

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 9 (63)

2016

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г.

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)

д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)

д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)

чл.-кор. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк, Украина)

д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)

д.т.н., проф. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)

д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)

д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Редактор

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении индекс по каталогу «Роспечать» 79195.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология имплантирования материалов на основе карбида вольфрама с целью повышения износостойкости поверхностей трения 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Братан С.М., Владецкая Е.А. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка 10

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Григорьянц А.Г., Фунтиков В.А., Савкин А.Н., Третьяков Р.С. Разработка оптической системы волоконного лазера для процесса лазерной полировки деталей. 16

Васильцов В.В., Егоров Э.Н., Ильичев И.Н., Соловьев А.В., Богданов А.В., Мисюров А.И., Смирнова Н.А. Аддитивные лазерные технологии спекания металлических порошков для получения изделий авиационной и космической промышленности 24

Богданов А.В., Грезев Н.В., Шмелев С.А., Мурзаков М.А., Маркушов Ю.В. Упрочнение колесной стали волоконными лазерами 30

Малов И.Е. Исследование процессов окислительной полимеризации при высоких скоростях инициирования в технологии лазерной стереолитографии 37

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Лебедев В.А., Голобородько Ж.Г., Драган С.В., Симугенков И.В., Ярос Ю.А. Усовершенствование технологии автоматической наплавки под флюсом при ремонте судовых гребных валов 42

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Научноёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 9 (63)

2016

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s. SUSLOV A.G.

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M.

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G.

Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BELOV V.D. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

m.-corr. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm')

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)

d.en.s., prof. OLEJNIK A.V. (Moscow)

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

d.en.s., prof. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. HEJFETS M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

Editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195).

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39

E-mail: naukadm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate

ПИ № ФС77-66087 от 10.07.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Gorlenko A.O., Davydov S.V. Material implantation techniques based on tungsten carbide to increase friction surface durability 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Bratan S.M., Vladetskaya E.A. Investigation of vibroisolating device reliability in grinding machine 10

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

Grigoriyants A.G., Funtikov V.A., Savkin A.N., Tretiakov R.S. Development of fiber laser optic system for laser polishing of parts 16

Vasiltsov V.V., Yegorov E.N., Ilchyov I.N., Soloviyov A.V., Bogdanov A.V., Misuyurov A.I., Smirnova N.A. Additive laser techniques of metal powder fritting to manufacture products of aerospace industry 24

Bogdanov A.V., Grezev N.V., Shmelyov S.A., Murzakov M.A., Markushov Yu.V. Wheel steel strengthening with fiber lasers 30

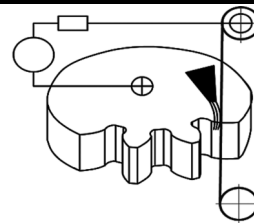
Malov I.E. Investigation of oxidizing polymerization processes at high velocities of initiation in technique of laser stereolithography 37

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY

Lebedev V.A., Goloborodko Zh.G., Dragan S.V., Simutenkov I.V., Yaros Yu.A. Improvement of automatic surfacing technique under flux at ship propeller shaft repair 42

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for academic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines.

Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»



УДК 621.001.4
DOI: 10.12737/21233

А.О. Горленко, д.т.н.,
С.В. Давыдов, д.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7),
E-mail: bugi12@bk.ru

Технология имплантирования материалов на основе карбида вольфрама с целью повышения износостойкости поверхностей трения

Исследовано влияние имплантированных карбидов вольфрама на формирование в поверхностях трения износостойких структур, образующихся в процессе реализации технологии комбинированной электрохимической обработки. Показано, что при термосиловом воздействии в зоне деформации протекает интенсивная аустенизация стали с растворением порошка карбида вольфрама и последующим образованием композиционных наноструктур в результате распада пересыщенного вольфрамом переохлажденного аустенита. Приведены результаты триботехнических испытаний цилиндрических образцов нормализованным методом.

Ключевые слова: поверхностный слой; износостойкость; электрохимическая обработка; упрочнение; микроструктура; карбид вольфрама; переохлажденный аустенит; пересыщенный твердый раствор; триботехнические испытания.

A.O. Gorlenko, D.Eng.,
S.V. Davydov, D.Eng.
(Bryansk State Technical University,
7, 50 Years of October, Bryansk 241035),

Material implantation techniques based on tungsten carbide to increase friction surface durability

The modification of steel friction surface at the expense of the formation on it a surface layer implanted and compound strengthened with tungsten carbides together with the formation of a sub-layer consisting of cellular super-cooled austenite stabilized by tungsten and reinforced with tungsten carbide grid consisting of packaged nano-sized particles is considered. The influence of implanted tungsten carbides upon the formation in friction surfaces of wear-resistant structures formed during the realization of combined electro-mechanical working techniques is investigated. It is shown that at a thermo-power effect in the area of deformation takes place an intensive austenitizing of steel with the dilution of a tungsten carbide powder and further formation of composite nano-structures as a result of the dissociation of super-cooled austenite oversaturated with tungsten. There are shown results of tribotechnical tests of cylindrical samples by a normalized method.

Keywords: surface layer; wear-resistance; electro-mechanical working; strengthening; micro-structure; tungsten carbide; super-cooled austenite; over-saturated solid solution; tribotechnical tests.

Очень важными с практической точки зрения являются соединения вольфрама с углеродом – карбиды вольфрама W_2C и WC . Данные карбиды обладают высокой твердостью, износостойкостью и тугоплавкостью, что является исключительным сочетанием свойств

для создания износостойких и жаропрочных сплавов.

Вольфрам образует в стали карбид W_6Cr , который при аустенизации частично переходит в твердый раствор, обеспечивая получение после закалки легированного вольфра-

мом мартенсита, что затрудняет распад мартенсита при нагреве, обеспечивая необходимую красностойкость стали. Нерастворенная часть карбида W_6Cr приводит к повышению износостойкости стали.

На основе карбида вольфрама (WC , W_2C), созданы самые эффективные инструментальные твердые сплавы, содержащие 85...95 % WC и 5...14 % Co . Жаропрочные и износостойкие сплавы-стеллиты (3...5 % W , 25...35 % Cr , 45...65 % Co) с помощью наплавки наносятся на поверхности значительно изнашивающихся деталей машин.

Однако до настоящего времени не находят применение технологии создания износостойких поверхностных слоев деталей машин, композиционно упрочненных карбидами вольфрама, работающих в различных условиях трения.

С учетом опыта, полученного при имплантации наноалмазов детонационного синтеза, для создания износостойких поверхностных слоев на поверхностях трения деталей машин разработана технология комбинированной электромеханической обработки (далее – ИКЭМО), включающая формирование слоев, имплантированных карбидами вольфрама, с последующим электромеханическим упрочнением обрабатываемой поверхности.

Эффект упрочнения при электромеханической обработке (ЭМО) достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [1, 2, 3].

Технология реализуется на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий: из универсального токарного станка; силового блока для преобразования промышленного электрического тока; блока управления режимами обработки; средств коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды; блока сопряжения с ПЭВМ.

Имплантирование карбидов вольфрама в поверхностный слой при электромеханической обработке производится на определенных режимах. На поверхность перед обработкой они наносятся обмазкой, предварительно размешанные с консистентным графитным смазочным материалом в определенной пропорции (для лучшей токопроводимости). Частицы карбида вольфрама внедряются в формируемый поверхностный слой, армируя его. Затем на этой же поверхности проводится электромеханическая обработка на упрочняющих режимах [1, 2, 3].

В процессе высокотемпературного пластического деформирования, под воздействием высоких температур и давлений происходит аустенизация поверхностного слоя стали в зоне контакта. Углерод из обмазки, состоящей из графита и карбидов вольфрама, в твердофазном процессе насыщения диффундирует в поверхностные слои, повышая содержание углерода в аустените.

При проведении исследований поверхности трения цилиндрических образцов обрабатывались порошком карбида вольфрама (табл. 1, 2), полученным на заводе тугоплавких металлов ЗАО «Компания «ВОЛЬФРАМ» (г. Унеча, Брянская область), по спецификации немецкой фирмы Element Six GmbH.

1. Марка порошка карбида вольфрама, размер частиц, содержание кислорода и углерода

Марка порошка карбида вольфрама	Средний размер частиц по Фишеру, мкм	Содержание кислорода, %, max	Углерод общий (типичное содержание), %	Углерод общий (минимальное содержание), %	Углерод свободный, %
WC1,0	0,8...1,3	0,20	6,13...6,18	6,08	0,06
WC1,5	1,3...1,8	0,20	6,13...6,18	6,08	0,06
WC2	1,8...2,5	0,10	6,13...6,18	6,08	0,05

2. Химический состав порошка карбида вольфрама

	Химический состав, %											
	Al	As	Ca	Cr	Na	Ni	Mo	P	S	Si	Fe	K
max	20	20	20	80	20	80	70	20	20	20	100	20
min	10	10	10	40	10	40	40	10	10	10	40	10

Порошок карбида вольфрама наносится на поверхность цилиндрических образцов, изготовленных из стали 45. В результате обработки на поверхности формируется многослойная структура, состоящая из упрочненного слоя толщиной 180...220 мкм (рис. 1, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной 200...250 мкм (рис. 1, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной 20...40 мкм (рис. 1, слой 3) и матрицы, состоящей из нормализованной стали 45.

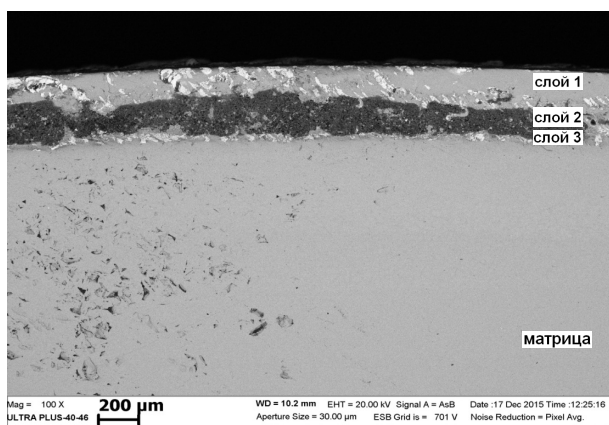


Рис. 1. Структура поверхности стального образца, упрочненного карбидом вольфрама

Микроструктурные исследования проводились на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55, Германия (Zeiss Ultra plus Field Emission Scanning Electron Microscope).

На рис. 2 показана микроструктура слоев 1 и 2, в табл. 3 представлен фазовый химический состав. Слой 1 представляет собой смесь частиц карбида вольфрама WC в стальной основе. Следовательно, в процессе имплантации происходит пластическое перемешивание карбида вольфрама в объеме стали в твердофазном состоянии.

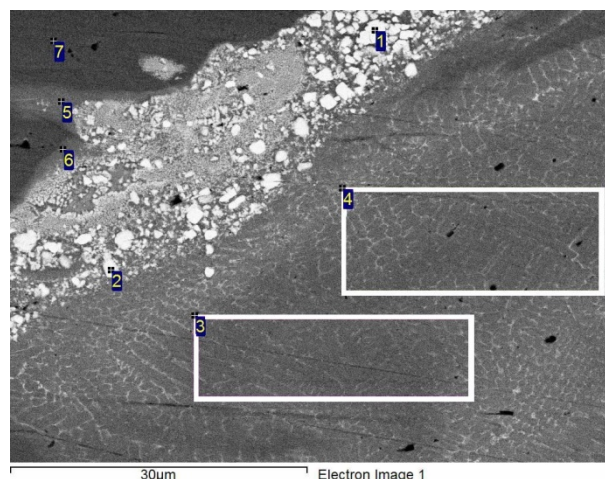


Рис. 2. Микроструктура слоя 1 (частицы карбида вольфрама) и слоя 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен)

3. Фазовый химический состав структур слоев 1 и 2, % (рис. 3)

Точки	C	Al	Fe	Co	Cu	W	Всего
1	16,8	–	4,0	–	–	79,2	100,0
2	7,6	–	6,4	14,7	–	71,3	
3	3,3	–	84,2	–	2,9	9,6	
4	3,6	–	83,6	–	2,7	10,1	
5	15,1	0,6	71,5	–	4,0	8,8	
6	11,8	0,7	76,9	–	2,1	8,5	
7	11,3	0,6	88,1	–	–	–	
max	16,8	0,7	88,1	14,7	4,0	79,2	–
min	3,3	0,6	4,0	14,7	2,1	8,5	–

Слой 2 (рис. 2 и 3) представляет собой слабонасыщенный вольфрамом феррит, по границам зерен которого выделяется сетка карбида вольфрама. Следовательно, в процессе имплантации, в слое 2 выделяется максимальное количество энергии, которое переводит систему в метастабильное состояние с последующим образованием ячеистой структуры (см. рис. 3).

В соответствии с известной диаграммой

Fe–W, температура слоя 2 превышает температуру 1060 °С, соответствующую перитектоидной реакции. В этих температурных условиях протекает полиморфное превращение железа с образованием аустенита и растворением карбида вольфрама в аустените.

Например, в аустените стали Р6М5 при оптимальной температуре нагрева при закалке 1200...1230 °С растворяется около 8 % W. В стали Р18 в аустените растворяется также

около 8 % W, но при температуре 1270...1290 °С. Следовательно, максимальной границей нагрева стали при термосиловом воздействии при имплантировании можно считать границу до 1300 °С.

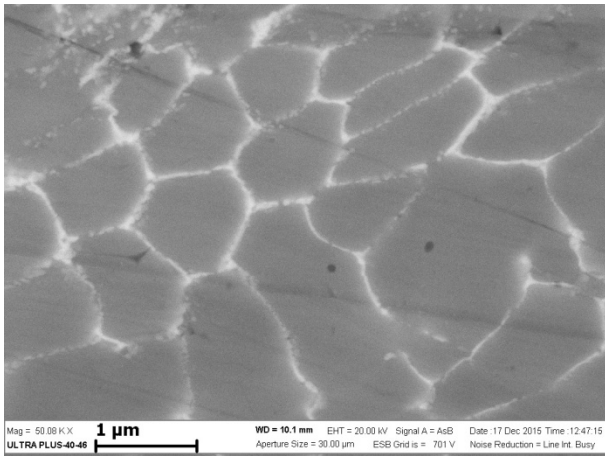


Рис. 3. Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен)

При охлаждении раствор аустенита пересыщается вольфрамом и стабилизируется. При дальнейшем охлаждении формируется структура стабилизированного переохлажденного аустенита, а избыток вольфрама выделяется в виде сетки карбида вольфрама по границам аустенитных зерен, слаболегированных вольфрамом. В данном случае полученная структура идентична структуре литой быстро-

режущей стали, соответствующей сложной карбидной эвтектике, напоминающей ледебурит и располагающейся по границам зерен.

Аналогичная структура наблюдается (рис. 4) при переходе слоя 2 в слой 3, который намного тоньше слоя 1, но также насыщен частицами карбида вольфрама (табл. 4).

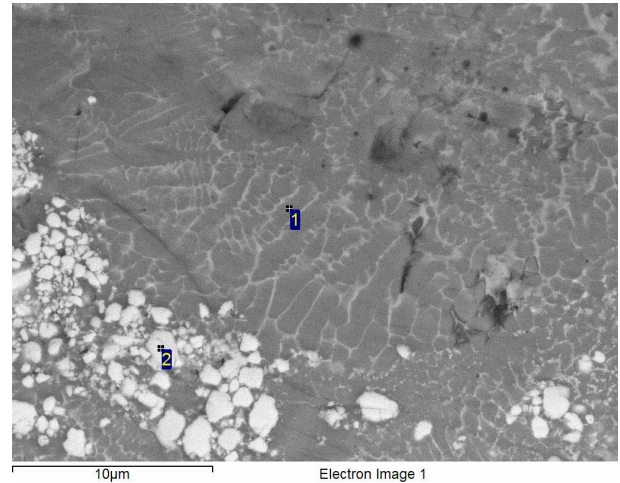


Рис. 4. Микроструктура слоя 2 (сетка карбида вольфрама) и слоя 3 (частицы карбида вольфрама)

Микротвердость по Виккерсу замерялась на микротвердомере мод. ПМТ-3М с нагрузкой 200 г. Измерение диагоналей отпечатков проводилось на микроскопе металлографическом инвертированном мод. Метам ЛВ-34 с применением автоматизированной системы анализа «Микро-Анализ View».

4. Фазовый химический состав структур слоев 2 и 3, % (рис. 4)

Точки	C	Fe	Co	Cu	W	Всего
1	13,5	68,3	–	6,2	12,0	100,0
2	14,5	9,1	4,2	3,2	69,0	
max	14,5	68,3	4,2	6,2	69,0	–
min	13,5	9,1	4,2	3,2	12,0	–

В табл. 5 приведены значения микротвердости по Виккерсу для многослойной упрочненной структуры (см. рис. 1).

5. Микротвердость поверхностного слоя стали 45, упрочненного карбидом вольфрама

Микротвердость слоев, HV			
Слой 1	Слой 2	Слой 3	Матрица
741...846	546...633	431...525	304...332

Для комплексных сравнительных испытаний износостойкости исследовались наружные цилиндрические поверхности образцов,

изготовленных из сталей P18 и 45, с применением следующих технологий:

- объемная закалка, низкотемпературный отпуск (сталь P18);

- объемная закалка, низкотемпературный отпуск (сталь P18) + покрытие с твердорастворным упрочнением из соединений с разным типом межатомных связей системы Ti–Al–N толщиной 3 мкм, нанесенное с применением технологии PVD (в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока);

- объемная закалка, низкотемпературный отпуск (сталь P18) + покрытие с многофазной

структурой системы Mo–Cr–N толщиной 3 мкм, нанесенное с применением технологии PVD (в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока);

– комбинированная электромеханическая обработка (ИКЭМО) – формирование имплантированного карбидами вольфрама поверхностного слоя на поверхности нетермообработанной стали 45 и последующее электромеханическое упрочнение обрабатываемой поверхности.

Образцы с покрытиями на основе Ti–Al–N и Mo–Cr–N были изготовлены в ООО «НПФ «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург).

Комплексные сравнительные испытания образцов проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М, нормализованным методом [4, 5].

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств: время приработки t_0 , ч; приработочный износ h_0 , мкм; среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания f ; отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к f ; среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания

$$I_h = (h - h_0) / (L - L_0),$$

где h – суммарная величина износа образца за время испытаний, мкм; L – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испы-

таний, мкм; L_0 – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки, мкм; значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний $I_{h\Sigma} = h / L$.

Выбор оптимального метода упрочнения поверхностей трения по параметрам триботехнических испытаний может быть произведен на основании определения вышеперечисленных критериев и их сравнения. При этом более износостойким является поверхность трения с меньшими значениями интенсивности изнашивания, длительности приработки, коэффициента трения, а также при падающей характеристике кривой изменения коэффициента трения во времени [6].

Испытания образцов проводились при следующих условиях: скорость скольжения $v = 1$ м/с; нормальное усилие нагружения $N = 100$ Н ($\pm 0,5\%$), (соответствует давлению, рассчитанном по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И–20А (ГОСТ 20799–88); материал индентора – твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 8 ч.

Результаты испытаний образцов, обработанных с применением выше описанных технологий на модернизированной установке МИ-1М, представлены в табл. 6.

6. Результаты триботехнических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца			
		Сталь P18	Сталь P18 + Ti-Al-N	Сталь P18 + Mo-Cr-N	Сталь 45 + ИКЭМО
Прирабатываемость	t_0 , ч	1,12	0,58	0,75	0,45
	h_0 , мкм	7,5	1,30	1,50	1,70
	f_0/f	1,61	1,42	1,46	1,19
Антифрикционность	f	0,31	0,32	0,25	0,24
Износостойкость	h , мкм	16,1	9,70	9,60	4,6
	$I_h \cdot 10^{-10}$	3,44	3,12	3,09	1,44
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	5,55	3,35	3,32	2,03

На рис. 5 – 8 приведены результаты испытаний образцов с графиками изменения износа и коэффициента трения во времени.

Сравнение результатов триботехнических испытаний образцов нормализованным методом показало, что минимальными значениями коэффициента трения, времени приработки и износа обладает имплантированный карбида-

ми вольфрама поверхностный слой с последующим электромеханическим упрочнением.

Кривые износа для образцов с покрытием систем Ti–Al–N и Mo–Cr–N характеризуются ускоренным ростом износа после износа покрытия. Кривая износа для образца после ИКЭМО более стабильна.

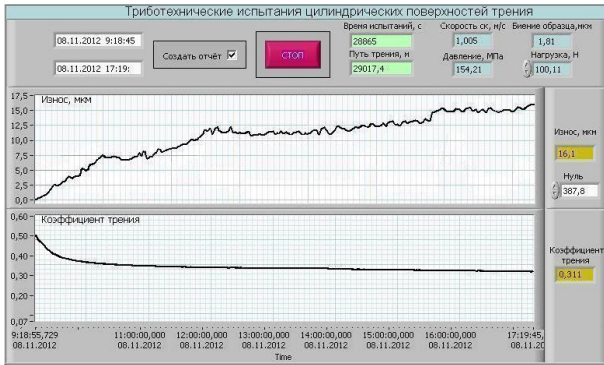


Рис. 5. Результаты испытаний образца после объемной закалки и низкотемпературного отпуска

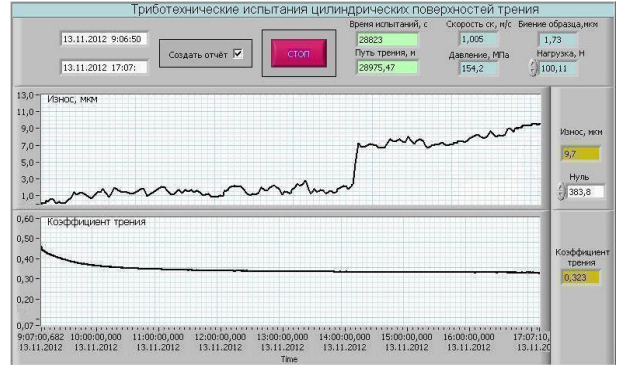


Рис. 6. Результаты испытаний образца после PVD (покрытие системы Ti-Al-N)

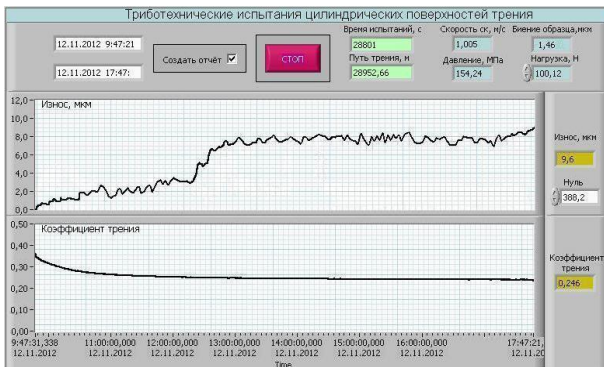


Рис. 7. Результаты испытаний образца после PVD (покрытие системы Mo-Cr-N)

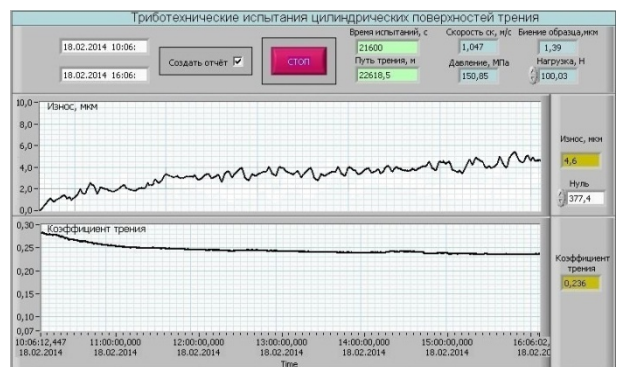


Рис. 8. Результаты испытаний образца после формирования имплантированного карбидами вольфрама слоя и последующего электрохимического упрочнения (ИКЭМО)

По результатам триботехнических испытаний установлено, что интенсивность изнашивания образцов с имплантированным карбидами вольфрама слоем и последующим электрохимическим упрочнением в период нормального изнашивания меньше по сравнению (в скобках указаны значения для общего времени испытаний):

- с термообработанными образцами – в 2,4 (2,7) раза;
- с образцами после PVD (покрытие системы Ti-Al-N) – в 2,2 (1,7) раза;
- с образцами после PVD (покрытие системы Mo-Cr-N) – в 2,1 (1,6) раза.

