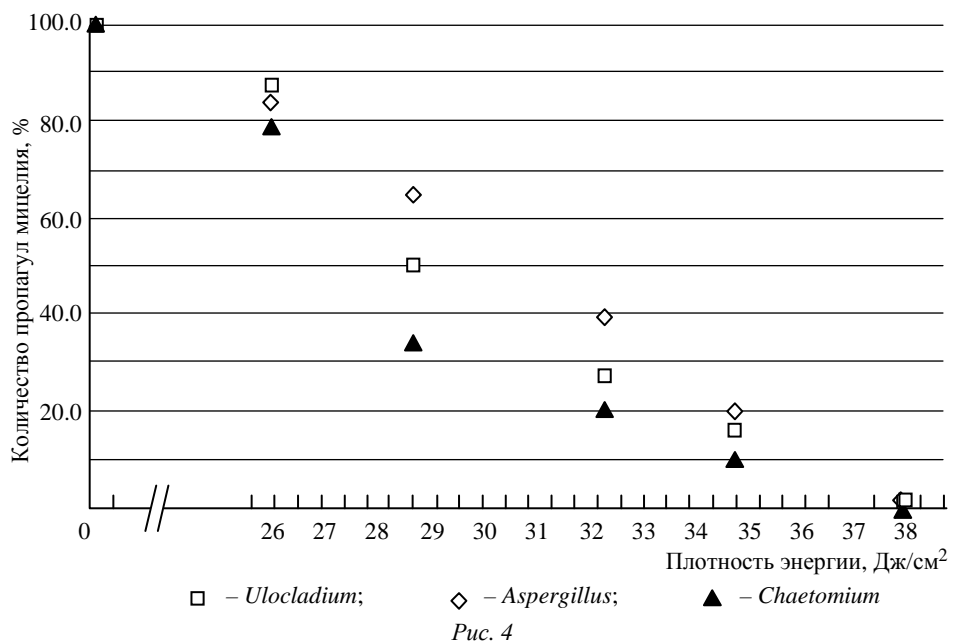
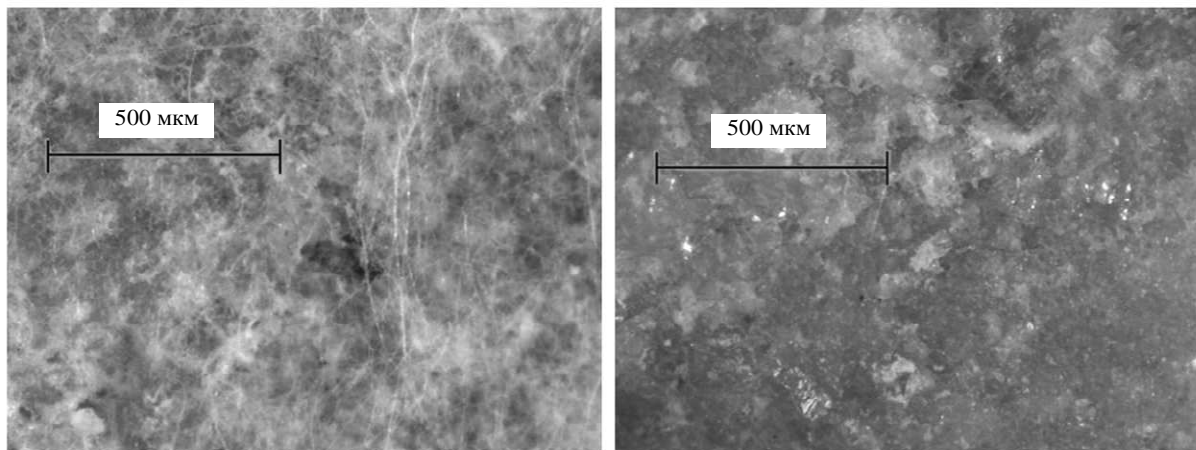