Выводы:

1. Модификация поверхности трения стали 45 за счет образования на ней поверхностного слоя, имплантированного и композиционно упрочненного карбидами вольфрама, наряду с формированием подслоя, состоящего из ячеистого переохлажденного аустенита, стабилизированного вольфрамом и армированного сеткой из карбида вольфрама, состоящей из

агрегированных наноразмерных частиц карбида вольфрама методом ИКЭМО, позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

2. Наличие многослойной структуры, имеющей общую металлическую матрицу основы материала, обеспечивает монолитную сцепляемость упрочненных слоев без нарушения сплошности в процессе изнашивания при значительных динамических нагрузках, что также подтверждается триботехническими испытаниями.

Применение данной технологии возможно на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горленко, А.О., Горленко, О.А. Импульсная электрохимическая обработка // Научно-технические технологии в

машиностроении. – 2011. – № 6 (06). – С. 21 – 25.

2. Горленко, А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке // Вестник БГТУ. – 2011. – № 3. – С. 4 – 8.

3. Горленко, А.О., Матлахов, В.П. Технологическое повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 5. – С. 20 – 26.

4. Горленко, А.О., Матлахов, В.П. Обеспечение износостойкости поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия // Вестник БГТУ. – 2007. – № 2. – С. 10 – 15.

5. Горленко, А.О., Прудников, М.И. Нормализация триботехнических испытаний для создания базы данных по одноступенчатому технологическому обеспечению износостойкости // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – №9. – С. 7 – 13.

6. Бишутин, С.Г. Износостойкость деталей машин и механизмов: учебное пособие / С.Г. Бишутин, А.О. Горленко, В.П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 112 с.

REFERENCES

1. Gorlenko, A.O., Gorlenko, O.A. Pulse electro-mechanical working // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – № 6 (06). – pp. 21 – 25.

2. Gorlenko, A.O. Friction surfaces strengthening of machine parts at electro-mechanical working // *Bulletin of BSTU*. – 2011. – № 3. – pp. 4 – 8.

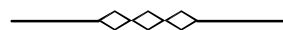
3. Gorlenko, A.O., Matlakhov, V.P. Wear-resistance technological increase in cylindrical friction surfaces // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2010. – № 5. – pp. 20 – 26.

4. Gorlenko, A.O., Matlakhov, V.P. Friction surface wear-resistance assurance by supervised technological effect // *Bulletin of BSTU*. – 2007. – № 2. – pp. 10 – 15.

5. Gorlenko, A.O., Prudnikov, M.I. Tribotechnical tests normalization for data base formation on one-stage technological support of wear-resistance // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2008. – №9. – pp. 7 – 13.

6. Bishutin, S.G. *Wear-Resistance of Machinery and Mechanisms: Manual* / S.G. Bishutin, A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: Publishing House of BSTU, 2010. – pp. 112.

Рецензент д.т.н. А.П. Амосов



Уважаемые коллеги!

приглашаем Вас принять участие в V Международной научной конференции "Наноструктурные материалы –2016: Беларусь-Россия-Украина" (НАНО-2016), которая состоится 25–28 октября 2016 г. в Минске в НПЦ НАН Беларуси по материаловедению совместно с VII Международной конференцией «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2016).

Тематика конференции:

1. Инженерия поверхности, 3D принтирование, физико-химия наноструктурированных материалов.
2. Наноструктурные металлы, сплавы, керамика и нано-композиты.
3. Источники энергии, коллоидные системы, углеродные наноматериалы (графен, фуллерены, углеродные нано-трубки и материалы на их основе).
4. Нанoeлектроника, оптоэлектроника, спинтроника, наносенсоры, магнитные наноматериалы.
5. Методы аттестации и сертификации наноматериалов. Практические приложения наноматериалов.

Оргкомитет: 220072, Минск, ул. П.Бровки, 19
ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Шумская Е.Е.

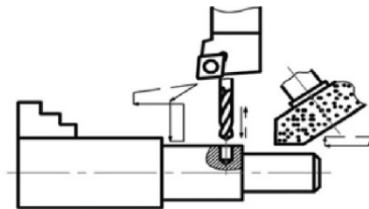
Тел.: (+375 17) 2841193

Факс: (+375 17) 2840888

E-mail: NANO2016@physics.by

Для регистрации, и получения текущей информации о конференции, гостиницах и стоимости проживания используйте страничку в Internet:

<http://ifftp.bas-net.by/index.php?path=NANO2016>



УДК 621.9–219.1–752
DOI: 10.12737/21234

**С.М. Братан, д.т.н.,
Е.А. Владецкая, аспирант**
(ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Россия)
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка

На основе положений теории массового обслуживания предложен метод оценки надежности виброизолирующего устройства станка с использованием размеченного графа состояний с учетом потоков отказов и восстановлений. Метод позволяет с помощью машинного эксперимента определить эксплуатационную надежность устройства и выявить наименее надежные подсистемы и элементы, а также целесообразность их параметрической оптимизации.

Ключевые слова: виброизолирующее устройство станка; надежность; интенсивность потока отказов; поток восстановления; уравнения финальных вероятностей.

**S.M. Bratan, D.Eng.,
E.A. Vladetskaya, Post graduate student**
(FSBEI HE Sevastopol State University, Russia)

Investigation of vibroisolating device reliability in grinding machine

For the search of rational engineering solutions on the design of vibroisolating devices of a machine functioning under conditions of a floating shop there is used a method of a morphological analysis. The undertakings carried out allowed solving a problem at the level of a structural arrangement optimization and parametric synthesis and creating new designs of a vibroisolating support and a vibroisolating device. On the basis of the regulations of a mass service theory there is offered a method for the operation reliability estimation of a machine vibroisolating device with the use of a graduated graph of states taking into account failure and restoration flows. The state of the system is determined by a set of equations of final likelihoods. A machine experiment has shown maintainability high enough of a vibroisolating device (more than 96 % of its life the device is in its operational status, and about 4% - in the repair (restoration) state of its subsystems). To the least reliable subsystem it should be related a drive (failure probability – 2.11%), further – vibro-isolator (failure probability – 1%), then – a body – (0.52%) and a fastening device (0.26%). The method allows defining device maintainability with the aid of a machine experiment and revealing least reliable subsystems and elements and also an expediency of their parametrical optimization.

Keywords: machine vibroisolating device; reliability; failure flow rate; restoration flow; equation of final likelihood.

Для поиска рациональных технических решений по конструкции виброизолирующих устройств станка, работающего в условиях плавучей мастерской, использован метод морфологического анализа, достаточно полно разработанный для решения технических задач, в частности проектирования станков, их узлов и механизмов [1].

Проведенные мероприятия позволили решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации [2]. Этап параметрического синтеза и проведение дополни-

тельных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств, выполненные в Севастопольском государственном университете, позволили создать новые конструкции виброизолирующей опоры (рис. 1) [3] и виброизолирующего устройства металлорежущего станка плавучей мастерской (рис. 2) [4].

Для оценки надежности вариантов выбранных структур необходимо рассмотреть особенности возникновения отказов функционирования, то есть эксплуатационную надеж-

ность системы виброизолирующего устройства (ВУ) (рис. 3).



Рис. 1. Виброизолирующие опоры новой конструкции

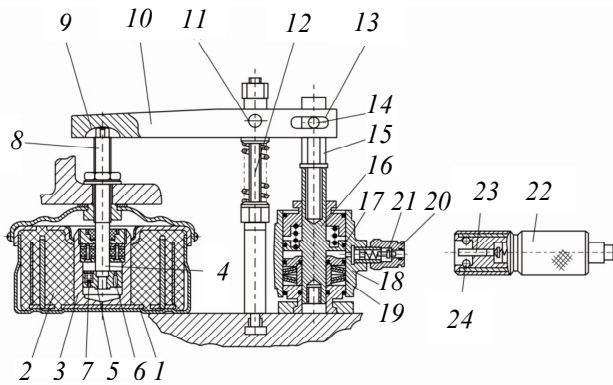


Рис. 2. Общий вид виброизолирующего устройства:
 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарик

Каждый элемент подсистемы ВУ может иметь различные интенсивности восстановления μ , а также и различные интенсивности отказов λ , т.е. разную надежность. При этом сложный элемент (подсистема) при одинаковом λ может иметь меньшее значение μ (меньшую надежность). Либо при одинаковом μ большее значение λ , чем менее сложный элемент. Это необходимо учесть при выборе критериев оценки эффективности структур ВУ.

Рассматривая виброизолирующее устройство как дискретную систему, примем, что

элементы (подсистемы) отказывают независимо друг от друга, причем каждый элемент после отказа восстанавливается. Будем считать, что исходные свойства подсистемы восстанавливаются полностью, а работа, отказы и восстановления одной подсистемы никак не влияют на надежность других.

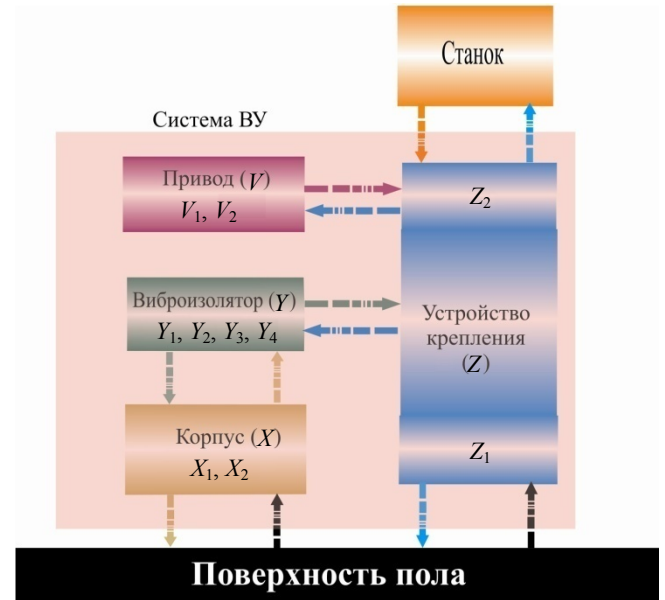


Рис. 3. Структурная схема системы виброизолирующего устройства

Моменты отказа каждой подсистемы образуют процесс восстановления, причем в силу наших предположений, эти процессы независимы. Обозначим через $F_k(t)$ закон распределения времени жизни k -й подсистемы (элемента). Предполагаем, что эти законы имеют непрерывную плотность $f_k(t)$ и существуют среднее время жизни подсистемы (элемента) T_k и его дисперсия σ_k^2 .

Поскольку подсистемы в системе ВУ с точки зрения надежности соединены последовательно (рис. 4), то отказ любой подсистемы вызывает отказ всей системы. Появление отказов на одном участке времени не меняет вероятности появления какого-либо числа отказов на другом участке, не пересекающимся с первым.

Из этих физических соображений следует, что при сделанных выше предположениях в потоке отказов системы ВУ должно отсутствовать последствие. Кроме того, предположим, что законы распределения $F_k(t)$ имеют непрерывные плотности. Отсюда следует, что функция $H(t)$ – среднее число отказов – непрерывна и поток отказов системы ВУ является

ся ординарным, т.е. вероятность одновременного появления двух отказов ничтожно мала. С учетом приведенных доводов, рассмотрена система ВУ как физически дискретная система, которая может находиться в состояниях S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 .

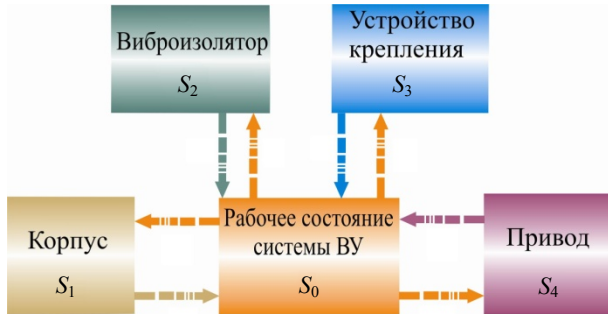


Рис. 4. Размеченный граф состояний системы виброизолирующего устройства (ВУ) с учетом отказов ее подсистем

Состояние S_0 характеризует нормальное функционирование виброизолирующего устройства (ВУ) при отсутствии отказов.

В состоянии S_1 требуется ремонт вышедшего из строя корпуса вследствие потока отказов его функционирования с интенсивностью λ_1 . В этом случае $\lambda_1 = 1/\bar{T}_k$, где \bar{T}_k – среднее время между двумя отказами функционирования корпуса, ч.

Состояние S_2 характеризуется выходом из строя виброизолятора из-за потоков отказов с интенсивностью λ_2 . При этом $\lambda_2 = 1/\bar{T}_B$, где \bar{T}_B – среднее время между двумя отказами функционирования виброизолятора, ч.

В состоянии S_3 требуется ремонт или замена вышедшего из строя устройства крепления вследствие потока отказов с интенсивностью λ_3 . В этом случае $\lambda_3 = 1/\bar{T}_y$, где \bar{T}_y – среднее время между двумя отказами функционирования устройства крепления, ч.

В состоянии S_4 требуется ремонт вышедшего из строя привода вследствие потока отказов с интенсивностью λ_4 . В этом случае $\lambda_4 = 1/\bar{T}_\Pi$, где \bar{T}_Π – среднее время между двумя отказами функционирования привода, ч.

Величины $\bar{T}_k, \bar{T}_y, \bar{T}_B, \bar{T}_\Pi$ определяются

по общей формуле $\bar{T} = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{m}$, где t_j – интервал между $(j - 1)$ -м и j -м отказами; m – число отка-

зов функционирования соответствующей подсистемы виброизолирующего устройства.

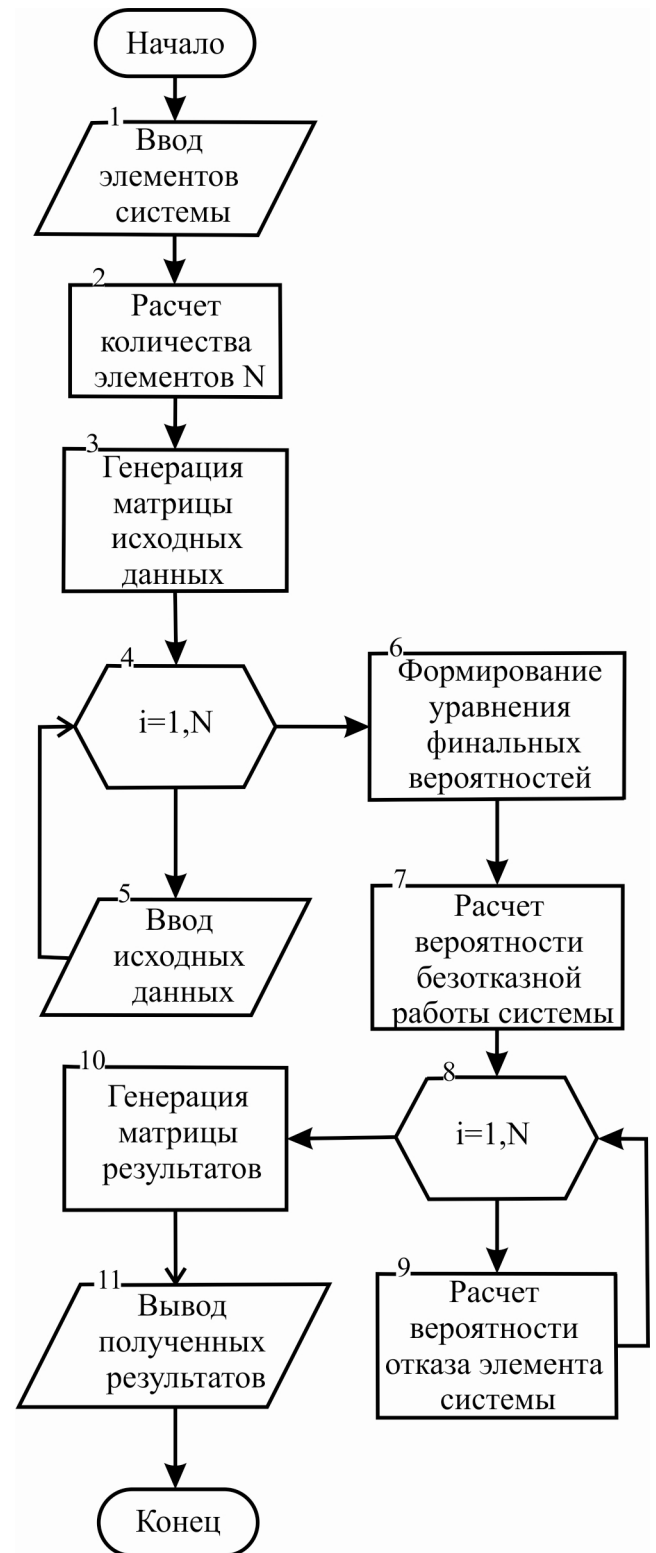


Рис. 5. Графический алгоритм расчета надежности системы ВУ

Каждая подсистема ВУ подвергается восстановлению после отказа. Интенсивность восстановления соответственно для каждой подсистемы обозначим $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, считая при этом, что время восстановления, являю-

щиеся случайной величиной, подчиняется закону Пуассона:

$$\mu_1 = \frac{1}{\bar{T}_{ВК}}; \quad \mu_2 = \frac{1}{\bar{T}_{ВВ}}; \quad \mu_3 = \frac{1}{\bar{T}_{ВУ}};$$

$$\mu_4 = \frac{1}{\bar{T}_{ВП}},$$

где $\bar{T}_{ВК}$ – среднее время восстановления (ремонта) корпуса, ч; $\bar{T}_{ВВ}$ – среднее время восстановления (замены) виброизолятора, ч; $\bar{T}_{ВУ}$ – среднее время восстановления (замены) устройства крепления, ч; $\bar{T}_{ВП}$ – среднее время восстановления (ремонта) привода, ч.

Для описания размеченного графа состояний системы виброизолирующего устройства (рис. 5) обозначим вероятность ее нахождения в каждом из вышеуказанных состояний соответственно P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 .

P_0 – вероятность нормальной работы ВУ при отсутствии отказов, $P_0 = P(S_0)$; P_1 – вероятность отказа подсистемы корпуса, $P_1 = P(S_1)$; P_2 – вероятность отказа подсистемы виброизолятора, $P_2 = P(S_2)$; P_3 – вероятность отказа подсистемы устройства уплотнения, $P_3 = P(S_3)$; P_4 – вероятность отказа подсистемы привода, $P_4 = P(S_4)$.

Состояние системы определяется совокупностью уравнений финальных вероятностей:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4; \\ P_1\mu_1 = P_0\lambda_1; \\ P_2\mu_2 = P_0\lambda_2; \\ P_3\mu_3 = P_0\lambda_3; \\ P_4\mu_4 = P_0\lambda_4. \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) решается с помощью условия нормирования:

$$\sum_{i=0}^4 P_i = 1.$$

В уравнениях интенсивности λ – характеризуют входящий поток – поток отказов, интенсивности μ – выходящий поток – поток восстановлений.

Из (1) определяем финальные вероятности:

$$\begin{cases} P_0 = (1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \lambda_3/\mu_3 + \lambda_4/\mu_4)^{-1}; \\ P_1 = P_0\lambda_1/\mu_1; \\ P_2 = P_0\lambda_2/\mu_2; \\ P_3 = P_0\lambda_3/\mu_3; \\ P_4 = P_0\lambda_4/\mu_4. \end{cases}$$

Решение полученной системы уравнений и результаты расчетов позволят выявить наименее надежную из подсистем виброизолирующего устройства, определив вероятности их отказов.

Блок-схема программы расчета надежности рациональных вариантов систем виброизолирующих устройств включает следующие основные этапы:

- 1) ввод названий элементов базовой системы;
- 2) расчет количества элементов;
- 3) генерация матрицы исходных данных;
- 4) заполнение матрицы исходными данными;
- 5) формирование уравнения финальных вероятностей;
- 6) расчет вероятности безотказной работы системы;
- 7) расчет вероятностей отказов элементов системы;
- 8) генерация матрицы результатов;
- 9) вывод результатов моделирования.

Рассмотрим каждый пункт словесного алгоритма. Первый пункт предполагает ввод названий элемента системы пользователем для идентификации их в дальнейшей работе программы и при выводе результатов. Для этого будет использоваться отдельное поле, в которое непосредственно вводится название элемента и список, в котором будут отображаться уже введенные подсистемы или элементы.

Во втором пункте после окончания ввода названий элементов, производится расчет количества элементов в заданной системе. Эта информация служит для создания дальнейшего интерфейса программы (появления необходимого количества полей ввода для параметров элементов), так и для расчетов финальных вероятностей.

В третьем пункте производится генерация матрицы исходных данных, т.е. создается матрица с пустыми значениями потоков отказов и восстановлений для каждого элемента, присутствующего в системе. В соответствии с этой матрицей на рабочем поле программы создается необходимое количество полей ввода для таких данных, как потоки отказов и восстановлений соответствующих элементов системы. В ходе процесса, описанного в четвертом пункте, пользователь вводит данные о потоках отказов и восстановлений в поля ввода, присутствующие на рабочем поле программы. Эти данные автоматически заносятся в матрицу исходных данных.

Пятый пункт предполагает составление программой системы финальных уравнений для заданной системы. Подробный алгоритм этой операции рассмотрен в [5].

В пунктах шесть и семь решается система финальных уравнений. Для начала вычисляется вероятность безотказной работы P_0 . Затем вычисляются вероятности отказов каждого элемента системы $P_1...P_n$. Пункт восемь отвечает за создание матрицы результатов и запись полученных результатов в соответствующие ячейки этой матрицы.

Вывод результатов моделирования осуществляет пункт девять. Вывод результатов предполагается реализовать в текстовом и графическом виде. Текстовый вид представляет собой список с указанием элемента и вероятностью его отказа, в конце выводится вероятность безотказной работы системы. Графический вид выполняется в виде диаграммы, по оси X расположены элементы системы, по оси Y – вероятности отказов этих элементов. Для удобства чтения данной диаграммы вероятность безотказной работы не выводится, т.к. является несоизмеримо большей по величине.

Графический алгоритм программы представлен на рис. 6. На рисунке представлен пример работы предлагаемой программы для

вычисления вероятностей безотказной работы системы виброизолирующего устройства, а также отказов его подсистем, описанных в работе [6].

Эксплуатационные данные по параметрам потоков отказов и восстановления подсистем виброизолирующего устройства, а также результаты моделирования приведены в табл. 1.

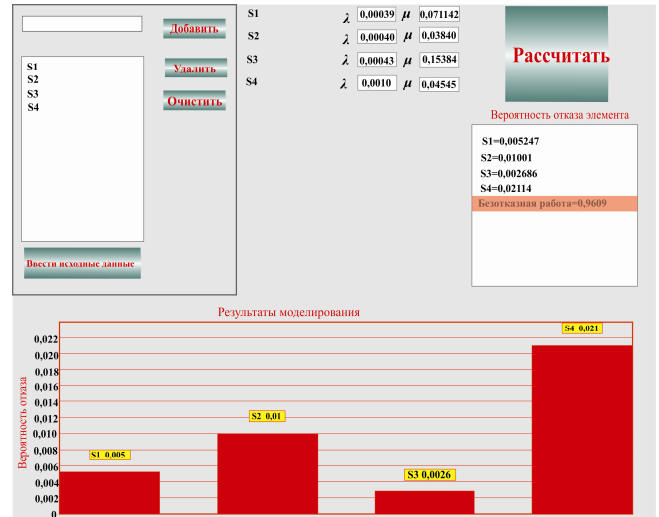


Рис. 6. Программа для расчета надежности подсистем виброизолирующего устройства

1. Результаты расчетов надежности подсистем виброизолирующего устройства

Подсистема	Интенсивность потока отказов, ч ⁻¹	Интенсивность потока восстановлений, ч ⁻¹	Вероятность отказа
Корпус	0,00039	0,07142	0,0052
Виброизолятор	0,00040	0,03840	0,0100
Устройство крепления	0,00043	0,15384	0,0026
Привод	0,00100	0,04545	0,0211
Вероятность безотказной работы системы ВУ			0,9609

Машинный эксперимент показал достаточно высокую эксплуатационную надежность виброизолирующего устройства ($P_0 = 0,9609$), т.е. более 96 % своего ресурса устройство находится в рабочем состоянии, а около 4 % – в состоянии ремонта (восстановления) его подсистем. К наименее надежной подсистеме следует отнести привод (вероятность отказа $P_4 = 0,0211$, т.е. 2,11 %), далее – виброизолятор (вероятность отказа $P_2 = 0,01$, т.е. 1 %), затем корпус ($P_1 = 0,0052$, т.е. 0,52 %) и устройство крепления (вероятность отказа $P_3 = 0,0026$, т.е. 0,26 %). Выявленные наименее

надежные элементы и подсистемы нуждаются в усовершенствованиях конструкторско-технологического характера – путем оптимизации конструкции и технологических мероприятий, которые могут привести к существенному увеличению сроков службы изделия.

Для продолжения машинного эксперимента необходимо получить эксплуатационные данные для новых вариантов подсистем и системы и повторить процесс расчетов, начиная с первого этапа. Однако в данном случае подсистем и элементов, имеющих надежность,

существенно влияющую на вероятность безотказной работы системы, не выявлено, так как даже наименее надежный элемент – привод (вероятность отказа 2,11 %) не оказывает существенного влияния на работоспособность системы и поэтому дальнейшей оптимизации с точки зрения повышения надежности на данном этапе не требуется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, Ю.Н. Новоселов, Ю.К., Луцив, И.В. Теория технических систем. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – 252 с.
2. Владецкая, Е.А. Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вісник СевНТУ. – Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – С.14–20.
3. Пат. України 36389. Віброізолююча опора металорізального верстата /А.О. Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацький. 2008, Бюл. №20.
4. Пат. України 51621. Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні / А.О. Харченко, К.О. Владецька, С.М. Братан, Д.О. Владецький, 2010, Бюл. №14.
5. Владецкая, Е.А., Братан, С.М. Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской // Перспективы науки – 2016: Сб. докладов III Международного конкурса научно-исследовательских работ (29 апреля 2016 г.). Том III (Естественные и технические науки). – Казань: ООО «Рокета Союз», 2016. – С. 247–257.

6. Владецкая, Е.А., Братан, С.М., Харченко, А.О., Владецкий, Д.О. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №6 (314). – С.88–103.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Yu.N. Novosyolov, Yu.K., Lutsiv, I.V. *Theory of Engineering Systems*. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2010. – pp. 252.
2. Vladetskaya, E.A. Optimization of grinder vibroprotective system structure based on morphological analysis / E.A. Vladetskaya, S.M. Bratan, A.O. Kharchenko // Bulletin of SevNTU. – Issue.140: *Mechanical Engineering and Transport: Proceedings of Science*. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2013. – pp.14–20.
3. Pat. Ukraine 36389. *Vibroprotective Support of Machine-tool* /A.O. Kharchenko, K.O. Vladetskaya, S.M. Bratan, Yu.L. Rapatsky. 2008, Bull. №20.
4. Pat. Ukraine 51621. *Vibro-protective Support of Machine-tool of Floating repair Shop* / A.O. Kharchenko, K.O. Vladetskaya, S.M. Bratan, D.O. Vladetsky, 2010, Bull. №14.
5. Vladetskaya, E.A., Bratan, S.M. Grinding quality increase under conditions of floating repair shop // *Science Prospects – 2016: Proceedings of the III-d Inter. Competition of Sc. Works* (April 29, 2016). Vol. III (Natural and Engineering Sciences). – Kazan: “Rocket “Soyuz”, 2016. – pp. 247–257.
6. Vladetskaya, E.A., Bratan, S.M., Kharchenko, A.O., Vladetsky, D.O. Grinding quality support by outer disturbance decrease under conditions of floating repair shop // *Fundamental and Applied Problems of Techniques*. – 2015. – №6 (314). – pp.88–103.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандошко

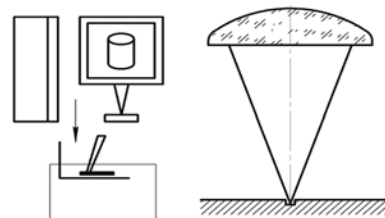
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научноёмкие технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru



УДК 621.373.826
DOI: 10.12737/21235

А.Г. Григорьянц, д.т.н.,
В.А. Фунтиков, аспирант, **А.Н. Савкин**, аспирант
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, Москва, Россия 105005)
Р.С. Третьяков, к.т.н.
(ООО «Московский Центр Лазерных Технологий»,
ул. Лесная, д. 28, стр. 2, г. Москва, Россия 125190)
E-mail: vladislav.funt@gmail.com

Разработка оптической системы волоконного лазера для процесса лазерной полировки деталей

Показана возможность приближенного описания многомодового пучка иттербиевого волоконного лазера в системе моделирования Zemax для разработки оптической системы лазерной головки. Разработаны и изготовлены оптические узлы лазерной головки с учётом характерных особенностей излучения мощных волоконных лазеров. Представлена разработка оптической системы в технологии лазерной полировки переплавлением поверхности образца из нержавеющей стали марки 1540-00.

Ключевые слова: лазерная оптическая система; волоконный лазер; лазерная головка; пятно линейной формы; лазерная полировка; шероховатость.

A.G. Grigoriyants, D.Eng.,
V.A. Funtikov, Post graduate student,
A.N. Savkin, Post graduate student,
(Bauman STU of Moscow, 5,
2-d Baumanskaya Str., Moscow, Russia 105005)
R.S. Tretiakov, Can.Eng.
("Moscow Center of Laser Techniques" Co.,
Building 2, 28, Lesnaya Str., Moscow Russia 125190)

Development of fiber laser optic system for laser polishing of parts

The possibility of an approximate description of a multimode beam of a fiber laser in the Zemax modeling system for the development of an optic system of a laser head is shown. There are developed and manufactured optic units of a laser head taking into account characteristic peculiarities of radiation of high-power fiber lasers. The possibilities are shown the developed optic system in the technology of laser polishing by the remelting of a sample surface made of stainless steel of type 1540-00.

Keywords: laser optic system; fiber laser; laser head; spot of a linear form; laser polishing; roughness.

Для получения хороших результатов при обработке излучением волоконных лазеров необходимо уделять внимание не только самой технологии обработки, но также и другим характеристикам элементов установки. Применение оптимизированных оптических систем в технологических головках позволяет зачастую значительно поднять качество и производительность процесса [1]. Корректный

расчёт применяемых оптических элементов с учётом принципиального отличия свойств когерентного лазерного излучения от некогерентного легко достигается уменьшением размера лазерного пятна в зоне обработки до 3 раз, что эквивалентно повышению плотности мощности лазера более чем в 9 раз.

К сожалению, в нашей стране практически отсутствуют компании, которые занимаются

синтезом и изготовлением оптических лазерных систем для технологий лазерной обработки. Ведущими мировыми лидерами, производящими оптические системы для мощных лазеров, используемых в технологических процессах обработки материала, являются Scan-sonic, Precitec, HAYAG, Kugler, TRUMPF, IPGPhotonics. На базе малого инновационного предприятия при МГТУ им. Н.Э. Баумана ООО «Московский Центр Лазерных Технологий», совместно с немецкой компанией Scan-sonic, был организован участок сборки и тестирования серии оптических лазерных систем. Для проведения экспериментов использовалось оборудование и базовые элементы оптических систем лаборатории ООО «МЦЛТ».

Данная работа посвящена разработке методики синтеза оптической системы лазерной головки в программной среде Zemax, которая обеспечивает её максимальную функциональность, минимальную стоимость изготовления и эксплуатации, учитывая при этом комплекс оптических, технологических, конструктивных факторов, таких как обеспечение в рабочей зоне требуемых параметров лазерного пучка и использование оптической системы с минимально возможным количеством линз.

Экспериментальное определение пространственных параметров пучка мощного иттербиевого волоконного лазера

Для разработки оптических систем мощных волоконных лазеров, прежде всего, необходимо знать пространственное распределение плотности мощности многомодового лазерного пучка. В качестве лазерного источника использовался иттербиевый волоконный лазер ЛС-5 НТО «ИРЭ «Полюс» мощностью 5 кВт в непрерывном режиме генерации с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм и диаметром волокна 100 мкм.

Измерения проводились с помощью диагностической системы для высокомошных лазеров PROMETEC LASERSCOPE UFF 100. Прибор позволяет проводить качественные измерения как расфокусированного (рис. 1, а), так и сфокусированного лазерного пучка (рис. 1, б).

Принцип работы этого прибора заключается в следующем. Через отверстие на конце иглы, обращенное к пучку, излучение после отражения от двух наклонных зеркал попадает на приемную матрицу. Сканирование измеряемого лазерного пучка осуществляется за счёт вращения иглы, при этом ось вращения постоянно смещается, что позволяет сканиро-

вать пучок по всей площади поперечного сечения.

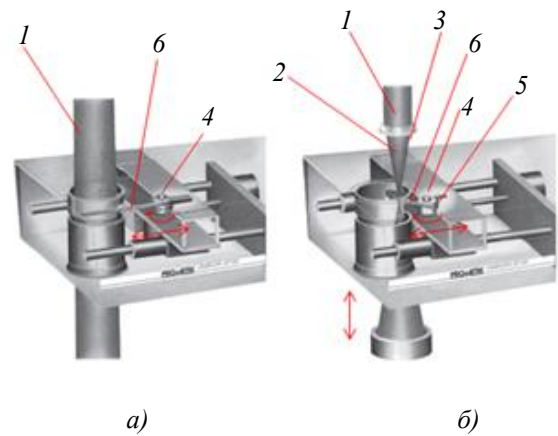


Рис. 1. Принципиальные схемы измерения пространственных характеристик коллимированного (а) и сфокусированного (б) излучения волоконного лазера ЛС-5:

1 – несфокусированный лазерный луч; 2 – сфокусированный лазерный пучок; 3 – фокусирующая система; 4 – детектор; 5 – вращающийся патрон; 6 – полая игла

Распределение плотности мощности лазерного пучка измеряется путём регистрации яркости по каждому сечению площади пучка. Детектор наклонных зеркал усиливает сигнал, оцифровывает его и передает через последовательный интерфейс на ПК для дальнейшей обработки.

Прибор PROMETEC LASERSCOPE UFF 100 может быть адаптирован для измерения лазерного излучения различных плотностей мощности в широком спектральном диапазоне. Грубая настройка чувствительности прибора может быть сделана через отбор игл с различными размерами отверстия. Более точная настройка осуществляется путём указания внутренних коэффициентов усиления приемной матрицы.

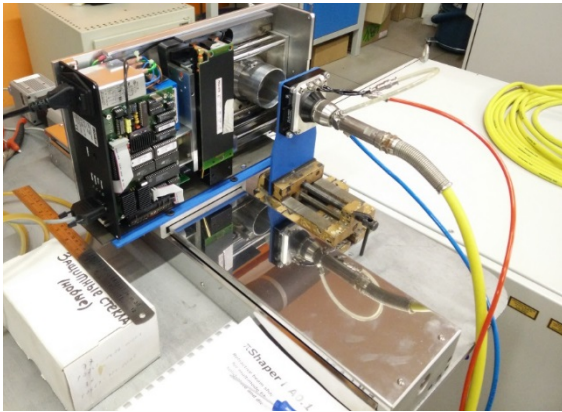
Мощные волоконные лазеры состоят из набора одномодовых активных волноводов, в каждом из которых происходит независимая генерация излучения. В транспортировочном многомодовом волокне происходит некогерентное сложение генерируемых пучков. На выходе из транспортировочного волновода расходимость суммарного пучка определяется дифракционным углом расходимости каждого отдельного пучка на его выходе [2]:

$$\theta_r \approx \lambda / d_b, \quad (1)$$

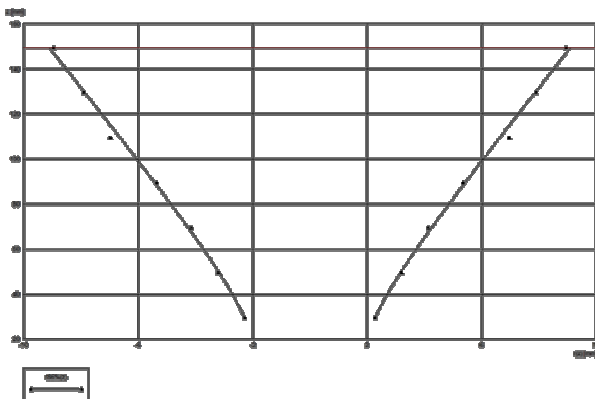
где d_b – диаметр активного волновода.

Для иттербиевого волоконного лазера проводились измерения пространственного распределения плотности мощности излучения

вдоль оси пучка на выходе излучения из торца волокна для определения расходимости лазерного излучения по уровню 86,5 % (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Схема измерения пространственных характеристик (а) и картина распространения (б) излучения волоконного лазера на выходе из волокна ЛС-5

Угол расходимости суммарного пучка превышает дифракционный предел в d_T/d_B раз. Чтобы повысить направленность выходного пучка используется коллимирующий объектив, после которого угол его расходимости уменьшается до

$$\theta \approx d_T / F_K \quad (2)$$

Исходя из того, что фокусное расстояние коллимирующей линзы должно удовлетворять соотношению

$$F_K = D d_B / \lambda, \quad (3)$$

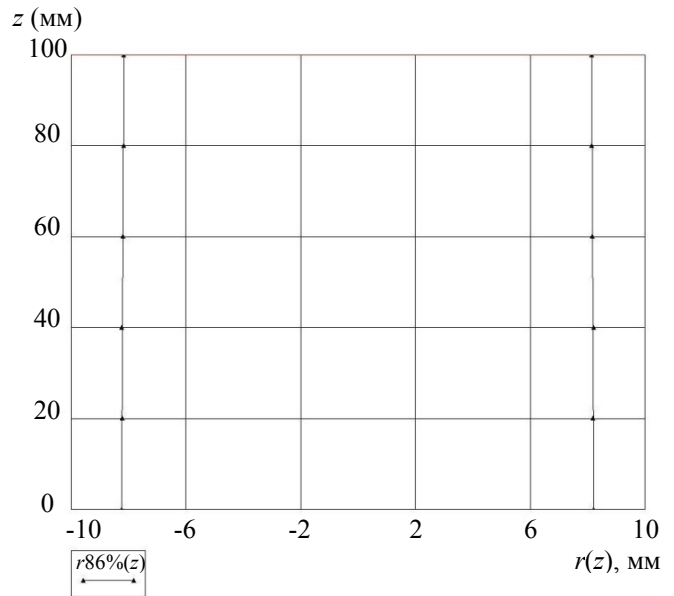
где D – диаметр пучка излучения на линзе, итоговый угол расходимости будет равен:

$$\theta \approx \frac{d_T}{d_B} \frac{\lambda}{D}. \quad (4)$$

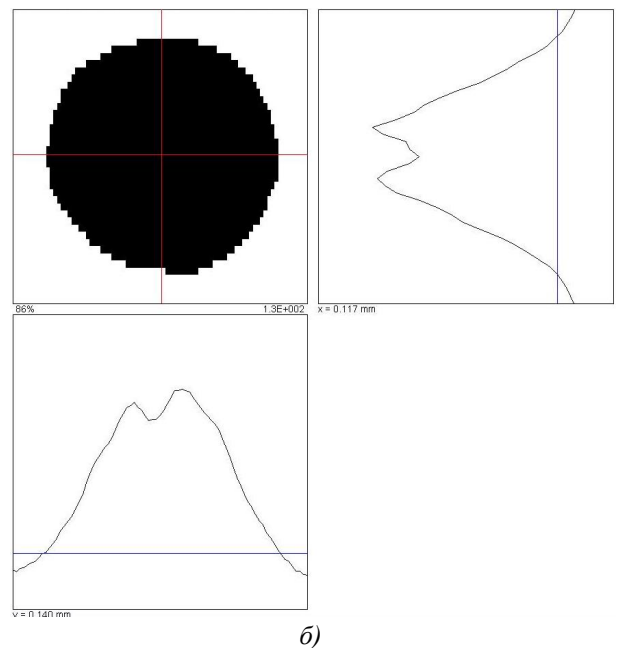
В качестве коллиматора в оптической лазерной системе использовался стандартный коллимирующий узел компании Scansonic COLCO 32CF144 – трехлинзовый объектив с фокусным расстоянием $f' = 144$ мм и нанесен-

ным просветляющим покрытием на длину волны 1064 нм.

Были проведены измерения расходимости излучения и диаметра пятна иттербиевого волоконного лазера на выходе из коллиматора на базовом расстоянии 100 мм с шагом 20 мм. Как видно на рис. 3, а после коллиматора выходит параллельный пучок лазерного излучения средним диаметром около 16,36 мм, максимальное отклонение на базовой длине от среднего диаметра менее 1%. Наблюдается неоднородность распределения интенсивности излучения в пятне после коллимирующего узла (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. Картина распространения (а) и пространственного распределения плотности мощности (б) излучения волоконного лазера после коллиматора

Несмотря на то, что полученных данных вполне достаточно, для проведения синтеза оптической системы в программной среде Zemax, были проведены дополнительные измерения, позволяющие определить параметры качества излучения BPP (*Beam Parameter Product*) и M^2 :

$$BPP = \frac{\theta}{2} \frac{D}{2} = \frac{d_T \lambda}{4d_B} \quad (5)$$

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} BPP = \frac{\pi d_T}{4d_B} \quad (6)$$

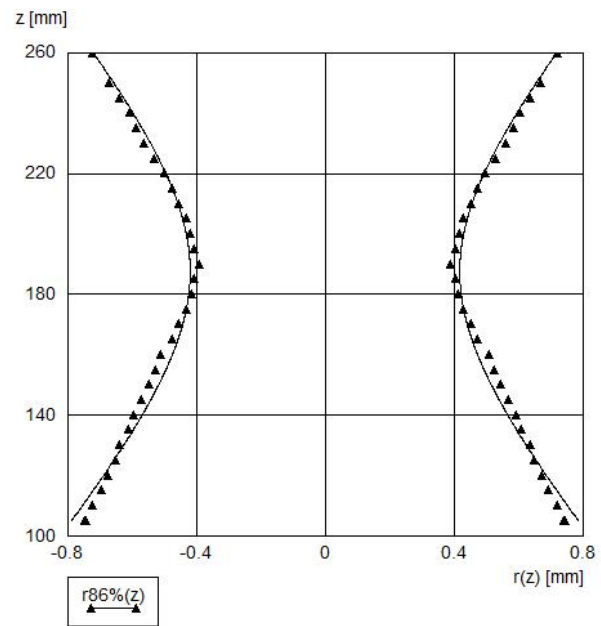
Данные параметры не зависят от используемой оптической системы и определяют исключительно качество излучения лазерного источника. В оптическую систему был внесен дополнительный фокусирующий узел Scansonic ($f' = 200$, однолинзовый объектив, просветляющее покрытие на 1064 нм), измерения проводились в соответствии со способом, описанным в работе [3]. Качественные и количественные характеристики излучения мощного иттербиевого волоконного лазера, полученные в результате измерения приведены на рис. 4 и в табл. 1 соответственно.

Параметры качества излучения мощного иттербиевого волоконного лазера BPP и M^2 , определённые по результатам измерений, и паспортные значения практически совпадают с погрешностью менее 8 %.

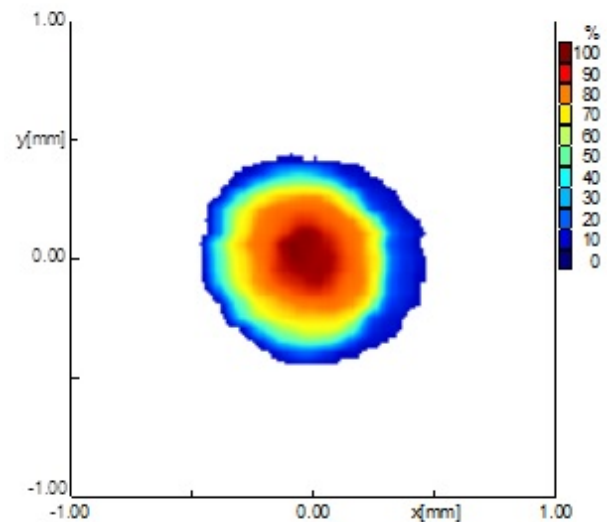
Многомодовое излучение мощного волоконного лазера в свободном пространстве и преобразование оптической системы можно описывать пространственными параметрами лазерного пучка: размером перетяжки по уровню 86,5 % полного потока; конфокальным параметром; положением перетяжки; угловой расходимостью, что позволяет провести синтез оптической системы в программной среде Zemax.

Моделирование и синтез оптической системы в программной среде Zemax

Основной задачей синтеза и моделирования оптической системы было получение параметров фокусирующего объектива, позволяющего достичь требуемого распределения плотности мощности в пятне линейной формы размером 10x1,5 мм по уровню 86,5 % на рабочем расстоянии 115 мм до зоны обработки при заранее измеренных параметрах излучения мощного волоконного иттербиевого лазера.



a)



б)

Рис. 4. Каустика излучения (а) и распределение плотности энергии в перетяжке (б) мощного иттербиевого волоконного лазера

Так как плоскость обработки находится не в фокальной плоскости фокусирующего объектива, поскольку имеет значительные линейные размеры (1,5x10 мм), можно считать, что, с учетом небольших значений конфокального параметра волоконного лазера [1], плоскость обработки находится в дальней зоне лазерного пучка. Ранее приведены результаты измерений распределения интенсивности излучения на выходе из коллиматора (в дальней зоне пучка).

1. Параметры качества лазерного излучения волоконного лазера

№	Параметр	НТО «ИРЭ «Полюс»	ООО «МЦЛТ»
1	Мощность лазерного излучения, Вт	2500	2500
2	Диаметр/длина волокна, мкм/м	100/15	100/15
3	Фокусное расстояние объектива, мм	500	200
4	BPP , мм*мрад	3,12	3,38
5	M^2	9,150	9,918
6	Минимальный диаметр перетяжки по уровню 86,5%, мм	0,384	0,419

Торец волокна моделировался как плоский источник круглой формы с равномерной светимостью, объектив коллиматора моделировался идеальной линзой с необходимым фокусным расстоянием, и также являлся входным зрачком системы. Была принята гауссова аподизация зрачка, с коэффициентом аподизации, позволяющим аппроксимировать получаемым распределением на выходе модельной системы реально полученное распределение интенсивности (рис. 5).

Для ускорения прототипирования лазерной головки было решено использовать две стандартные плоско-выпуклые скрещенные цилиндрические линзы с фокусными расстояниями 150 и 300 мм. Задача оптимизации системы, помимо получения необходимой формы пятна, заключалась в выборе их правильного взаимного расположения, с условием соответствия габаритов получаемой оптической системы стандартным модулям фирмы Scansonic, а также получения рабочего отрезка, позволяющего разместить защитные стекла и беспрепятственно производить необходимые технологические операции.