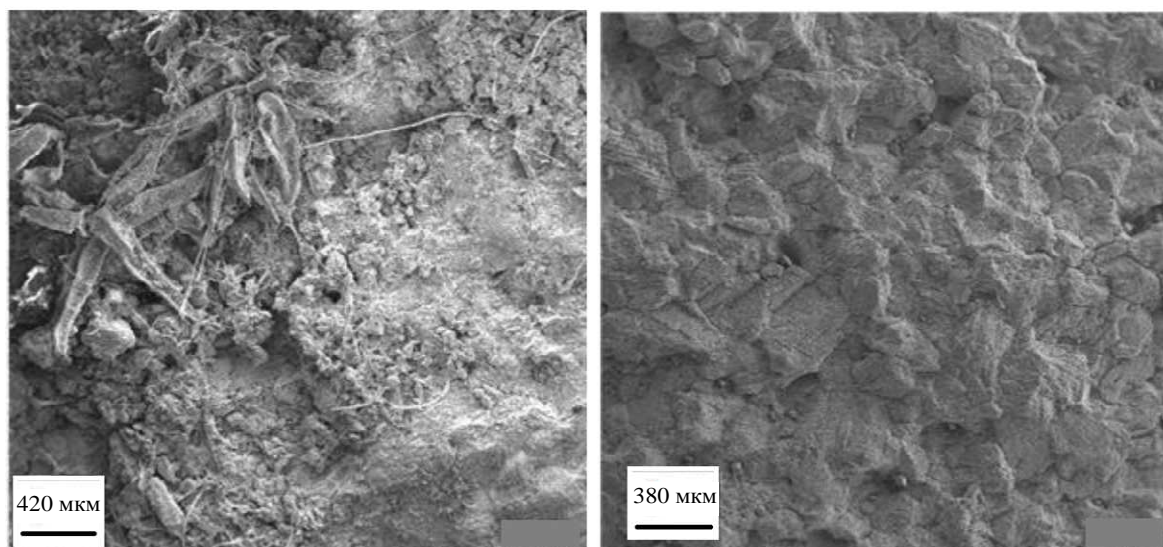
Рис. 4



а

б

Рис. 5



а

б

Рис. 6

поверхности не изменился). Как видно из рисунков, лазерная обработка не повлияла на состояние сохранности камня, что подтверждает безопасность очистки поверхности карбонатных горных пород излучением импульсного Nd:YAG-лазера с использованными в экспериментах параметрами.

Проведенные исследования показали, что лазерная обработка позволяет эффективно защищать памятники от колоний микроскопических грибов либо посредством полного удаления, либо в результате значительной инактивации этих микроорганизмов. Эффективное удаление (или полная инактивация) микромицетов-биодеструкторов происходит при использовании следующих параметров лазерного излучения: длина волны – 1.064 мкм, плотность энергии импульса – в диапазоне 20...40 Дж/см² при длительности импульсов 30...90 мкс и частоте их повторения 5...10 Гц (в зависимости от материала и вида микроорганизмов).

Заметим, что показанная в работе возможность инактивации микромицетов чрезвычайно важна с практической точки зрения, так как это означает снижение риска последующего роста колоний и повреждения памятника после завершения реставрационных работ. В настоящее время решение о прекращении очистки в реставрации принимается на основе заключения опытных экспертов, причем очень часто без использования каких-либо приборных методов контроля. Традиционно считается, что при реставрации памятника лучше оставить некоторый слой загрязнений на поверхности, чем повредить оригинальную автор-

скую патину. В случае биологических поражений это может означать, что после прекращения очистки на поверхности вместе с другими видами загрязнений останется некоторая часть микроорганизмов. Если они не утратили свою жизнеспособность, то при благоприятных для их существования условиях это может привести к повторному биологическому поражению памятника. Однако, как было показано в [лит.], лазерная обработка существенно снижает жизнеспособность микромицетов, а следовательно, исключает такую возможность. Этот результат говорит об уникальном преимуществе метода лазерной очистки перед химическими или механическими методами.

Контроль образцов мрамора и известняка, проведенный с использованием методов оптической и сканирующей электронной микроскопии до и после лазерной обработки с целью удаления микромицетов, показал сохранность микро рельефа их поверхности. Это свидетельствует о безопасности лазерной очистки для состояния сохранности поверхности каменных памятников и является еще одним аргументом в пользу ее применения в реставрации для борьбы с биопоражениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Герашенко А. Н., Кирцидели И. Ю., Парфенов В. А. Удаление биологических загрязнений с поверхности памятников из камня при помощи лазерной обработки (экспериментальные основы лазерного удаления биопоражений) // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 6. С. 79–86.

A. N. Gerashchenko
Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)

V. A. Parfenov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

I. Yu. Kirtsideli
Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences

REMOVAL OF BIODETERIORATION FROM SURFACE OF STONE MONUMENTS BY MEANS OF LASER TREATMENT (EXPERIMENTAL BASE OF LASER REMOVAL OF BIOLOGICAL GROWTH)

Results of experimental studies on development of laser technology for removal of microfungi from stone surfaces are presented. In the work pulsed solid-state Nd:YAG laser with wavelength of 1064 nm and model samples from marble and sandstone were used. The task of the work was the optimization of laser output parameters for achievement of exposure doses requiring for mechanical ejection and inactivation of these microorganisms.

Biological destruction of monuments, microscopic fungi, micromycetes, laser cleaning, restoration