Система была оптимизирована для получения необходимых энергетических характеристик в пятне в плоскости обработки, расположенном на расстоянии 113 мм от последней поверхности линзы, без учета защитных стекол. Полученное пятно и профили интенсивности в нем показаны на рис. 6.

В прямоугольник размером 10x1,5 мм попадает около 86,5 % энергии, при этом соотношение ширины и высоты пятна повторяет соотношение сторон прямоугольника. Параметры полученной системы приведены в табл. 2.

Следует отметить, что подобный упрощенный расчет, с аппроксимацией пучка с помощью аподизации зрачка, не может быть использован для расчета формы пятна в ближней зоне пучка, как и сам пакет Zemax в целом. Для решения задач разработки головок для технологий, требующих высоких плотно-

стей мощности в зоне обработки (сварка, резка, и т.д.), необходимо использовать методы, описанные в [1].

2. Параметры оптической системы

Поверхность	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал
1	77,25	5,9	BK7
2	Inf	13,8	-
3	154,5	5,9	BK7
4	Inf	113	-

На основе данных, полученных при моделировании оптической системы в программной среде Zemax, были изготовлены конструктивные и оптические элементы фокусирующего узла. Специалистами участка по сборке и тестированию оптических лазерных систем ООО «МЦЛТ» была проведена сборка и тестирование лазерной головки для полировки на базовых элементах Scansonic.

Результаты тестирования головки (рис. 7) показали, что данные, полученные при моделировании, и измеренные результаты собранной оптической системы, практически совпадают. Отклонения пятна линейной формы от требуемых по техническому заданию размеров на расстоянии 115 мм от фокусирующего объектива составляет порядка 2 %.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная методика синтеза оптической системы лазерной головки в программной среде Zemax учитывает комплекс оптических, технологических, конструктивных факторов, таких как обеспечение в рабочей зоне требуемых параметров лазерного пучка и использование оптической системы с минимально возможным количеством линз.

Тестирование разработанной оптической лазерной системы в технологии лазерной полировки

Для получения образцов использовалась пятикоординатная аддитивная машина коак-

сиального лазерного плавления на базе иттербиевого волоконного лазера, разработанная совместными усилиями специалистов ООО «МЦЛТ» и научных сотрудников МГТУ им. Н.Э. Баумана [4]. Изделия представляли собой параллелепипеды 35×50×10 мм, полученные из газопорошковой смеси на основе никеля (1540-00), методом коаксиального лазерного плавления на подложки из Ст 10, причем направление нанесения слоев ортогональны.

Разработанная оптическая система была интегрирована в трехкоординатный станок для прецизионной лазерной обработки МЛ4-2Т на базе иттербиевого волоконного лазера (рис. 8). Обработка поверхности образцов с использованием новой оптической системы

осуществлялась на рациональных режимах лазерной полировки выбранных в работе [5].

Исследование поверхности образцов проводилось при помощи портативного прибора MarSurfPS1 для прецизионного измерения шероховатости специалистами лаборатории кафедры МТ4 «Метрология и взаимозаменяемость» факультета Машиностроительные технологии МГТУ им. Н.Э. Баумана. Оценка шероховатости велась как в продольном (область А и В рис. 9), так и в поперечном (область Б и Г рис. 9) направлении до и после лазерной обработки, особое внимание так же предполагалось уделить зонам повторного нагрева (область Д рис. 9), которые возникали из-за наложения траекторий обработки поверхности.

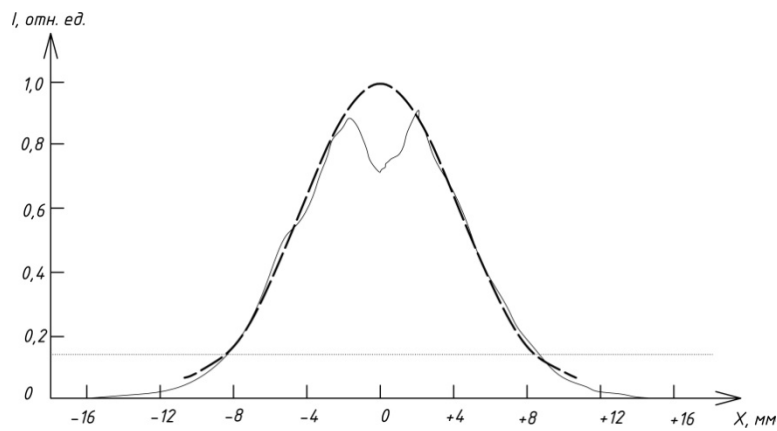


Рис. 5. Аппроксимация реального распределения интенсивности плотности мощности по сечению пучка коллиматора в программной среде Zemax

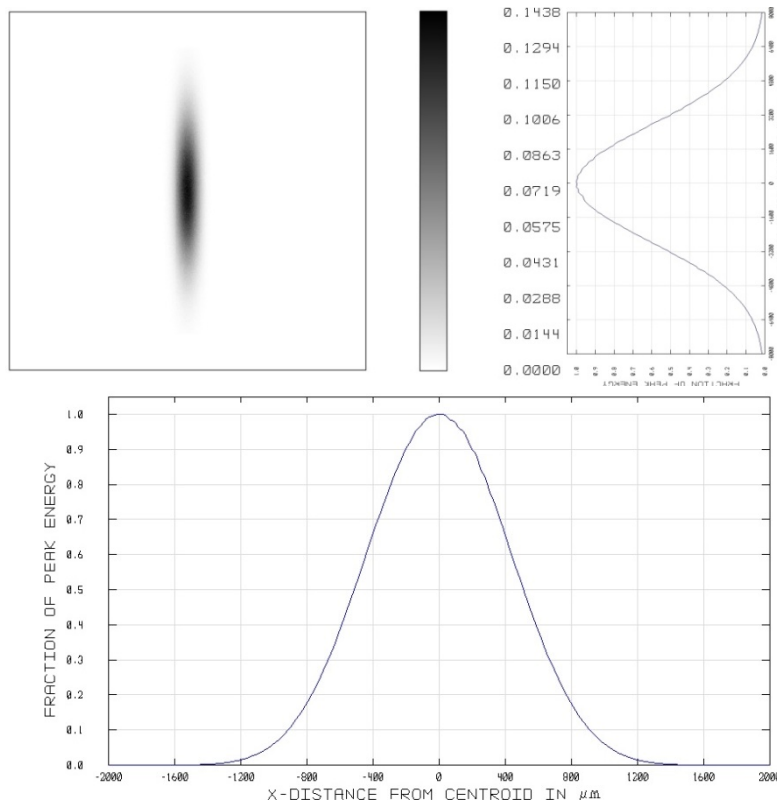


Рис. 6. Результаты моделирования в программной среде Zemax

Методика предполагала получение усредненного значения шероховатости поверхности по результатам измерения пяти базовых длин по 0,8 мм в каждой вышеописанной зоне. Результаты измерения шероховатости поверхности исследуемых образцов до и после обработки лазерным излучением приведены в табл. 3.

Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что шероховатость поверхности в продольном направлении после лазерной обработки улучшилась до 8 раз практически по всем представленным параметрам, в поперечном направлении шероховатость поверхности улучшилась до 10 раз по параметрам Ra , Rz , Rq и до 60 раз по параметрам R_{max} и Rt .

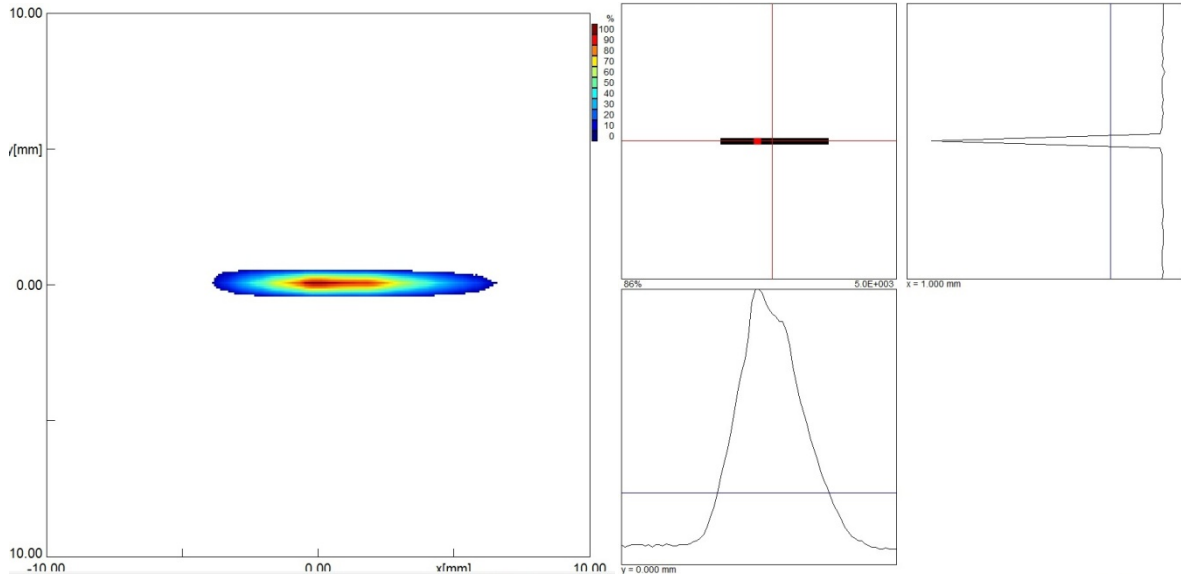


Рис. 7. Распределение плотности мощности излучения иттербиевого волоконного лазера в зоне обработки



Рис. 8. Станок для прецизионной лазерной обработки с интегрированной оптической системой для лазерной полировки

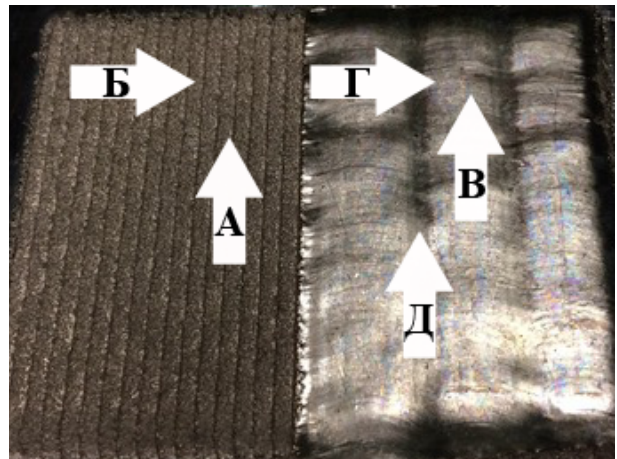


Рис. 9. Схема измерения шероховатости поверхности полученных образцов

3. Параметры шероховатости поверхности образца

№	Параметр шероховатости	До лазерной обработки		После лазерной обработки		
		Область А	Область Б	Область В	Область Г	Область Д
1	Ra , мкм	6,395	12,128	0,850	0,709	1,611
2	Rz , мкм	28,52	54,56	4,26	3,52	7,59
3	Rq , мкм	7,839	15,589	1,039	0,884	2,301
4	R_{max} , мкм	34,32	250,45	4,64	3,95	12,92
5	Rt , мкм	34,94	251,23	5,25	4,46	12,92

Шероховатость поверхности образца в зонах повторного нагрева ухудшается в 1,5–2 раза, относительно общей тенденции как в продольном, так и в поперечном направлении, следовательно, для равномерного характера распределения неровностей по поверхности образца в будущем следует выбирать стратегии обработки, которые позволят добиться минимального перекрытия траекторий обхода поверхности изделия.

Заключение

Разработана методика синтеза оптической системы лазерной головки и показана возможность описания многомодового пучка иттербиевого волоконного лазера в системе моделирования Zemax, которая обеспечивает её максимальную функциональность, минимальную стоимость изготовления и эксплуатации. Результаты моделирования с минимальной погрешностью менее 2 % сходятся с результатами, полученными при измерениях изготовленной оптической системы.

Данная методика учитывает комплекс оптических, технологических, конструктивных факторов, таких как обеспечение в рабочей зоне требуемых параметров лазерного пучка (диаметр перетяжки, длину перетяжки) и использование оптической системы с минимально возможным количеством линз.

Использование разработанной оптической системы волоконного лазера в технологии лазерной полировки переплавлением образца из нержавеющей стали марки 1540-00 показало себя эффективным образом. В перспективе данную оптическую систему также можно применять в технологических процессах лазерной наплавки и термообработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ширанков, А.Ф., Носов, П.А., Григорьянц, А.Г., Третьяков, Р.С., Самарин, П.Е. Разработка оптических систем для лазерной обработки на основе теории лазерной оптики // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2014. – № 5(35). – С. 37–48.

2. Холопов, А.А. Физико-технические особенности воздействия мощного волоконного лазера на алюминиевые сплавы при технологических процессах их обработки: дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2013. – 155 с.

3. Пат. RU 2488861. Способ измерения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера / Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Носов П.А., Ширанков А.Ф., Хорохоров А.М., Павлов В.Ю., Третьяков Р.С., Ставертий А.Я., Голубенко Ю.В. 2013.

4. Григорьянц, А.Г., Ставертий, А.Я., Третьяков, Р.С. Пятикоординатный комплекс для выращивания методом коаксиального лазерного плавления порошковых материалов // *Технология машиностроения*. – 2015. – №10. – С. 22–28.

5. Григорьянц, А.Г., Фунтиков, В.А., Третьяков, Р.С. Повышение качества поверхностных слоев деталей полученных лазерной аддитивной технологией // *Технология машиностроения*. – 2015. – № 10. – С. 68–73.

REFERENCES

1. Shirankov, A.F., Nosov, P.A., Grigoriyants, A.G., Tretiyakov, R.S., Samarin, P.E. Optic system development for laser treatment based on laser optics theory // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 5(35). – pp. 37–48.

2. Kholopov, A.A. *Physicotechnical Peculiarities of Powerful Fiber Laser Influence upon Aluminum Alloys at Technological Processes of Their Processing*: Thesis for Can.Eng. degree competition. Moscow. 2013. – pp. 155.

3. Pat. RU 2488861. *Method for Instability Diameter Measuring in Output Laser Beam at Fixed Distance from Laser* / Pakhomov I.I., Grigoriyants A.G., Nosov P.A., Shirankov A.F., Khorokhorov A.M., Pavlov V.Yu., Tretiyakov R.S., Staverty A.Ya., Golubenko Yu.V. 2013.

4. Grigoriyants, A.G., Staverty, A.Ya., Tretiyakov, R.S. Five-axis complex for growing by method of coaxial laser melting of powder materials // *Engineering Techniques*. – 2015. – №10. – pp. 22–28.

5. Grigoriyants, A.G., Funtikov, V.A., Tretiyakov, R.S. Quality increase in surface layers of parts manufactured through laser additive techniques // *Engineering Techniques*. – 2015. – № 10. – pp. 68–73.

Рецензент д.т.н. И.И. Артемов

УДК 621.763
DOI: 10.12737/21236

В.В. Васильцов, д.т.н., **Э.Н. Егоров**, инженер,
И.Н. Ильичев, м.н.с., **А.В. Соловьев**, инженер,
(Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,
140700, Россия, МО, г. Шатура, ул. Святоозерская, 1)
А.В. Богданов, к.т.н., **А.И. Мисюров**, к.т.н.,
Н.А. Смирнова, к.т.н.
(МГТУ им. Н.Э.Баумана, 105005, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1)
E-mail: v.vasiltsov@mail.ru; mtbmstu@mail.ru

Аддитивные лазерные технологии спекания металлических порошков для получения изделий авиационной и космической промышленности

Представлена отечественная лазерная технологическая установка для аддитивных лазерных технологий. Установка создана на базе мощного волноводного CO₂-лазера. Проведены эксперименты по спеканию жаропрочных сплавов для авиационной промышленности. Выполнены металлографические исследования полученных структур.

Ключевые слова: лазер; аддитивные технологии; технологический комплекс; металлические порошки; металлографический анализ.

V.V. Vasiltsov, D.Eng., **E.N. Yegorov**, Engineer,
I.N. Ilichyov, M.Sc., **A.V. Soloviyov**, Engineer,
(Institute of Problems of Laser and Information Techniques of RAS,
1, Svyatoozerskaya Str., Shatura, MR 140700, Russia)
A.V. Bogdanov, Can.Eng., **A.I. Misuyurov**, Can.Eng.,
N.A. Smirnova, Can.Eng.
(Bauman STU of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., 105005 Russia)

Additive laser techniques of metal powder fritting to manufacture products of aerospace industry

A domestic plant for additive techniques of different materials fritting is presented. The plant in its basis has a high-powered (up to 2.5 kW) waveguide CO₂-laser possessing a unique in the uniformity of emission power density distribution on a target. The results of nickel-based heat-resistant alloy fritting of TCNA-IVR, VZhL12U and VZh159 types developed for manufacturing complex contoured parts of gas turbine engines (GTE) by a method of layered laser alloying and for complex contoured parts GTE repair by a method of gas powder laser surfacing are shown. During laser remelting of these powders it is possible to grow a billet with a homogeneous fine-grain structure which manufacturing is impossible at common techniques of casting.

Keywords: additive techniques; technological complex; metal powders; metallographic analysis.

В настоящее время весьма интенсивно развиваются аддитивные лазерные технологии быстрого прототипирования. Одним из наиболее перспективных методов получения изделий сложной формы из широкого спектра порошков является селективная лазерная наплавка /селективное лазерное спекание СЛН/СЛС [1–5].

СЛН как перспективная, многообещающая технология позволяет осуществлять послойное нанесение материала, что дает возможность создавать 3D металлообъекты любой степени сложности. На основе СЛН появился новый способ лазерной обработки, предназначенный для создания однородных и прочных

деталей произвольной пространственной формы.

На практике СЛН технология синтеза материалов осуществляется как методом прямого сканирования лазерным лучом поверхности слоя частиц порошка, так и методом коаксиальной инжекции частиц в зону воздействия лазерного излучения (ЛИ).

В первом случае лазерный пучок не пересекается с потоком порошка, который заранее наносится на поверхность деталей (подложку) в виде слоя. При этом для получения металлических деталей со сложной геометрией используется компьютерное управление лазерным лучом,двигающимся над определенными

областями образца с нанесенным слоем порошка.

Трехмерная деталь, произведенная по технологии СЛН, представляет собой набор слоев, сплавленных из металлического порошка, и нанесенных последовательно один на другой. Технология СЛН в таком варианте становится похожей на лазерную стереолитографию, в которой используется полимеризация жидкого полимера под воздействием интенсивного ЛИ [2].

Во втором методе нанесения порошка, лазерный луч оплавляет изделие, образуя локальную микроскопическую ванну расплава [3–5]. Струей инертного транспортирующего газа (например, аргона) в расплав вдуваются частицы порошка. После смещения лазерного луча жидкий металл затвердевает, а за счет введенного в расплав порошка на поверхности изделия появляется локальное утолщение. Таким образом, в результате сканирования поверхности изделия лазерным лучом с одновременной инъекцией порошка формируется первый и все последующие слои синтезируемого объекта.

Метод СЛН с инъекцией порошков позволяет вести обработку изделий со значительной производительностью с минимальным проплавлением основы и термическим влиянием на деталь, с возможностью точного контроля режимов обработки, геометрических и физико-механических характеристик и высоким качеством наплавленных слоев.

Важным этапом является выбор оптимальных параметров обработки, как экспериментальным путем, так и методами математического моделирования, что позволит усовершенствовать процесс создания материалов с заданным комплексом требований.

Разработка комплекса аддитивных технологий на базе мощного CO₂-лазера

Экспериментальный лазерный комплекс СЛС (рис. 1) состоит из излучателя волноводного CO₂-лазера «Гибрид» со средней мощностью излучения до 2,5 кВт. Он имеет следующие технические характеристики: длина материала. волны излучения – 10,6 мкм; мощность излучения – 2500 Вт [6]; апертура – 45 мм; расходимость оси луча (полный угол на выходе сужающего телескопа, не более) ≥ 45 мрад; потребляемая электрическая мощность ≤ 25 кВт; главное преимущество – однородное (модуляция не более 8 %) распределение плотности мощности на мишени 3-координатного манипулятора,

внешнего оптического тракта, фокусирующих систем и систем подачи порошкового материала.

Имеется следующее программное обеспечение: программы управления 3-координатным столом; программы для послойного изготовления деталей сложного топологического профиля.



Рис. 1. Комплекс СЛС, (справа – технологическая кабина с работающими операторами; слева – выходящая часть лазера «Гибрид»)

Разработан, изготовлен и испытан фокусирующий блок с коаксиальным соплом для подачи порошка в зону спекания. На рис. 2 показан фокусирующий блок типа косегрен, позволяющий с большой надежностью транспортировать к изделию мощное, более 2 кВт излучение. На рис. 3 представлено коаксиальное сопло.

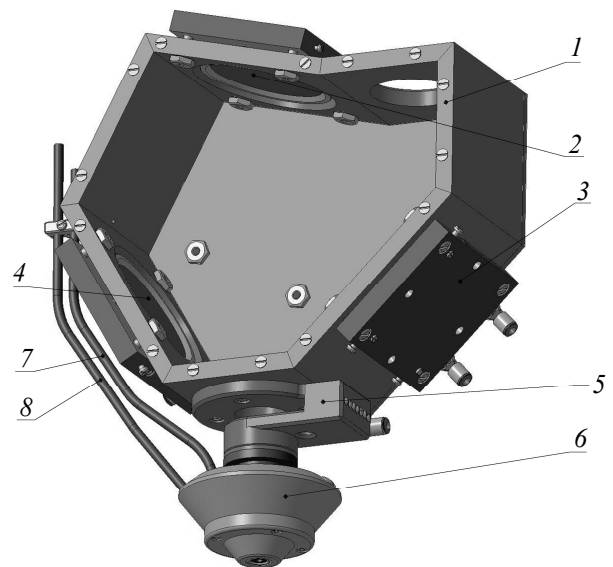


Рис. 2. Фокусирующий блок:

1 – корпус; 2 – зеркало вогнутое $R = 700$ мм; 3 – охладитель; 4 – зеркало плоское; 5 – переходник; 6 – сопло; 7 – трубка подвода порошка; 8 – трубка подвода газа

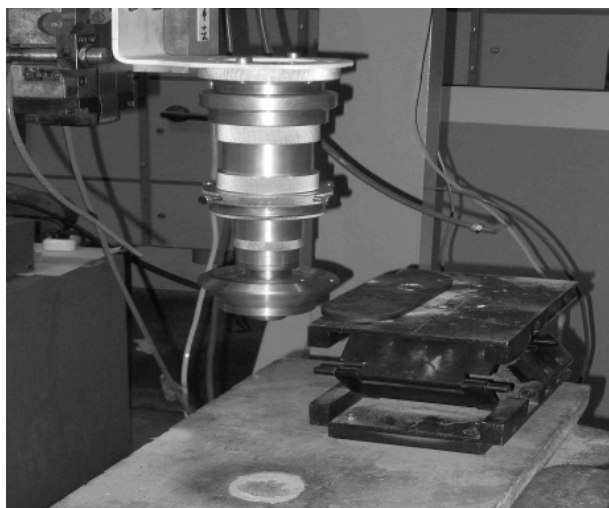


Рис. 3. Фотография коаксиального сопла (верхняя часть – фокусирующий блок с линзой, нижняя – коаксиальное сопло)

Экспериментальное исследование СЛС порошков для изготовления различных материалов

Рассмотрим наплавку материалов из порошков ВКНА -1ВР, ВЖЛ12У и ВЖ159 (Рис. 4).

Приведем химический состав:

ВКНА 1ВР: основа Ni, Al 8...9, Cr 5...6, Hf 0,4...0,6, Mo 2,5...4,5, Ti 1...2, W 2...4, Si ≤ 0,4, Fe ≤ 0,5;

ВЖЛ 12У: основа Ni, Co 5...14,5, Cr 9...10, Al 5,1...5,7, Ti 4,2...4,7, L₁₀ 2,7...3,4, V 0,5...1, Nb 0,5...1, W 1...1,8;

ВЖ 159: основа Ni, Al 1,25...1,55, Mo 7...8, Nb 2,5...3,5, Si ≤ 0,8, B ≤ 0,005, Fe ≤ 3,0, P ≤ 0,013, Mn ≤ 0,5, Mg ≤ 0,03.

Металлические порошки из жаропрочных сплавов на никелевой основе марки ВКНА 1ВР, ВЖЛ12У и ВЖ159 разработаны для изготовления сложнопрофильных деталей ГТД (газотурбинных двигателей) методом послойного лазерного сплавления и для ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки. По мнению ВИАМ, при лазерном переплаве данных порошков можно вырастить заготовку с однородной мелкозернистой структурой, получение которой при традиционных технологиях литья невозможно.

Анализ макрошлифов показывает, что на указанных режимах наблюдается удовлетворительное формирование отдельных наплавленных валиков. В качестве примера на рис. 5 показаны поперечные сечения валиков, полученных при переплаве порошка ВКНА1ВР.

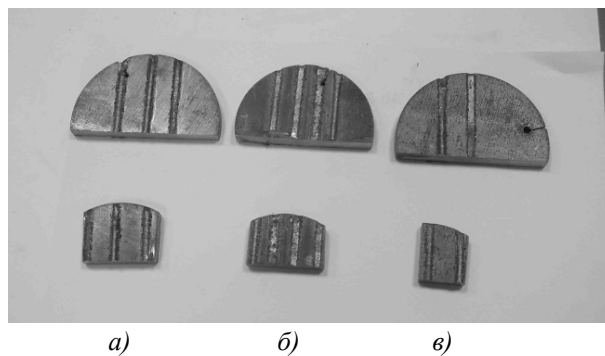
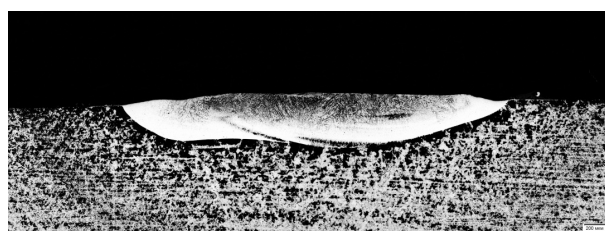


Рис. 4. Образцы наплавки порошков:

a – ВЖ159, скорость 4 мм/с, расход 8 г/мин, $P = 1,8$ кВт; *б* – ВКНА 1ВР, скорость 4 мм/с, расход 8 ...12 г/мин, $P = 1,8$ кВт; *в* – ВЖ 12У, скорость 4 мм/с, расход 8...12 г/мин, $P = 1,8$ кВт



a)



б)

Рис. 5. Поперечные сечения валиков, наплавленных порошком ВКНА 1ВР на различных скоростях: *a* – 2 мм/с; *б* – 6 мм/с

С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, глубина подплавления основы растет, а протяженность зоны термического влияния (ЗТВ) уменьшается (табл. 1).

1. Зависимости ширины, высоты валиков и глубины

Скорость наплавки, мм/с	Ширина, мм	Высота наплавки, мм	Глубина подплавления, мм	Максимальная по глубине ЗТВ, мкм
2	3,43	0,17	0,31	1476
4	3,23	0,14	0,36	1094
6	2,80	0,12	0,60	731

Второй и каждый последующий наплавленный валик формируется за счет перемешивания расплавленного металла предыдущего с металлом, полученным при плавлении порошка. Поэтому по мере увеличения количества валиков их химический состав стабилизируется. Для лазерной наплавки выравнивание состава происходит после выполнения 3 – 5 слоев. Исходя из этих соображений, анализ микроструктуры проводили в 3-м валике.

В литом наплавленном металле наблюдается ячеистая или ячеисто-дендритная транскристаллитная структура (рис. 6). Рост кристаллов происходит в направлении от подложки к поверхности. В микроструктуре литого металла многопроходного слоя не наблюдаются существенных отличий по сравнению с единичным валиком.

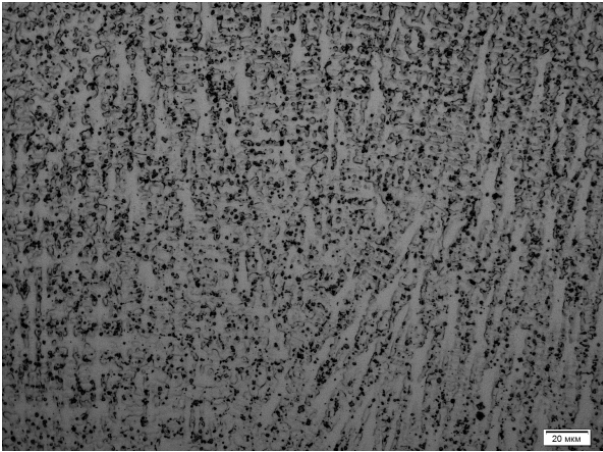


Рис. 6. Микроструктура наплавленного металла (валик, наплавленный порошком ВКНА 1ВР за три прохода на скорости 2 мм/с)

Рост твердой фазы начинается от оплавленных элементов структуры предыдущего наплавленного слоя. На линии сплавления между отдельными наплавленными валиками наблюдается рост твердой фазы от оплавленных элементов первичной структуры, что говорит об установлении прочной металлической связи между наплавленным металлом предыдущего и последующего валиков. На оптимальных режимах в многослойных наплавках не наблюдается снижения травимости зон сплавления последующего и предыдущего наплавленных валиков.

В месте контакта наплавленных валиков микротвердость не изменяется (рис. 7). Это свидетельствует о том, что в зоне термического влияния последующего валика диффузионные процессы не успевают развиваться из-за высоких скоростей нагрева и охлаждения при лазерном воздействии.

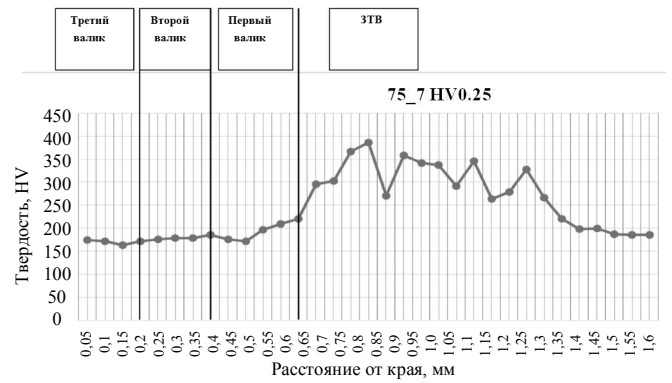


Рис. 7. Изменение микротвердости по высоте наплавленного слоя порошком ВКНА 1ВР за три прохода на скорости 2 мм/с

С увеличением скорости наплавки происходит измельчение элементов первичной структуры и появление ячеистых дендритов (рис. 8). Это свидетельствует о возрастании термодинамического переохлаждения, что полностью согласуется с современными представлениями о формировании первичной структуры в неравновесных условиях. Анализ литой структуры позволяет предположить повышение структурно-чувствительных свойств с ростом скорости наплавки, связанное с измельчением и «дендритизацией» первичной структуры.

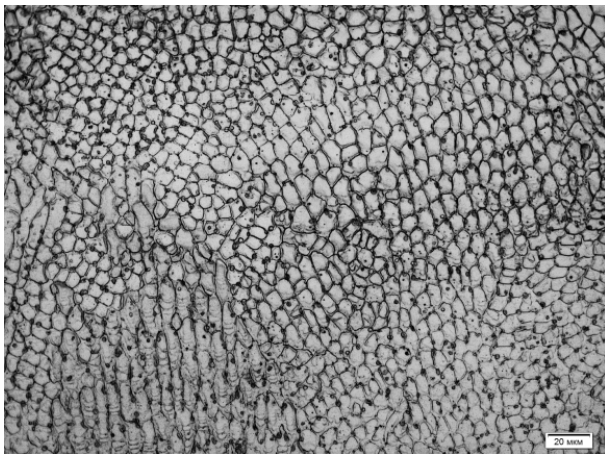
Уменьшение расхода порошка вызывает ее некоторое укрупнение и отклонение от ячеистого строения в сторону ячеистых дендритов (рис. 9). Значительного порообразования на металлографических шлифах не наблюдается. Первичная структура наплавленного металла имеет ячеисто-дендритное строение.

Исследование структуры металла, полученного переплавом порошка ВЖЛ 12У, и анализ макрошлифов наплавленных валиков показывает, что также как и при использовании порошка ВКНА 1ВР, наплавленные образцы имеют три ярко выраженные зоны.

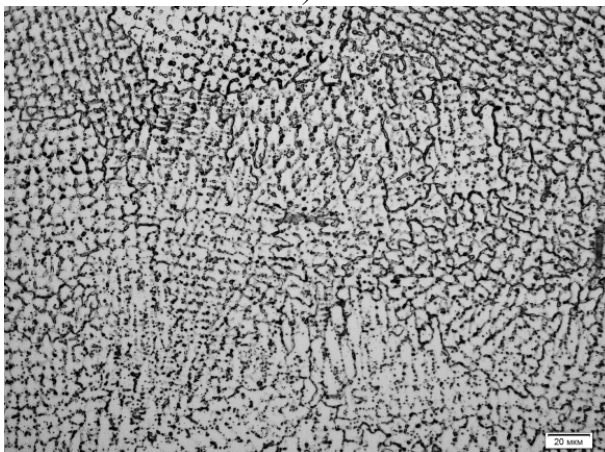
С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, а глубина подплавления основы растет. При наплавке единичного валика на подложку наблюдается укрупнение структуры в ЗТВ. С увеличением скорости наплавки протяженность ЗТВ уменьшается (табл. 2).

Исследование структуры металла, полученного переплавом порошка ВЖ 159, показало следующее. При изменении скорости наплавки порошком ВЖ 159 наблюдаются те же тенденции, что и при использовании порошков ВКНА 1ВР и ВЖЛ12У. Точно также наплавленные образцы, имеют три ярко выра-

женные зоны: литую зону, металл, подвергшийся термическому влиянию (ЗТВ), основной металл, не испытывавший теплового воздействия. С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, а глубина подплавления основы растет. При наплавке единичного валика на подложку наблюдается укрупнение структуры в ЗТВ, а с увеличением скорости наплавки протяженность ЗТВ уменьшается.



а)



б)

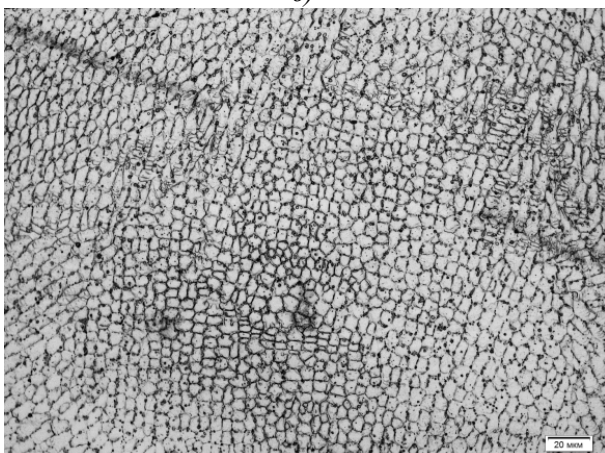
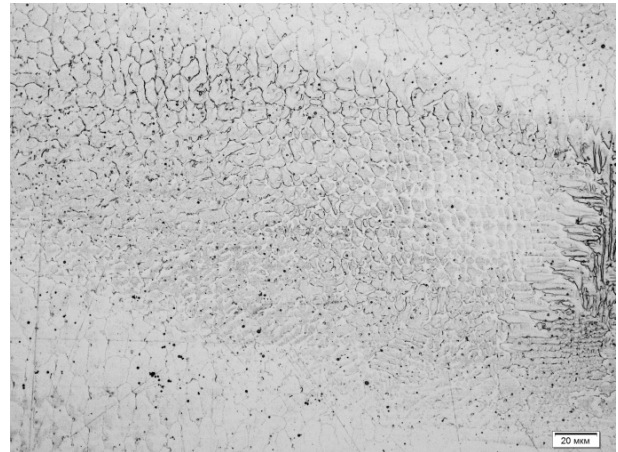
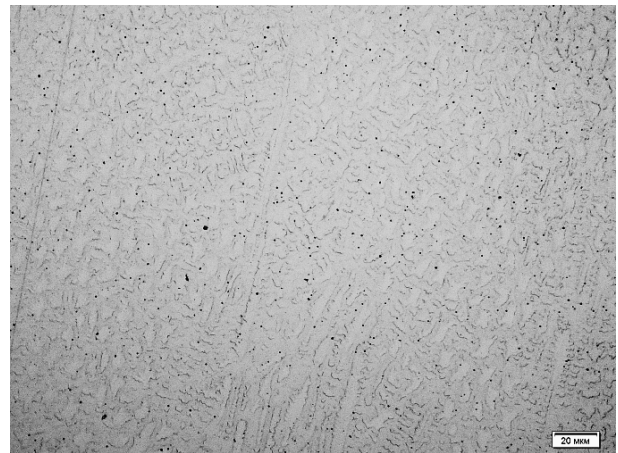


Рис. 8. Первичная структура литого металла валика, наплавленного порошком ВЖЛ 12У на различных скоростях:

а – 2 мм/с; б – 4 мм/с; в – 6 мм/с



а)



б)

Рис. 9. Влияние расхода порошка на формирование первичной структуры литого металла наплавленных валиков:

а – 11 г/мин; б – 8 г/мин

2. Скорость наплавки максимальная ЗТВ

Образец	Скорость наплавки, мм/с	Максимальная по глубине ЗТВ, мкм
Рис. 8,а	2	990
Рис. 8,б	4	850
Рис. 8,в	6	717

Выводы:

1. При лазерном переплаве порошков из жаропрочных сплавов на никелевой основе марок ВКНА 1ВР, ВЖЛ 12У и ВЖ 159 образуется прочноплотная структура, строение которой позволяет прогнозировать высокие структурно-чувствительные свойства. В литом металле отсутствуют поры и трещиноподобные дефекты. В микроструктуре литого металла многопроходного слоя не наблюдаются существенные отличия по сравнению с единственным валиком.

2. В распределении микротвердости по толщине наплавленного валика в ЗТВ имеется провал пластичности. Это может свидетельствовать о сравнительно мощном термическом воздействии на подложку в процессе наплавки, что следует учитывать при назначении режимов лазерной обработки в случае выращивания объемной детали. Поэтому в дальнейшей работе следует провести исследования с целью уточнения параметров лазерного излучения.

3. При выборе режима наплавки следует провести оптимизацию параметров процесса лазерной наплавки, так как наблюдается некоторое противоречие между объемом наплавленного металла, а, следовательно, производительностью процесса, и предполагаемыми свойствами литого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панченко, В.Я., Васильцов, В.В., Грезев, А.Н., Галушкин, М.Г., Егоров, Э.Н., Ильичев, И.Н., Мисюров, А.И., Павлов, М.Н., Соловьев, А.В. Лазерное спекание металлических порошков для изготовления изделий машиностроения с градиентными свойствами // Сварочное производство. – 2011. № 12. – С. 10–14.

2. Евсеев, А.В., Новиков, М.М., Панченко, В.Я., Низьев, В.Г., Васильцов, В.В. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под. ред. акад. В.Я. Панченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с. – ISBN 078-5-9221-1023-5. С. 333–397.

3. Васильцов, В.В., Галушкин, М.Г., Ильичев, И.Н., Мисюров, А.И., Панченко, В.Я. Послойная лазерная наплавка металлических порошков: аналитическая теория и эксперимент // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. № 5. – С. 69–77.

4. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilchev I.N., Misyurov A.I. Main Thermophysical Processes in Laser Beam Buildur Welding of Metal Powders// ISSN№2075-1133, Inorganic Materials: Applied Reseaech. 2014, Vol.5, № 3. pp.199-203. Pleiades Publishing, Lid., 2014.

5. Панченко, В.Я., Александров В.О., Васильцов, В.В., Галушкин, М.Г., Егоров, Э.Н., Соловьев, А.В., Ильичев, И.Н., Лебедев, Ф.В., Низьев, В.Г. Разработка оборудования и технологии селективного лазерного спекания (СЛС). Современные лазерно-информационные технологии: Колл. монография под ред. акад. В.Я. Панченко и проф. Ф.В. Лебедева. М.: Интерконтакт Наука, 2015. 959 с. стр. 324-348.

6. Пат. N 2410810 к заявке N 200814949496. Александров В.О., Васильцов В.В., Панченко В.Я. Электроразрядный многоканальный лазер с диффузионным охлаждением рабочей смеси, приоритет 15.12.2008, зарегистрирован 27.01.2011. Срок действия 15.12.2028.

REFERENCES

1. Pancheko, V.Ya., Vasiltsov, V.V., Grezev, A.N., Galushkin, M.G., Yegorov, E.N., Ilichyov, I.N., Misyurov, A.I., Pavlov, M.N., Soloviyov, A.V. Laser metal powder fritting for manufacturing engineering parts with gradient properties // *Welding Engineering*. – 2011. № 12. – pp. 10–14.

2. Yevseyev, A.V., Novikov, M.M., Panchenko, V.Ya., Niziyev, V.G., Vasiltsov, V.V. *Laser Techniques of Quick Prototyping and Direct Fabrication of 3D Objects. Laser Techniques of Material Processing: Modern Problems of Fundamental Researches and Applied Developments* / under the editorship of Acad. V.Ya. Panchenko. M.: FIZMATLIT, 2009. – pp. 664. – ISBN 078-5-9221-1023-5. pp. 333–397.

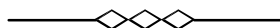
3. Vasiltsov, V.V., Galushkin, M.G., Ilichyov, I.N., Misyurov, A.I., Panchenko, V.Ya. Layered laser surfacing of metal powders: analytical theory and experiment // *Bulletin of Bauman STU of Moscow*. – 2012. № 5. – pp. 69–77.

4. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilchev I.N., Misyurov A.I. Main Thermophysical Processes in Laser Beam Build Welding of Metal Powders// ISSN№2075-1133, Inorganic Materials: Applied Research. 2014, Vol.5, № 3. pp.199-203. Pleiades Publishing, Ltd., 2014.

5. Panchenko, V.Ya., Александров В.О., Vasiltsov, V.V., Galushkin, M.G., Yegorov, E.N., Soloviyov, A.V., Ilichyov, I.N., Lebedev, F.V., Niziyev, V.G. *Development of Equipment and Techniques for Selective Laser Sintering (SLS), Modern Laser-Information Techniques*: collective monograph under the editorship of Acad. V.Ya. Panchenko and Prof. F.V. Lebedev. M.: Intercontact Science, 2015. 959 с. pp. 324-348.

6. Pat. N 2410810 to application N 200814949496. Александров В.О., Vasiltsov V.V., Panchenko V.Ya. Sputterion multichannel laser with diffusion cooling of working mixture, priority 15.12.2008, registered 27.01.2011. Period of validity 15.12.2028.

Рецензент к.т.н.Т.В. Тарасова



УДК 621.78
DOI: 10.12737/21237

А.В. Богданов, к.т.н.
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва),
Н.В. Грезев к.т.н., **С.А. Шмелев**, инженер
(ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино),
М.А. Мурзаков, инженер,
Ю.В. Маркушов, ведущий инженер
(НИЯУ МИФИ, Москва, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино)
E-mail: mtbmstu@mail.ru

Упрочнение колесной стали волоконными лазерами

Приведены результаты исследования процесса лазерного упрочнения колесной стали марки 2, а также сравнение технологии лазерного и плазменного упрочнения для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес. Для данной задачи рекомендуется использование волоконного лазера.

Ключевые слова: волоконный лазер; упрочнение; колесная сталь; технология; износостойкость; контактно-усталостная прочность.

A.V. Bogdanov, Can.Eng.
(Bauman STU of Moscow)
N.V. Grezev, Can.Eng., **S.A. Shmelyov**, Engineer,
(Moscow ST Co. "IRE-Polyus" Fryazino, Moscow Region),
M.A. Murzakov, Engineer,
Yu.V. Markushov, Principal engineer
(SRNU MEPU, Moscow, ST Co. "IRE-Polyus", Fryazino, Moscow Region)

Wheel steel strengthening with fiber lasers

At present time in Russia under conditions of a stable industrial growth the effectiveness of railway transport work obtains importance. One of the basic expense items of "RR" Co. ("Russian Railways" Company) is connected with the intensive wear problem of contact surfaces in wheel pairs at the interaction with a railway surface. In the railway system of Russia there are used many ways for the solution of this problem such as friction constant decrease – lubrication, wear-resistance increase in wheel pairs at the expense of various methods use for surface strengthening and other methods.

The authors offer for the strengthening problem solution to use fiber lasers the application of which gives a number of incontestable advantages in comparison with common methods of material processing: a controllability of a strengthened layer depth, a possibility of surface local working and others. Today the demand for laser techniques grows actively because, in the opinion of authors, fiber lasers give a considerably higher result in comparison with common methods of processing.

Keywords: fiber laser; strengthening; wheel steel; technique; wear-resistance; contact-fatigue strength.

В настоящее время снижение износостойкости и контактно-усталостной прочности локомотивных и вагонных колесных пар является одной из основных проблем железнодорожной отрасли [1]. Множество факторов в той или иной степени влияют на боковой износ железнодорожных колес. Называется до 50 различных причин, суммарно приведших к повышению бокового износа гребней железнодорожных колес [2].

Особую остроту данная проблема приобре-

ла во второй половине XX века в период уменьшения ширины колеи, замены подшипников качения на подшпипники скольжения в буксовых узлах, применения гребнесмазывания, повышения нагрузки на ось, увеличения объемов перевозок и т.д. Сегодня на сети железных дорог России применяется множество различных способов решения данной проблемы. Рассмотрим более подробно некоторые пути снижения интенсивного износа рабочих поверхностей колес подвижного состава.

Плазменная технология упрочнения гребней колесных пар является одной из наиболее распространенных в России. На предприятиях ОАО «РЖД» внедрено около 90 установок плазменного упрочнения. В работоспособном состоянии из них поддерживается около 70 [3]. Принцип технологии плазменного упрочнения состоит в использовании многокомпонентного высокотемпературного потока продуктов сгорания метана. При использовании технологии плазменного упрочнения в области воздействия источника плазмы на обрабатываемую поверхность образуются зоны с высокими растягивающими остаточными напряжениями [4].

Очевидно, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на надежность железнодорожных деталей и узлов в процессе эксплуатации. При наличии в приповерхностных слоях деталей высоких остаточных напряжений, во время движения подвижного состава вероятно их суммирование с внешними знакопеременными, либо с напряжениями, вносимыми в изделие при их производстве, что, в свою очередь, может приводить к возникновению дефектов контактно-усталостного происхождения, таких как трещины, выщербины, сколы и т.д. [2, 5].

В последние 10 лет на рынке появились мощные волоконные лазеры мульткиловаттного диапазона, которые произвели настоящую революцию в области обработки материалов. Уже сегодня многие промышленные лидеры производственного сектора сделали выбор в пользу волоконных лазеров [6, 11]. По мнению авторов, именно упрочнение с использованием волоконных лазеров должно в будущем быть использовано для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колесных пар.

Лазерная поверхностная обработка имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными способами упрочнения материалов: низкий уровень напряжений и деформаций, вносимых в изделие; высокая скорость обработки; возможность обработки на большую глубину; низкие затраты на обслуживание оборудования; возможность локальной обработки поверхности; возможность осуществлять термообработку без нанесения поглощающих покрытий; компактные размеры лазерного оборудования; отсутствие необходимости в применении газовых смесей; передача излучения по транспортному волокну без юстировки.

Принцип термообработки с использованием волоконных лазеров схож с традиционными процессами термообработки. Как показано на рис. 1, нагрев до температуры выше критической происходит энергией расфокусированного лазерного луча, перемещаемого по поверхности заготовки.

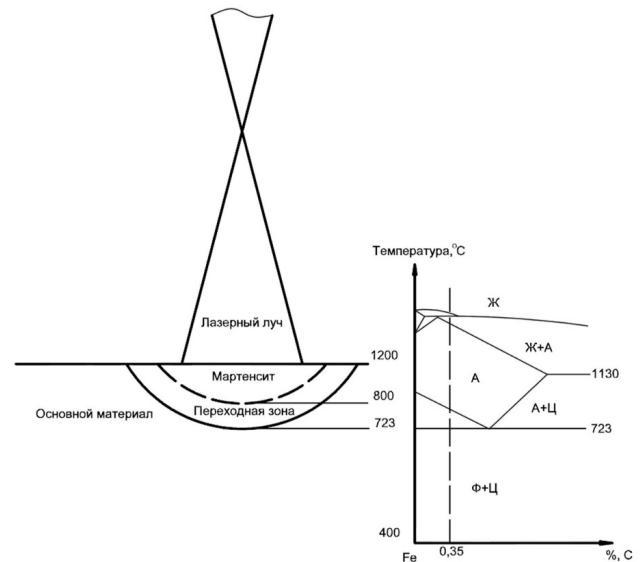


Рис. 1. Механизм лазерной термообработки

На этой стадии происходит фазовое превращение из феррита в аустенит. Далее происходит быстрый теплоотвод за счет основного материала изделия, что приводит к образованию аустенита в мартенсит. Кристалл мартенсита образуется в пределах зерна аустенита и не переходит границу между его зернами. Получаемая структура обладает высокой твердостью и повышенной износостойкостью.

Высокая твердость углеродистых сталей со структурой мартенсит достигается вследствие искажений кристаллической решетки пересыщенного твердого раствора вследствие внедрения атомов углерода [7]. Результат лазерной термообработки – повышение износостойкости и контактно-усталостной прочности обработанной детали в несколько раз [8].

По мнению авторов лазерная термообработка в железнодорожной сфере может быть эффективна не только для решения задачи повышения прочностных характеристик в рамках трибосистемы «колесо–рельс». Возможные применения лазерной термообработки в промышленных циклах ОАО «РЖД» – это упрочнение надрессорных балок и боковин тележек грузовых вагонов в зоне пятниковых узлов и в зонах буксовых проемов соответственно; упрочнение фрикционных клиньев вагонов, гильз цилиндров тепловозов.

Кроме того, одно из возможных применений лазерного оборудования для ОАО «РЖД» – это закалка стыков рельс после алюминотермитной сварки. Данный способ может предупредить образование характерных дефектов рельса, сваренного алюминотермитным способом – седловин, которые, в свою очередь, образуются при контактном взаимодействии с колесом.

В настоящее время в ОАО «РЖД» задача упрочнения поверхности колесных пар решается с учетом ТУ 0943-218-01124323-2006 «Бандажные колеса с термическим упрочнением гребня».

Экспериментальная часть

Работа проводилась в центре лазерных технологий ООО НТО «ИРЭ-Полус» в г. Фрязино. Для выполнения поставленной задачи было использовано следующее оборудование: лазер ЛС-10 (НЛС-8, 100 мкм); робот KR 60 НА; оптическая голова IPG, коллиматор 160 мм, фокус 500 мм [10](рис. 2).

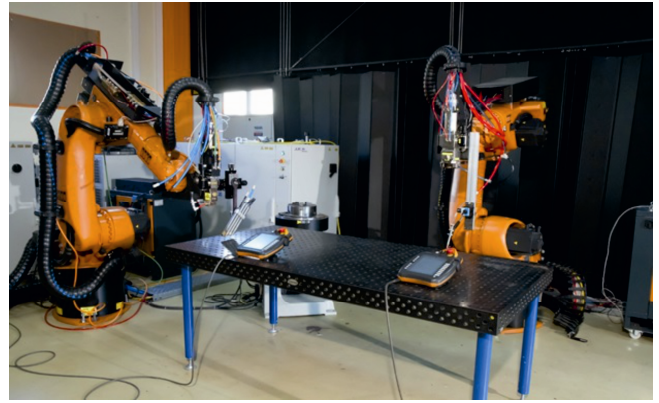


Рис. 2. Внешний вид станда для обработки лазерных технологий

Предварительные измерения микротвердости проводились на приборе Piccolo 2. Измерения микротвердости на шлифах проводились микротвердометром модели DURASCAN-70. Подбор режима лазерной термообработки производился на колесной стали марки 2, химический состав которой приведен в табл. 1.

1. Химический состав, %, колесной стали марки 2

Углерод	Марганец	Кремний	Ванадий	Сера	Фосфор	Хром	Никель	Медь
0,55...0,63	0,50...0,90	0,22...0,45	до 0,10	до 0,025	до 0,03	до 0,30	до 0,30	до 0,30

Проведенные эксперименты позволили оптимизировать оптимальные технологические параметры для лазерной термообработки колесной стали. Мощность лазерного излучения при подборе оптимального режима варьировалась от 2 до 10 кВт, скорость термообработки от 10 до 800 мм/с, диаметр пятна от 5,8 до 14,5 мм, а плотность мощности находилась в интервале от 12 до 168 МВт/м².

На режимах 1 – 9 с высокой скоростью обработки 200...800 мм/с глубина упрочненного слоя варьируется в пределах 0,1...0,3 мм. Без оплавления поверхности глубина упрочнения составила 0,2 мм (рис. 3). На режимах 10 – 14 со скоростью обработки 5... 50 мм/с глубина упрочненного слоя составила 0,5...1,0 мм. Без оплавления поверхности глубина упрочнения составила 0,8 мм. Согласно подобранному режиму был поставлен эксперимент по поверхностному упрочнению колесной стали марки 2. В табл. 2 представлены рабочие режимы термообработки колесной стали марки 2.

В табл. 3 представлен общий вид дорожек после лазерного упрочнения.

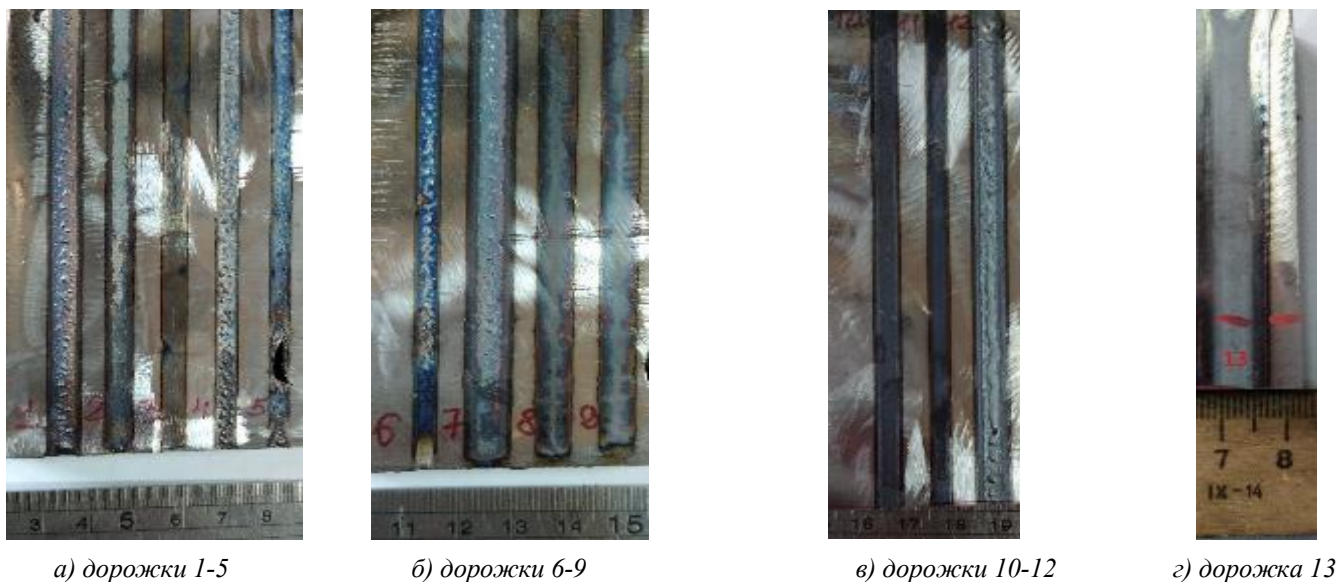
Результаты экспериментов

На рис. 4 и 5 представлены результаты из

мерений микротвердости и глубины упрочнения при различных позициях расфокусирования луча соответственно. Наблюдается тенденция спада микротвердости и глубины упрочнения при увеличении расфокусирования лазерного пятна. В среднем, на каждые 50 мм расфокусирования глубина упрочнения падает на 200 мкм. Оплавление поверхности наблюдалось на режимах при расфокусировании 150, 200, 250 мм, поэтому в качестве отправной точки для следующего эксперимента выбран фокус 300 мм.

На рис. 6 и 7 представлены результаты измерений микротвердости и глубины упрочнения при различной мощности лазерного излучения соответственно. Наблюдается тенденция спада глубины упрочнения при уменьшении мощности. В среднем при уменьшении мощности на 1 кВт, глубина упрочнения уменьшается на 250 мкм.

Исходя из результатов экспериментов, выбран наиболее оптимальный режим термоупрочнения для данной колесной стали. На рис. 7 показаны результаты измерения микротвердости оптимального образца: нагрузка 100 г; шаг измерения 100 мкм; измерения проводились согласно ГОСТ 9450-76.

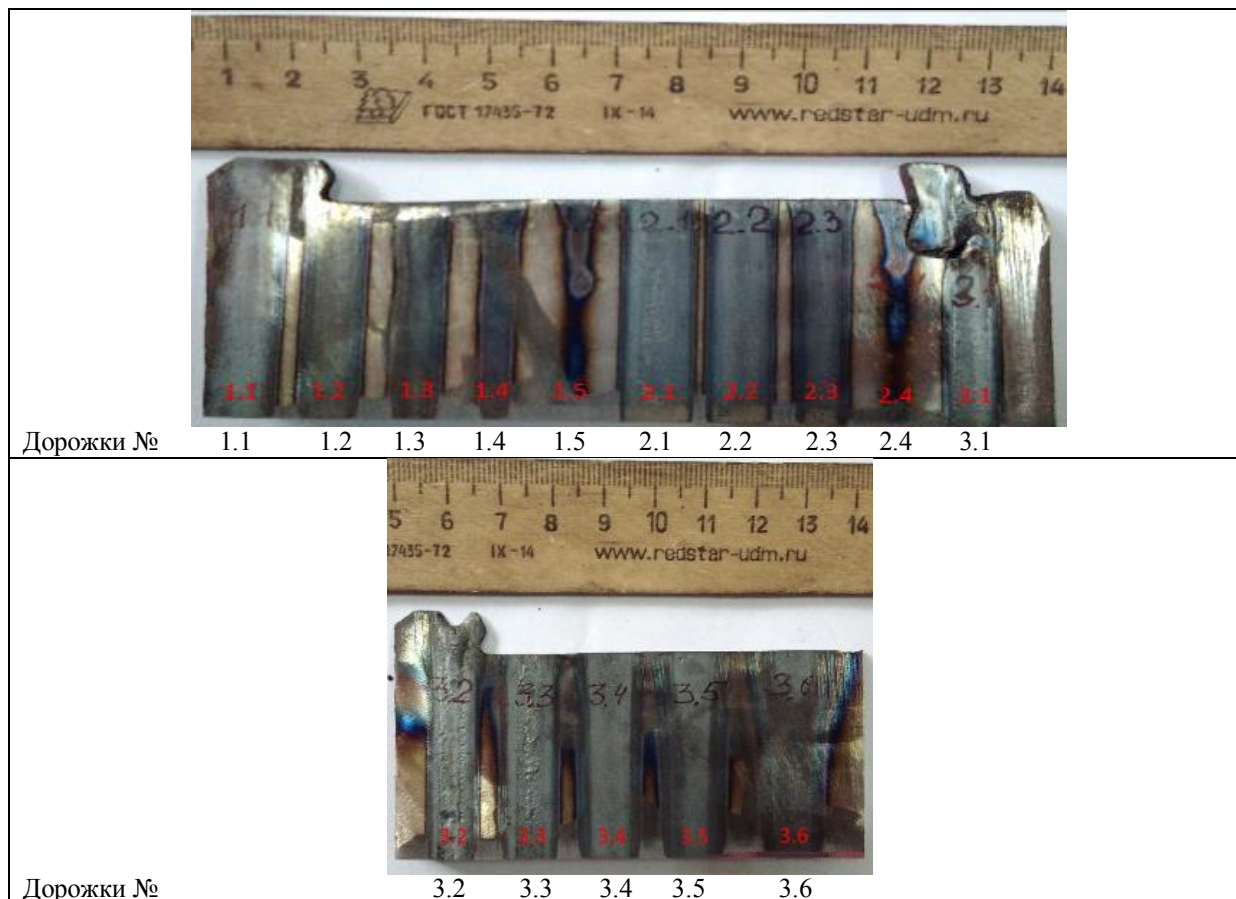


а) дорожки 1-5 б) дорожки 6-9 в) дорожки 10-12 г) дорожка 13
Рис. 3. Внешний вид дорожек после упрочнения волоконным лазером

2. Рабочие режимы термообработки колесной стали марки 2

№	Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Диаметр пятна, мм	Примечание
1	5000	25	17,3	Поверхностная твердость после ЛТО лежит в диапазоне от 750 до 850 НВ, что выше твердости основного металла в 2,9 – 3,3 раза. Глубина упрочненного слоя без оплавления поверхности составила 1,1 и 1,0 мм соответственно.
2	4000	25	17,3	

3. Общий вид полученных дорожек после лазерного упрочнения



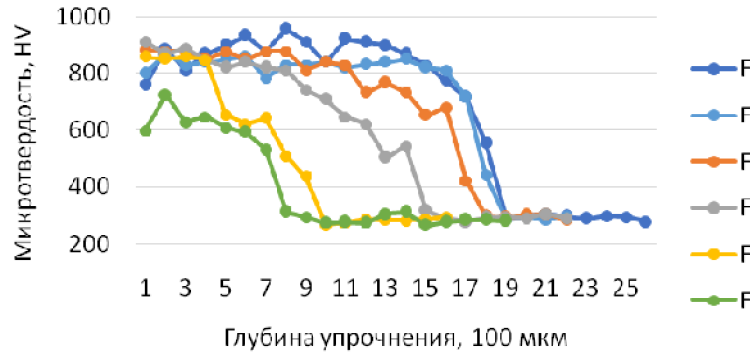


Рис. 4. Изменение микротвердости от поверхности вглубь металла в зависимости от различного положения фокусного расстояния



Рис. 5. Изменение глубины упрочнения (HV > 650) для образцов 3.1 - 3.6 в зависимости от величины расфокусирования лазерного пятна

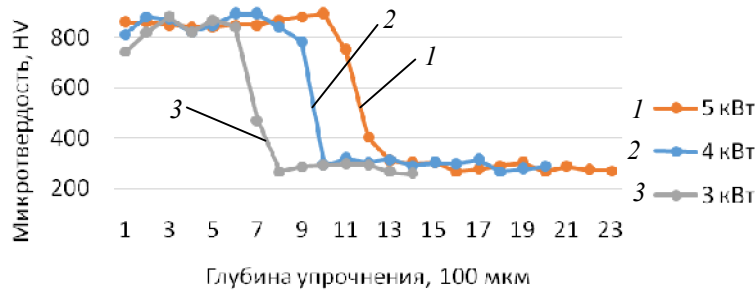


Рис. 6. Изменение микротвердости от поверхности вглубь металла в зависимости от различной мощности лазерного излучения



Рис.7. Микротвердость оптимального образца, полученного на следующем режиме: скорость обработки 25 мм/с; мощность лазерного излучения 5 кВт; ширина обработки 10 мм; плотность мощности 21 МВт/м²

Замечено, что с уменьшением скорости обработки увеличивается глубина упрочнения без оплавления поверхности. Поверхностная микротвердость лежит в диапазоне от 750 до 850 HV, что выше твердости основного металла в 2,9 – 3,3 раза. Глубина упрочненного слоя на оптимальном режиме без оплавления поверхности составила 1,1 мм. При этом, плотность мощности на данных режимах составила $2,1 \times 10^3$ Вт/см².

Согласно [8] критическая плотность мощности при использовании CO₂ лазера, выше которой происходит оплавление поверхности для различных сталей лежит в диапазоне $(2 \dots 6) \times 10^4$ Вт/см². Глубина упрочненного слоя при этом не превышает 0,1...0,15 мм. При использовании волоконного лазера для термообработки колесной стали удалось добиться глубины упрочненного слоя более 1 мм при плотности мощности на порядок меньшей,

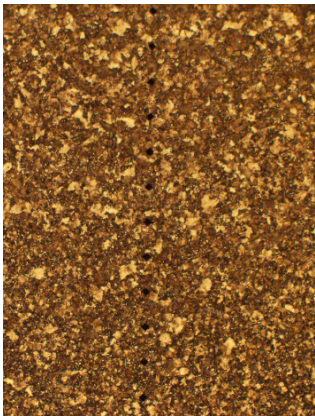
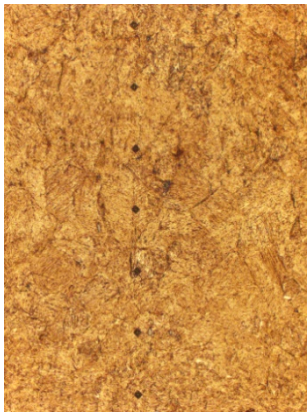
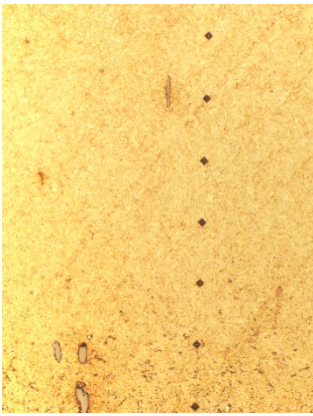




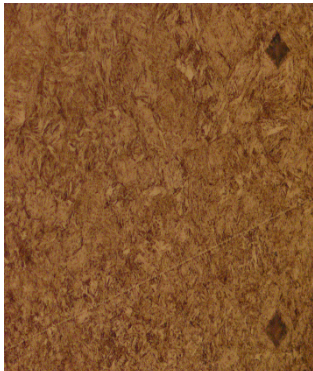
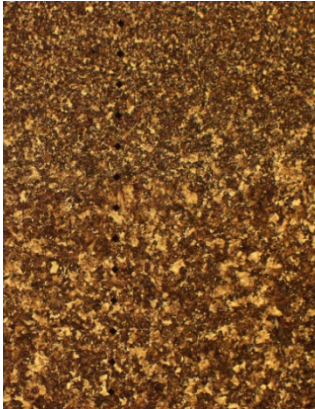
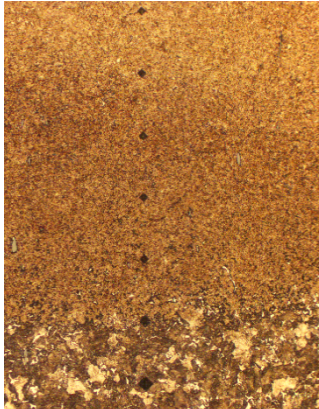
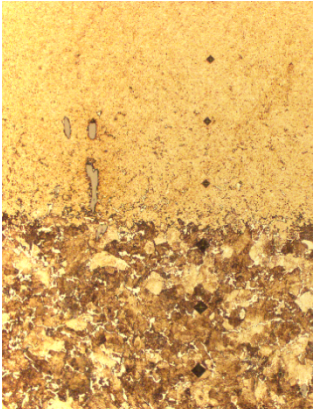
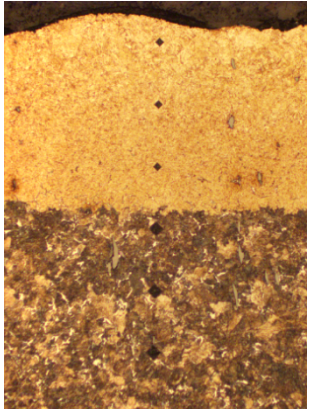
чем при использовании CO₂ лазера.

Исследование микроструктуры

Из табл. 4 видно, что с увеличением скорости термообработки структура закаленного слоя становится более мелкодисперсной, что

положительно влияет на прочностные характеристики упрочненного слоя [7]. Кроме того, можно увидеть микроструктуру упрочнения на скорости 1 мм/с, микротвердость составляет 400 HV, что обусловлено одновременным закаливанием и отпуском закалочной структуры.

4. Сравнение микроструктур упрочнения на различных скоростях

Скорость обработки 1 мм/с	Скорость обработки 10 мм/с	Скорость обработки 25 мм/с	Скорость обработки 200 мм/с
Увеличение ×200			
			
Увеличение ×1000			
			
Граница перехода «Упрочнение-ОМ» ×200			
			

Сравнительный анализ лазерного и плазменного упрочнения

Опираясь на научную статью [9], выполнен сравнительный анализ термообработки колесной стали с использованием лазерной и плазменной установки.

Табл. 5 показывает, что скорости лазерной термообработки увеличиваются более чем в 3,5 раза, а требования по значениям микротвердости соответствуют ТУ 0943-218-01124323-2006 «Бандажные колеса с термическим упрочнением гребня».

5. Сравнительный анализ лазерного и плазменного упрочнения

Лазерное упрочнение круглым пятном	Плазменное упрочнение
Скорость обработки – 25 мм/с	Скорость обработки – 7 мм/с
Глубина упрочнения – 1,1 мм	Глубина упрочнения – 0,9 мм
Величина микротвердости – 750...850 HV	Величина микротвердости – 1600...1000 HV
Ширина полосы упрочнения за один проход – 10 мм	Ширина полосы упрочнения за один проход – 25 мм
Защитный газ – не используется	Защитный газ – азот. Расход – 5 л/мин
Рабочая мощность источника: 5 кВт	Рабочая мощность источника: 35 кВт
Площадь установки: 4 м ²	Площадь установки: 40 м ²

Для увеличения ширины упрочненного слоя необходимо провести дополнительные эксперименты используя оптическую систему, дающую в фокальной плоскости прямоугольную, либо линейную развертку.

Для получения ширины упрочнения 30 мм, согласно ТУ 0943-218-01124323-2006 за один проход необходимо проведение работ по лазерному упрочнению линейной разверткой с использованием специальной оптической системы.

Заключение

Указанную систему возможно изготовить на базе гомогенизатора с использованием растра цилиндрических линз, цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призме Френеля, системы трансформации лазерного пучка Pi-Sharp и др. Поскольку на этапе изготовления локомотивных и вагонных колес в изделия вносятся различные остаточные напряжения, для определения вида обрабатываемых колесных пар необходимо исследование остаточных напряжений после лазерной термообработки.

1. Исследования показали возможность использования волоконных лазеров для упрочнения колесной стали марки 2. Проведен эксперимент по лазерному упрочнению колесной стали 2. Подобраны технологические параметры обработки без оплавления поверхности, которые выглядят следующим образом: мощность – 4...5 кВт; скорость – 25 мм/с; диаметр пятна – 17 мм. Поверхностная микротвердость на оптимальных режимах лежит в диапазоне 750...850 HV, что выше твердости основного металла в 2,9 – 3,3 раза. Глубина упрочненного слоя без оплавления поверхности составила 1,1 и 1,0 мм. При этом плотности мощности на данных режимах составили $2,1 \times 10^3$ Вт/см² и $1,68 \times 10^3$ Вт/см² соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

2. Выявлена тенденция изменения микротвердости и глубины проплавления в зависимости от расфокусирования лазерного пятна.

1. Балдин, В.Л., Буйносов, А.П., Тихонов, В.А. Повышение долговечности колесных пар за счет упрочнения гребней бандажей локомотивов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 5. – С. 57–60.

3. Выявлена тенденция изменения микротвердости и глубины проплавления в зависимости от мощности лазерного излучения.

2. Марков, Д.П. Закалка гребней колес подвижного состава на высокую твердость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 1. – С. 36–42.

4. Выполнен сравнительный анализ лазерного и плазменного упрочнения, (см. табл. 5). Скорости лазерной термообработки, по сравнению с плазменной, увеличиваются более чем в 3,5 раза.

3. Петров, С.Ю., Костюкевич, А.И., Рябов, А.А. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар // Мир транспорта. – 2013. – №2.

4. Киселев, С.Н., Саврухин, А.В., Кузьмина, Г.Д. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное и структурное состояние гребней бандажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. – №6. – С.9–17.

5. Буйносов, А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения // Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. – 2009.

6. 100 kW CW fiber laser for industrial applications // Gaponov, V.; Shcherbakov, E.; Abramov, A. Laser Optics, 2014 International Conference Saint Petersburg, Russia.

7. Тарасов, В.В., Малышко, С.Б. Лабораторный практикум по материаловедению: учеб. пособ. – Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2003. – 117 с.

8. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюрлов, А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособ. для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 665 с.

9. Богомолов, А. В., Канаев, А.Т. Плазменная технология упрочнения гребней локомотивных колесных пар // Инновации в материаловедении и металлургии : Матер. I междунар. интерактив. науч.-практ. конф. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 38–43.

10. Богданов, А.В., Голубенко, Ю.В. Волоконные технологические лазеры и их применение. – СПб. : Лань, 2016. – 208 с.

11. Богданов, Ю. А.В., Грезев, Н.В., Шмелев, С.А. Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №6(48). – С. 30-34.

REFERENCES

1. Baldin, V.L., Buinosov, A.P., Tikhonov, V.A. Wheelset life increase through locomotive tread flange strengthening // *Bulletin of Transport of Volga Region*. – 2011. – №. 5. – pp. 57–60.

2. Markov, D.P. Wheel flange tempering of rolling-stock for high hardness to reduce side wear // *Bulletin of ARRIRT*. – 1997. – №. 1. – pp. 36–42.

3. Petrov, S.Yu., Kostyukevich, A.I., Ryabov, A.A. Flange strengthening and wheelset wear decrease // *World of Transport*. – 2013. – №2.

4. Kiselyov, S.N., Savrukhin, A.V., Kuzmina, G.D. Plasma processing effect upon deflected mode and structure state of locomotive wheel tread flanges // *Welding Engineering*. – 2001. – №6. – pp. 9–17.

5. Buinosov, A.P. *Basic Reasons of Intensive Wear of Wheelset Treads in Rolling-Stock and Methods for Their Elimination* // Ekaterinburg: Publishing House of UrSUC. – 2009.

6. 100 kW CW fiber laser for industrial applications // Gaponov, V.; Shcherbakov, E.; Abramov, A. Laser Optics, 2014 International Conference Saint Petersburg, Russia.

7. Tarasov, V.V., Malysheko, S.B. *Laboratory Training on Material Science: Manual* – Vladivostok: Admiral Nevelsky MSU, 2003. – pp. 117.

8. Grigoriyants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes in Laser Processing: Manual for Colleges / under the editorship of A.G. Grigoriyants*. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2006. – pp. 665.

9. Bogomolov, A. V., Kanaev, A. T. Plasma techniques in locomotive wheelset flange strengthening // *Innovations in Material Science and Metallurgy : Proceedings of the 1-st Inter. Scient. Pract. Conf. – Ekaterinburg* : Publishing House of Urals Uni., 2012. – Part. 1. – pp. 38–43.

10. Bogdanov, A.V., Golubenko, Yu.V. *Fiber Technological Lasers and Their Application*. – S-Pb.: Lan, 2016. – pp. 208.

11. Bogdanov, A.V., Grezev, N.V., Shmelyov, S.A. Fiber laser application for increase of wear-resistance and contact-fatigue strength of railway wheels // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №6(48). – pp. 30-34.

Рецензент д.т.н. А.О. Горленко

УДК 37(09) 84/6(970)
DOI: 10.12737/21238

И.Е. Малов, к.т.н.
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5)
E-mail: ltrp@mail.ru

Исследование процессов окислительной полимеризации при высоких скоростях иницирования в технологии лазерной стереолитографии

Статья посвящена исследованию полимеризационных процессов акриловых композиций, которые были первыми разработаны для стереолитографии, использующей перспективное фотоиницирующее лазерное излучение видимого диапазона. Рассмотрены процессы окислительной полимеризации фотополимеризующейся композиции для случаев низкой и высокой концентраций антиоксиданта при высоких скоростях иницирования, использующихся в технологии лазерной стереолитографии.

Ключевые слова: окислительная полимеризация; ингибитор; лазер; стереолитография; диффузия; скорость реакции.

Investigation of oxidizing polymerization processes at high velocities of initiation in technique of laser stereolithography

The paper deals with the investigation of polymerization processes in acryl compositions which were developed first for stereolithography using a promising photo-initiating laser emission of a visible range. The processes of oxidizing polymerization of a photo-polymerizing composition at very low concentrations of an antioxidant [X] and a concentration of dissolved oxygen [O₂] > 10⁻⁷ ÷ 10⁻⁸ mole/l are considered. It is shown that the appearance of an induction period is typical just of reactions passing in a closed system, and in an open one a reaction passes without an induction period. Under these conditions the reaction products are poly-peroxides of a low-molecular structure. There are also considered the processes of polymerization at the dissolved oxygen concentration [O₂] > 10⁻⁷ ÷ 10⁻⁸ mole/l and at high concentrations of anti-oxidant X. It is determined that after a lapse of time when an oxidant is spent a velocity of oxygen expense increases as a result of which in the layers more remote from the boundary of phase division the composition – air the open system transforms into a closed one. In these layers the rate of oxygen diffusion appeared to be less of the rate of its expense in reactions of monomer oxidation. The investigation results explain the mechanism of a track formation at the irradiation of a photo-polymerizing composition with a laser beam.

Keywords: oxidizing polymerization; inhibitor; laser; stereolithography; diffusion; reaction rate.

Фотополимеризующиеся композиции, используемые для создания трёхмерных объектов методом лазерной стереолитографии, разделяются на две основные группы: композиции на основе акрилатов и композиции на основе эпоксидных мономеров.

Как правило, акриловые композиции дают большую полимеризационную усадку, но при этом имеют меньшую стоимость, и позволяют обеспечить большую производительность благодаря более высокой химической активности. Поэтому, они широко используются для синтеза массивных объектов с не очень высокими требованиями по точности.

Эпоксидные композиции, напротив, при полимеризации дают наименьшую усадку, но при этом имеют большую стоимость, в связи с чем, чаще используются для синтеза тонкостенных изделий с высокими требованиями по точности. Обе группы включают в себя довольно обширный спектр композиций с различными свойствами.

В статье представлено исследование полимеризационных процессов акриловых композиций, которые были первыми разработаны для стереолитографии, использующей перспективное фотоиницирующее лазерное излучение видимого диапазона.

Как известно, естественным ингибитором полимеризационных процессов акриловых композиций является кислород, который диффундирует в них из воздуха. Вследствие того, что поверхностные слои композиции поразному насыщены кислородом, и скорость восполнения израсходованного кислорода уменьшается по мере удаления от поверхности вглубь композиции, полимеризационные

процессы, протекающие в композиции, имеет смысл рассматривать в двух системах – открытой и закрытой.

В открытой системе расход кислорода вследствие фотохимической реакции, инициированной лазерным лучом, полностью компенсируется его диффузией из газовой фазы. В закрытой – системе расположенной под открытой, расход кислорода, вследствие фотохимической реакции, инициированной лазерным лучом, не компенсируется за счёт его диффузии из газовой фазы и окрестных слоёв композиции. Условия закрытой системы отвечают условиям получения полимерных изделий. В этих условиях, ниже дна открытой системы, наблюдаются процессы не ингибированной полимеризации после израсходования молекул кислорода и антиоксиданта [1] при высоких скоростях инициирования v_{in} , которые имеют место при облучении композиции лазерным лучом.

Рассмотрим процессы окислительной полимеризации при высоких скоростях инициирования, но при условии, что $v_{in} < (2(K_4[M])^2 + K_3 K_4[M][O_2]) / 2K_6$ или при $v_{in} < (K_3[O_2])^2 / K_5$,

где [M] и [O₂] – концентрации мономера и кислорода в композиции, соответственно;

K_3 – константа скорости реакции растущих алкильных радикалов R с молекулами кислорода растворённого в композиции с образованием перекисных радикалов r' ;

K_4 – константа скорости химической реакции перекисных радикалов r' с молекулами мономера M с образованием растущих алкильных радикалов R;

K_5 – константа скорости реакции растущих

алкильных радикалов друг с другом с образованием конечных продуктов реакции полимеризации P ;

K_6 – константа скорости реакции растущих алкильных радикалов с перекисными радикалами с образованием конечных продуктов реакции полимеризации [1].

Здесь рассматривается полимеризация при любых концентрациях антиоксиданта и при концентрации кислорода, большей некоторого минимального значения $[O_2]'$. В этих условиях скорость реакции K_5 очень мала. Из-за громоздкости уравнений опустим анализ общего случая и рассмотрим две более простых ситуации:

1) Полимеризация при очень низких концентрациях антиоксиданта $[X]$, и концентрации растворённого кислорода $[O_2] > [O_2]' = 2 K_6 K_4 [M] / K_5' K_3$, где K_5' – константа скорости реакции молекул перекисных радикалов r , с образованием конечных продуктов реакции полимеризации:

$$[X] < [X]' \approx 0,31 (v_{in} \cdot K_5')^{1/2} / K_7,$$

где K_7 – константа скорости реакции молекул перекисных радикалов с молекулами антиоксиданта, с образованием конечных продуктов реакции полимеризации [1].

В этом случае для скорости расходования мономера v_M , имеем:

$$v_M \approx \frac{\sqrt{v_{in}/K_5'} \cdot K_4 \cdot [M] \cdot (K_3 \cdot [O_2] + K_2 \cdot [M])}{K_3 \cdot [O_2]}, \quad (1)$$

где K_2 – константа скорости реакции растущих алкильных радикалов с молекулами мономера с образованием более крупных растущих алкильных радикалов [1];

Скорости расходования растворённого кислорода v_{O_2} и молекул антиоксиданта v_X будут равны:

$$v_{O_2} \approx K_4 \cdot [M] \cdot \sqrt{v_{in}/K_5'}; \quad (2)$$

$$v_X \approx K_7 \cdot [X] \cdot \sqrt{v_{in}/K_5'}. \quad (3)$$

В этом случае индукционный период реакции, протекающей в закрытой системе t_3 , будет следующий:

$$t_3 \approx \frac{\sqrt{K_5'/v_{in}} \cdot [O_2]'}{K_4 \cdot [M]}. \quad (4)$$

Справедливость этих уравнений подтверждается экспериментальными результатами, представленными на рис. 1 левыми горизонтальными участками кривых (1–3).

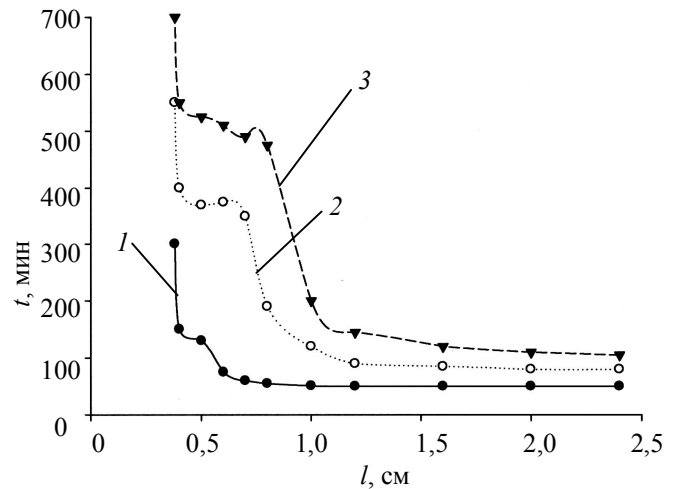


Рис. 1. Зависимость продолжительности индукционного периода реакции, протекающей на воздухе в присутствии антиоксиданта, от толщины слоя l композиции. Концентрация антиоксиданта $[X]$:
1 – $5,35 \cdot 10^{-4}$ моль/л; 2 – $1,27 \cdot 10^{-3}$ моль/л;
3 – $1,83 \cdot 10^{-3}$ моль/л

При $[X] < [X]'$ появление индукционного периода характерно лишь для реакций, протекающих в закрытой системе. В этом случае индукционный период определяется концентрацией растворенного в композиции кислорода и скоростью его расходования. В открытой системе при $[X] < [X]'$ реакция протекает без индукционного периода, так как при этих концентрациях антиоксидант не влияет на значения v_M , v_{O_2} и v_X , а расход кислорода в процессе окисления компонентов композиции в зоне реакции постоянно восполняется его диффузией из газовой фазы. Появление индукционного периода в данном случае может быть обусловлено только переходом реакции из условий открытой системы в закрытую систему, например, за счет увеличения скорости инициирования цепей.

Очевидно, что реакция, протекающая при $[X] < [X]'$ по своим особенностям идентична реакции, протекающей в присутствии кислорода и при $[X] = 0$. Продуктами реакции в этих условиях являются полиперекиси низкомолекулярного строения.

2) Полимеризация при $[O_2] > [O_2]'$ и при высоких концентрациях антиоксиданта X : $[X] > [X]' \approx 3,16 (v_{in} K_5')^{1/2} / K_7$.

Этот случай аналогичен случаю эффективного ингибирования реакции полимеризации, рассмотренному в работе [1]. При $\alpha = K_{и'} [O_2] \times K_{и}^{-1} [M]^{-1} = 0$, (где $K_{и}$ – константа скорости реакции иницирующих радикалов $R_{и}$ с молекулами мономера, с образованием растущих алкильных радикалов, а $K_{и'}$ константа скорости реакции иницирующих радикалов $R_{и}$ с молекулами кислорода с образованием перекисных радикалов) для значений v_M, v_{O_2} и v_X получаем:

$$v_M \approx \frac{\varepsilon \cdot v_{и} \cdot (K_3 \cdot [O_2] + K_2 \cdot [M]) \cdot (K_7 \cdot [X] + K_4 \cdot [M])}{K_3 \cdot K_7 \cdot [O_2] \cdot [X]}, \quad (5)$$

$$v_{O_2} \approx \frac{\varepsilon \cdot v_{и} \cdot (K_7 \cdot [X] + K_4 \cdot [M])}{K_7 \cdot [X]}, \quad (6)$$

$$v_X \approx \varepsilon \cdot v_{и}, \quad \text{где } 1 < \varepsilon < 2. \quad (7)$$

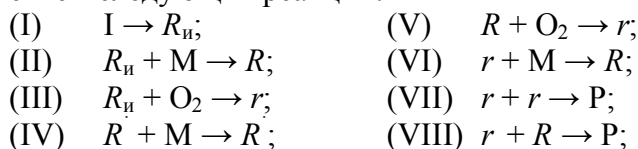
Для реакции, протекающей в открытой системе, индукционный период t_0 равен:

$$t_0 \approx \frac{\varepsilon \cdot [X]}{v_{и}}. \quad (8)$$

Для реакции протекающей в закрытой системе, индукционный период t_3 равен:

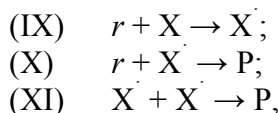
$$t_3 \approx \frac{\varepsilon \cdot K_7 \cdot [O_2] \cdot [X]}{v_{и} \cdot (K_7 \cdot [X] + K_4 \cdot [M])}. \quad (9)$$

Напомним, что приведенные уравнения (1 – 9) применимы при концентрациях антиоксиданта $[X] < [X]' \approx 0,31 (v_{и} K_5)^{1/2} / K_7$ и $[X] > [X]' \approx 3,16 (v_{и} K_5)^{1/2} / K_7$. При $[X] < [X]'$ полимеризация протекает в основном с участием следующих реакций:



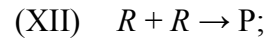
где I, M, O_2 – молекулы: инициатора, мономера и кислорода, соответственно.

Для данного случая, в общем балансе гибели активных центров, вклад следующих реакций мал:



где X – радикалы антиоксиданта.

Даже при $[X] = [X]'$ всегда $K_5' [r]^2 > K_7 [X] [r]$, а скорость реакции (VI) и длина кинетических цепей по мономеру и кислороду всего лишь в 1,16 раз меньше, чем при $[X] = 0$. При $[X] > [X]'$ пренебрежимо малым становится вклад реакций (VII), (VIII), а также реакции растущих алкильных радикалов:



Процесс протекает в основном за счет реакций (I – VI, IX – XI). В этом случае даже при $[X] = [X]'$, $K_5' [r]^2 < K_7 [X] [r]$, а скорость реакции (VI) и длина кинетических цепей по мономеру и кислороду уже в 3 раза меньше соответствующих значений при $[X] = 0$.

Остановимся несколько подробнее на генезисе открытой системы. Очевидно, что по истечении времени t_0 , когда израсходуется антиоксидант, скорость расходования кислорода возрастает до значения, определяемого уравнением (2). В результате этого, в слоях более удаленных от границы раздела фаз композиция–воздух, открытая система переходит в закрытую. В этих слоях скорость диффузии кислорода окажется меньше скорости расходования его в реакциях окисления мономера. Спустя время t , определяемое уравнением (4), в этой зоне реакции израсходуется и кислород. В результате этого в этой части композиции реакция переходит из режима ингибированного кислородом процесса в режим не ингибированной реакции, скорость которой определяется известным уравнением

$$v_M = K_2 \cdot [M] \cdot \sqrt{v_{и} / K_5}. \quad (10)$$

Подобное изменение состояния реагирующей системы показано на примере изучения зависимости продолжительности индукционного периода реакции от толщины слоя композиции (см. рис. 1). При толщине слоя ФПК больше 7; 10; 12 мм полимеризация протекает, по существу, в закрытой системе и индукционный период реакции определяется только концентрацией растворенного кислорода и скоростью его расходования.

При дальнейшем уменьшении толщины слоя расходование кислорода в реакциях окисления все в большей степени компенсируется диффузией его из газовой фазы, индукционный период растет, продолжается и расходование антиоксиданта. Плато на кривых 1 – 3 (см. рис. 1) соответствует толщине слоя открытой системы, при которой индукционный период реакции определяется только концентрацией антиоксиданта и скоростью его расходования. В слоях композиции толщиной порядка 4 мм и меньше при данной скорости инициирования диффузия полностью восполняет расход кислорода в реакциях окисления.

При облучении ФПК лазерным лучом процесс не ингибированной полимеризации начинается в слоях композиции находящихся

ниже дна открытой системы, после израсходования молекул кислорода и антиоксиданта через время, определяемое уравнением (4). Количество энергии лазерного излучения, поглощённой композицией в течение времени t_3 , определяет такой полимеризационный параметр ФПК, как критическая доза облучения.

По мере удаления от границы раздела воздух-композиция концентрация кислорода уменьшается, а возможность её восполнения за счёт диффузии из воздуха также снижается, что обуславливает начало полимеризации сразу в некотором объёме облучённой композиции.

Расстояние от нижней до верхней границы этой области определяет минимально возможную толщину одиночного слоя в лазерной стереолитографии. При дальнейшем облучении композиции граница процесса полимеризации смещается как в сторону границы раздела композиция-воздух за счёт смещения в ту же сторону дна открытой системы, так и вглубь композиции, за счёт постепенного поглощения, достаточного для израсходования молекул X и O_2 , количества лазерной энергии, интенсивность поступления которой может возрастать за счёт уменьшения коэффициента поглощения облучаемой композиции [2, 3].

Данный процесс в совокупности с распределением плотности мощности по пятну облучения подобным Гауссовому, обуславливает появление границы раздела полимер-композиция имеющей характерную форму – выпуклую как в сторону границы раздела композиция-воздух, так и в противоположном направлении.

Для количественной оценки параметров получаемых треков, а также определения оптимальных технологических параметров про-

цесса полимеризации под воздействием лазерного излучения, необходимо дополнительно исследовать растворимость и диффузию кислорода в фотополимеризующейся композиции, а также процессы нелинейного поглощения лазерного излучения фотополимеризующейся композицией.

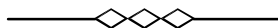
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

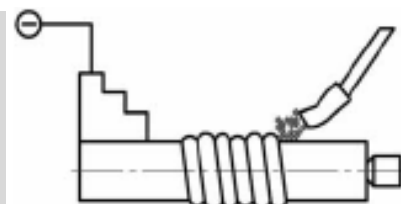
1. Малов, И.Е. Анализ процесса полимеризации в присутствии кислорода воздуха, применительно к технологии лазерной стереолитографии // Технология машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 17–21.
2. Малов, И.Е., Шиганов, И.Н. Акриловые фотополимеризующиеся композиции для лазерной стереолитографии // Технология машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 56–58.
3. Малов, И.Е., Мамалиев, С.Ф., Шиганов, И.Н. Фотополимеризующиеся композиции для лазерной стереолитографии // Технология машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 23–28.

REFERENCES

1. Malov I.E. Analysis of polymerization process at atmospheric oxygen presence with reference to laser stereolithography technology // *Engineering Techniques*. – 2015. – № 10. – pp. 17–21.
2. Malov I.E., Shiganov I.N. Acryl photo-polymerizing compositions for laser stereolithography // *Engineering Techniques*. – 2011. – № 11. – pp. 56–58.
3. Malov I.E., Mamaliev S.F., Shiganov I.N. Photopolymerizing compositions for laser stereolithography // *Engineering Techniques*. – 2008. – № 11. – pp. 23–28.

Рецензент д.т.н. И.Н. Шиганов





УДК 621. 791. 011
DOI: 10.12737/21239

В.А. Лебедев, д.т.н.,
(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11),
Ж.Г. Голобородько, к.т.н.,
С.В. Драган, к.т.н., **И.В. Симутенков**, к.т.н.,
(Национальный университет кораблестроения, 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда 9),
Ю.А. Ярос, к.т.н.,
(ООО НПФ АМИТИ, 54028, г. Николаев, ул. Новозаводская, 42)
E-mail: office@paton.kiev.ua

Усовершенствование технологии автоматической наплавки под флюсом при ремонте судовых гребных валов

Изложена технология восстановления судовых валов с применением автоматической наплавки под флюсом с использованием специализированной наплавочной установки и сварочного комплекса с механическим генератором высокочастотного импульсного воздействия на электродную проволоку. Приведены результаты опытной наплавки коррозионно-стойкого покрытия на гребной вал диаметром 200 мм.

Ключевые слова: наплавка; технология; восстановление; судовые детали.

V.A. Lebedev, D.Eng.,
(Paton Institute of Electric Arc Welding of NAS of Ukraine 11, Bozhenko Str., Kiev-150. 03680),
Zh.G. Goloborodko, Can.Eng.,
S.V. Dragan, Can.Eng., **I.V. Simutenkov**, Can.Eng.,
(National Shipbuilding University, 9, Stalingrad Heroes Avenue 54025, Nikolayev)
Yu.A. Yaros, Can.Eng.
(SPF Co. AMITI, 42, Novozavodskaya, 54028, Nikolayev)

Improvement of automatic surfacing technique under flux at ship propeller shaft repair

During the operation of surfaces in ship propeller shafts they are worn out intensively. To prolong their life there are used at shipyards an automatic surfacing under flux (ASF) which, besides high efficiency is characterized with a considerable share of a basic metal participation in surfacing worsening properties of a deposited layer.

The aim of the paper consists in the technology improvement of ship propeller shafts restoration with the aid of ASF and SBM decrease on the basis of complex mechanization and energization of a technological process.

The process energization consists in the transfer character control of electrode metal through an arc by geometry and properties of driven rollers at the expense high-frequency extra-axial oscillations of an electrode (EOE) created by a special mechanical generator. The developed ASF technology ensures pad quality meeting requirements of the Register.

Keywords: surfacing; techniques; restoration; ship parts.

На судах морского и речного флота такие ответственные детали механизмов и устройств, как гребные валы, баллеры, штыри рулей и другие эксплуатируются в условиях воздействия циклической нагрузки и коррози-

онной среды. В результате действия эксплуатационных нагрузок поверхности деталей интенсивно изнашиваются, теряют коррозионную стойкость, а развитие поверхностных трещин приводит к не прогнозируемым раз-

рушениям [11]. Такие детали поднадзорны морскому Регистру и к их качеству предъявляются высокие требования, направленные на обеспечение необходимой эксплуатационной надежности и долговечности [2].

На судоремонтных предприятиях для prolongации срока службы изношенных деталей применяют различные способы их восстановления дуговой наплавкой, в том числе автоматической под флюсом (АНФ) [1].

Однако, наряду с высокой производительностью процесса, АНФ характеризуется чрезмерным тепловложением в основной металл. Вследствие этого возрастают глубина проплавления и остаточные деформации наплавляемой детали, увеличивается подмешивание основного металла к наплавленному, достигающее 50...60 % [9, 10]; снижается содержание химических элементов, обеспечивающих коррозионную стойкость поверхности наплавленного слоя.

Известные приемы АНФ [5, 6, 9, 10] в ряде случаев позволяют снизить отрицательное влияние избыточного тепловложения, однако их реализация связана с необходимостью применения сложных сварочных установок или дорогих источников сварочного тока с программированием параметров режима.

В условиях судоремонта, при большом разнообразии восстанавливаемых деталей, их значительной массе и габаритах для АНФ целесообразно использование серийного сварочного оборудования, оснащенного, в том числе, простым устройством, активизирующим процесс наплавки, в сочетании с комплексной механизацией всего технологического процесса восстановления изношенных поверхностей деталей.

Под активизацией процесса в этом случае следует понимать принудительное удаление с торца электродной проволоки расплавленного слоя в результате импульсного механического воздействия на электрод, вызывающего высокочастотные (более 100 Гц) колебания его торца. При этом изменяется характер переноса электродного металла – от крупнокапельного к мелкокапельному, и обеспечиваются условия регулирования тепловложения в основной металл [3].

Целью данной работы является усовершенствование технологии восстановления судовых гребных валов диаметром до 400 мм автоматической наплавкой под флюсом на основе комплексной механизации технологического процесса.

Наплавку опытных гребных валов произво-

дили по одобренной Регистром программе, согласно которой к восстановлению допускаются валы, имеющие износ, трещины и коррозионные разрушения глубиной не более 5 % в пределах расчетного (по Правилам Регистра) диаметра вала. При износе вала, превышающего 15 мм на сторону, восстановление наплавкой не допускается. Восстановлению наплавкой подлежали гребные валы, имеющие износ, коррозионные разрушения, трещины и смятия по конусу, под облицовками и в остальной части вала, а также коррозионные каверны и другие поверхностные дефекты, которые могут явиться очагами зарождения усталостных трещин. Наплавляемую поверхность вала предварительно подвергали проточке на токарном станке до чистого металла (рис. 1).



Рис. 1. Станок для проточки гребных валов

При этом следы выработок, коррозионных разрушений, трещин, расслоений, неметаллических включений и другие дефекты полностью удаляли в соответствии с требованиями РД 31.52.12–88 «Судовые гребные валы. Восстановление электродуговой наплавкой перлитными и хромоникелевыми сталями».

После проточки гребного вала под наплавку производили магнитную дефектоскопию либо контроль цветным методом участка, подлежащего наплавке, а также зоны шириной 20 мм на каждую сторону, прилегающей к этому участку.

Технологию наплавки отработывали на специализированной наплавочной установке или на стенде со сварочным комплексом АСТ 1000.

Установка (рис. 2, а) собрана на базе машины типа RM 461E фирмы Messer для газовой резки труб, модернизированной для наплавочных работ. Система управления машиной позволяет плавно регулировать скорости вращения вала и перемещения электрода вдоль образующей вала. Установка оборудована зажимным патроном (рис. 2, б) для вращения вала, наплавочной головкой с подаю-

щим механизмом от полуавтомата ПДГ-508М и бункером для флюса (рис. 2, в). В качестве источника питания применяли сварочный выпрямитель ВС-630.

Сварочный комплекс АСТ 1000 состоит из инверторного источника питания и сварочно-

го трактора, оснащенного механическим генератором импульсного воздействия на электродную проволоку, позволяющему создавать высокочастотные колебания электрода поперек (рис. 3, а) или вдоль (рис. 3, б) оси наплавляемого валика.



а)



б)



в)

Рис. 2. Общий вид (а), зажимной патрон (б) и наплавочная головка (в) установки на базе машины типа RM 461E

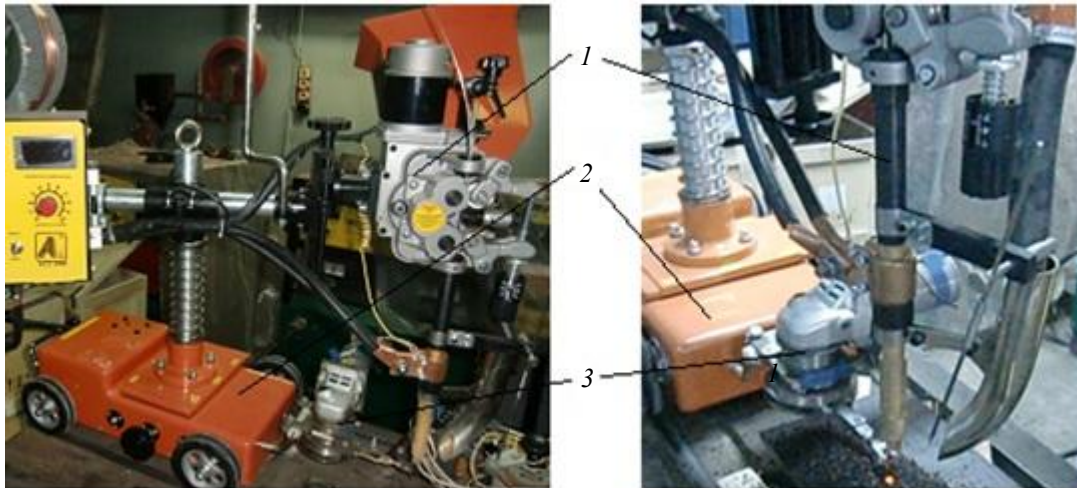


Рис. 3. Сварочный трактор с механическим генератором для импульсного воздействия на электродную проволоку: 1 – сварочная головка; 2 – каретка трактора; 3 – механический генератор

При наплавке на установке с машиной RM 461E подготовленный вал устанавливали на колесные тележки и с их помощью вводили в зажимной патрон. Вал слегка зажимали в патроне, затем выравнивали по уровню. При этом вес вала воспринимается колесными те-

лежками, а патрон служит только для обеспечения вращения изделия. После выверки положения вал зажимали окончательно. Проверяли биение наплавляемых поверхностей, которое не должно превышать 0,1 мм.

Восстановление изношенных поверхностей

цилиндрических деталей выполняли однозаходной наплавкой по винтовой линии с шагом, обеспечивающим перекрытие валиков не менее чем на 1/3 их ширины [4]. Локальные дефектные участки наплавляли с использованием стэнда со сварочным трактором.

Для восстановления геометрии деталей из углеродистых и низколегированных сталей использовали проволоку диаметром 2 мм марок Св-08А или Св-08АА в сочетании с флюсами АН-348АМ или ОСЦ-45М. Для защиты от воздействия агрессивных сред на поверхности гребных валов и баллеров, изготовленных из обычных сталей, облицовочный слой металла, стойкий против коррозии в морской воде, наплавляли по подслою из низкоуглеродистой стали (рис. 4).

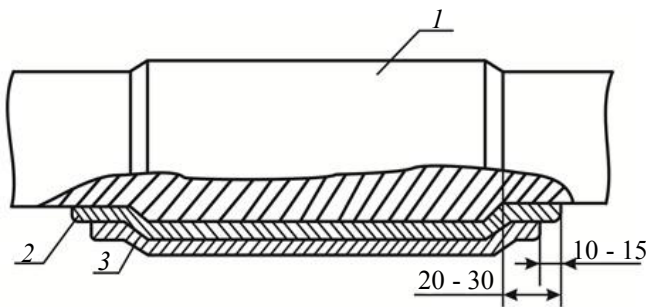


Рис. 4. Схема антикоррозионной наплавки вала:
1 – основной металл; 2 – подслоя, наплавленный малоуглеродистой сталью; 3 – слой, наплавленный аустенитной сталью

При этом учитывали дополнительные требования к технологии наплавки, предусматривающие снижение сварочных деформаций вала и степени перемешивания основы с наплавленным металлом, а также исключение образования в основном металле нежелательных мартенситных структур. С этой целью наплавку на установке выполняли на режимах, обеспечивающих минимальное проплавление основного металла [7, 8].

При использовании сварочного трактора с механическим генератором высокочастотных колебаний электрода указанное ограничение было снято. В последнем случае назначали оптимальное соотношение между параметрами управляющего воздействия (частотой и амплитудой), что позволило снизить долю участия основного металла в наплавленном слое на 40 ... 45 % [3].

Параметры режима колебаний выбирали с помощью разработанной диаграммы (рис. 5), позволяющей, кроме этого, установить влияние параметров колебаний на характер переноса металла и геометрию наплавленного ва-

лика. На диаграмме выделены следующие области.

Область 1 – обеспечивается управление только размерами наплавленного валика и глубиной проплавления металла основы.

Область 2 – реализуется комбинированным управлением геометрией валика и характером переноса металла через дугу в зависимости от соотношения между параметрами колебаний – частотой f_k и амплитудой A_k :

а) при $f_k \geq f_{ЖМС}$; $A_k < d_3$ обеспечивается управление толщиной жидкого металлического слоя (ЖМС) на торце электрода диаметром d_3 ;

б) при $f_k \geq f_{ПМ}$; $A_k < d_3$ обеспечивается управление характером переноса металла (МП);

в) при $f_k \geq f_{ПМ}$, $d_3 < A_k < e_0$ обеспечивается управление характером переноса металла (ПМ) и производительностью расплавления электродной проволоки (e_0 – ширина наплавленного валика при отсутствии импульсного механического воздействия на электрод);

г) при $f_k \leq f_{ПМ}$, $e_0 < A_k < L_{св}$ обеспечивается управление размерами наплавленного валика и глубиной проплавления основы металла ($L_{св}$ – длина сварочной ванны).

Область 3 – нарушение стабильности дугового процесса и ухудшение качества формирования наплавленного слоя вследствие чрезмерно высокой скорости перемещения дуги.

В соответствии с РД 31.52.12–88 для получения коррозионно-стойкого слоя следует применять наплавку под флюсами марок АН-20 или АН-26 проволокой марки Св-08Х20Н9Г7Т, обладающей высокими технологическими свойствами и обеспечивающей высокое качество наплавленного металла (при отсутствии проволоки Св-08Х20Н9Г7Т ее можно заменить сварочными проволоками марок Св-06Х19Н9Т или Св-04Х19Н11М3).

При отработке технологии наплавки было исследовано качество коррозионно-стойкого слоя на гребных валах диаметром 200 мм. Исследования проводили в процессе наплавки по двум технологическим вариантам.

Вариант 1 – наплавка на установке (см. рис. 2) проволокой марки Св-04Х19Н11М3 под слоем флюса АН-26С. Наплавку выполняли под надзором Регистра (РМРС) по подслою из низкоуглеродистой стали.

Вариант 2 – наплавка на опытном стенде (см. рис. 3) проволокой Св-06Х19Н9Т под слоем флюса 48-ОФ-6. Наплавку выполняли в соответствии с программой спецификации

процесса наплавки, подтвержденной экспертом Украинской аттестационной комиссией

сварщиков (УАКС). Режимы наплавки для обоих вариантов приведены в табл. 1.

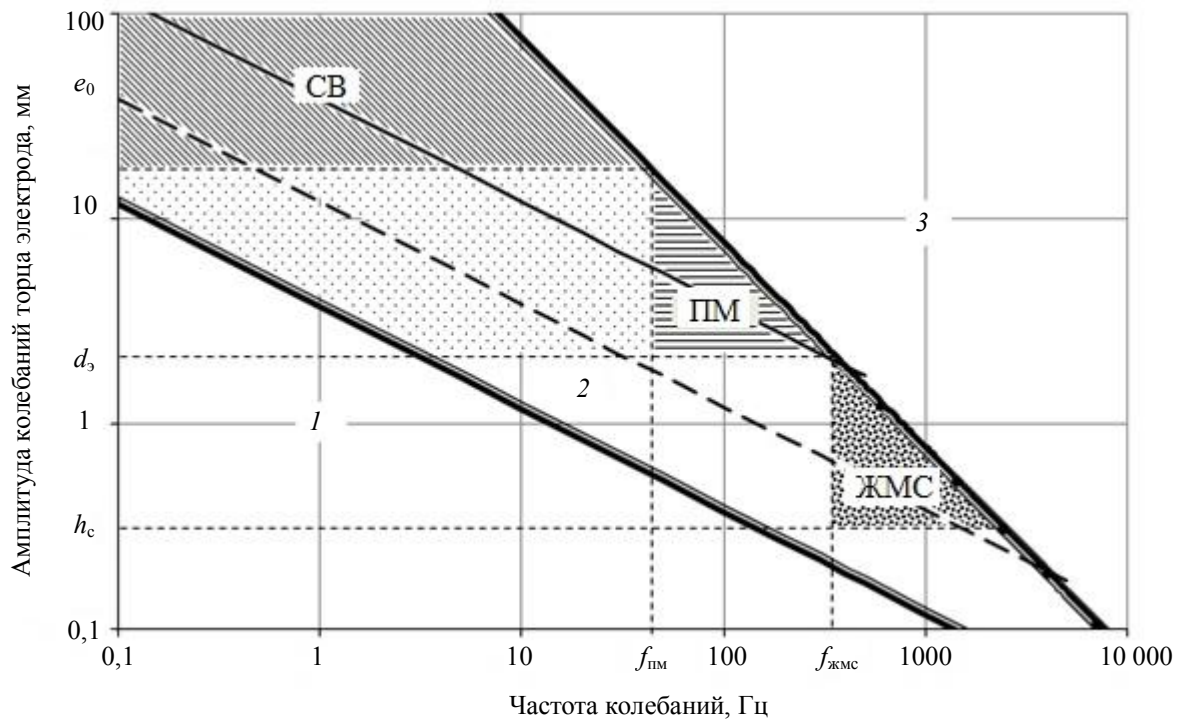


Рис. 5. Диаграмма для выбора параметров высокочастотных колебаний электрода

1. Режимы автоматической наплавки опытных гребных валов Ø 200 мм (диаметр электродной проволоки $d_s = 2$ мм)

Характеристика прохода		Скорость подачи проволоки, м/ч	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Линейная скорость наплавки, м/ч	Вылет электрода, мм	Смещение электрода от «зенита», мм	Толщина слоя, наплавленного за один проход, мм
Подслой	* Проволока Св-08А, флюс АН-348АМ	194	260...280	27...28	36...40	20	19	3,0...3,5
	**Проволока Св-08А, флюс ОСЦ – 45М	152	240...260	30...32	22...25	20	14	2,0...2,5
Облицовочный слой	* Проволока 04Х19Н11М3, флюс АН-26С	120	190...210	26...28	22...27	20	13	2,0...2,5
	** Проволока Св-06Х19Н9Т, флюс 48-ОФ-6	140	240...250	30...32	21...23	30	15	2,5...2,9

Примечания: 1. Шаг наплавки 5,1...4,3мм; 2. * наплавка без колебаний электрода; ** наплавка с колебаниями электрода.
3. Режим колебаний: амплитуда: 4 мм; частота 140 Гц; направление колебаний электрода – поперек валика

Толщина наплавленного подслоя составляла не менее 3,0...4,0 мм, толщина слоя с высокой степенью коррозионной стойкости в морской воде – не менее 5,0...6,5 мм.

Металлографические исследования зоны наплавки показали (рис. 6), что по всей длине обеспечивается равномерная высота наплавленного слоя, в зоне сплавления нержавеющей стали с подслоем из малоуглеродистой стали несплавления и другие дефекты отсутствуют.



Рис. 6. Продольный макрошлиф зоны наплавки

Анализ геометрии наплавленного валика показал (рис. 7), что высокочастотные внеосевые механические колебания электрода, независимо от направления приложения импульсного воздействия вдоль или поперек оси валика, снижают глубину проплавления основного металла.

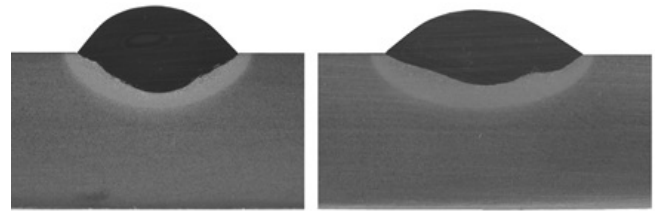


Рис. 7. Поперечные макрошлифы валиков, наплавленных проволокой Св-06Х19Н9Т:

а – без колебаний электрода; б – с поперечными колебаниями с частотой $f_k = 140$ Гц

Вместе с тем, продольные колебания способствуют увеличению высоты наплавленного валика, уменьшая его ширину. При поперечных колебаниях ширина валика возрастает при практически неизменной его высоте.

После завершения наплавки вал протачивали на токарном станке (см. рис. 1) до необходимого диаметра. При проточке отбирали стружку для химического анализа металла наплавленного слоя. Отбор стружки производили при минимальной скорости резания. Химический анализ (табл. 2) показал незначительное, по сравнению со сварочной проволокой, снижение содержания в поверхностном защитном слое основных легирующих элементов, обеспечивающих коррозионную стойкость вала.

2. Результаты химического анализа металла

Металл	Содержание элементов, %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Проволока Св -04Х19Н11М3		1,03	0,25	18,40	11,40	2,90
Наплавленный слой	$\frac{0,04...0,09}{0,07}$	–	–	$\frac{16,07...16,57}{16,32}$	$\frac{10,00...10,50}{10,25}$	2,90

Примечание. В знаменателе указано среднее значение.

При наплавке с поперечными механическими колебаниями электродной проволоки Св-06Х19Н9Т под флюсом 48-ОФ-6 были получены аналогичные результаты, но с повышенным уже в первом проходе содержанием хрома и никеля (на 27 % и 14 % соответственно) по сравнению с наплавкой без колебаний. Это объясняется, главным образом, меньшим перемешиванием наплавленного металла с основой.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о соответствии разработанной технологии требованиям РД 212.0080-87 (рас-

пространяется на судовые механизмы и устройства, детали механизмов подъемно-транспортной техники портов и гидротехнических сооружений) и возможности ее использования на судостроительных и судоремонтных предприятиях.

Выводы

1. Разработанная технология автоматической наплавки под флюсом обеспечивает высокое качество восстановления судовых цилиндрических деталей: в зоне сплавления наплавленного слоя из нержавеющей стали с подслоем из малоуглеродистой стали дефекты

отсутствуют; химический состав наплавленного металла практически не отличается от состава электродной проволоки.

2. Применение высокочастотных внеосевых колебаний электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом позволяет активно управлять характером переноса электродного металла через дугу, геометрией и свойствами наплавленных валиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ананьев, С.П., Коротков, В.А., Головизнин, Б.Л., Козлов, В.В.** Совершенствование технологии наплавки крановых колес // Сварочное производство. – 2007. – № 1. – С. 23 – 27.
2. **Голобородко, Ж.Г.** Импульсно-дуговая наплавка медных сплавов на сталь в судовом машиностроении // Сварщик: Информационно-технический журнал. – 2011. – № 4. – С. 36 – 37.
3. **Драган, С.В., Симутенков, И.В., Ярослав, Ю.А., Трэмбич, В.Я.** Влияние высокочастотных колебаний электрода на геометрию проплавления при автоматической наплавке под флюсом // Судостроение и морская инфраструктура. – 2015. – № 1 (3). – С. 76 – 86.
4. **Кусков Ю.М., Рябцев И. А., Демченко Ю.В.** и др. Наплавочный участок ремонта деталей гидроэнергетического оборудования в АО «Сакэнергоремонт» // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. – С. 57 – 59.
5. **Меликов, В.В.** Многоэлектродная наплавка. – М.: Машиностроение. 1988. – 144 с.
6. **Размышляев, А.Д.** Автоматическая электродуговая наплавка ленточным электродом под флюсом: монография. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ». – 2013. – 180 с.
7. **Сидашенко, А.И. Скобло, Т.С., Сайчук, А.В., Манило, В.Л.** Теоретическое обоснование температуры нагрева детали при механизированной наплавке по винтовой линии для проведения термомеханической обработки // Вісник ХНТУСГ. – 2013. – Вип. 133. – С. 15 – 22.
8. **Лебедев, В.А., Лендел, И.В.** Исследование технологических возможностей дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – №9(51). – С. 20–27.
9. **Патон, Б.Е.** Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением – М.: Машиностроение. 1974. – 768 с.

10. **Фрумин, И.И.** Автоматическая электродуговая наплавка. – Харьков. 1961. – 423 с.

11. **Хлыбов, А.А., Колыванов, В.В.** Методика оценки технического состояния гребных валов // Вестник АГТУ, Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 167 – 171.

REFERENCES

1. Ananiev, S.P., Korotkov, V.A., Goloviznin, B.L., Kozlov, V.V. Improvement in crane wheel surfacing techniques // *Welding Engineering*. – 2007. – № 1. – pp. 23 – 27.
2. Goloborodko, Zh.G. Pulse-arc surfacing of copper alloys on steel in shipbuilding // *Welder: Information-Technical Journal* – 2011. – № 4. – pp. 36 – 37.
3. Dragan, S.V., Simutenkov, I.V., Yaros, Yu.A., Trembich, V.Ya. Electrode high-frequency oscillations effect upon weld penetration geometry at automatic surfacing under flux // *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. – 2015. – № 1 (3). – pp. 76 – 86.
4. Kuskov Yu.M., Ryabtsev I.A., Demchenko Yu.V. et al. Surfacing repair area of parts of hydraulic equipment in “Sakenergorepair” Co. // *Automatic Welding*. – 2009. – № 1. – pp. 57 – 59.
5. Melikov, V.V. *Multi-electrode Surfacing*. – M.: Mechanical Engineering. 1988. – pp. 144.
6. Razmyshlyayev, A.D. *Automatic Electric Arc Surfacing with Tape Electrode under Flux*: Monograph. – Mariupol: SHEI “PSTU”. – 2013. – pp. 180.
7. Sidashenko, A. I. Skoblo, T. S., Saichuk, A. V., Manilo, V.L. Theoretical substantiation of part heating temperature at mechanized surfacing along helical curve for thermomechanical treatment // *Bulletin of HNTUW*. – 2013. – Issue. 133. – pp. 15 – 22.
8. Lebedev, V.A., Lendel, I.V. Technological possibility researches in arc welding and surfacing with electrode wire emulsion feed // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №9(51). – pp. 20–27.
9. Paton, B.E. *Technology of Metal and Alloy Electric Welding by Melting* – M.: Mechanical Engineering. 1974. – pp. 768.
10. Frumin, I.I. *Automatic Electric Arc Surfacing*. – Har'kov. 1961. – pp. 423.
11. Khlybov, A.A., Kolyvanov, V.V. Estimation procedure of propeller shaft technical state // *Bulletin of ASTU, Series: Marine Techniques and Technology*. – 2010. – № 1. – pp. 167 – 171.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
Учредитель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>
Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru
Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.
Сдано в набор 15.07.2016. Подписано в печать 20.08.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.
Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7