



УДК 621.78

DOI: 10.30987/article\_5b71326d2e7b54.46497075

**С.А. Шмелев**, аспирант,

**А.В. Богданов**, к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5)

E-mail: mtbmstu@mail.ru

## **Современное состояние вопроса повреждаемости гребней колесных пар и методы снижения их износа и контактной усталости**

*В рамках статьи сформировано обобщенное представление вопроса повреждаемости гребней железнодорожных колесных пар, а также выполнен сравнительный анализ применения различных методов повышения износостойкости и контактной усталостной прочности данных поверхностей.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер; лазерное упрочнение; износостойкость; контактно-усталостная прочность; термическая обработка.

**S.A. Shmelyov**, Post graduate student,

**A.V. Bogdanov**, Can. Eng.

(Bauman STU of Moscow, 5, 2-d Baumanskaya, Moscow, 105005)

## **Current state of problem in wheel pair flange damages and methods for decrease of their wear and contact fatigue**

*Within the limits of the paper there is formed a generalized idea of the problem of flange damages in railway wheel pairs, and also a comparative analysis of different methods application to increase wear-resistance and contact fatigue strength of surfaces mentined.*

**Keywords:** fiber laser; laser strengthening; wear-resistance; contact-fatigue strength; thermal treatment.

### **Введение**

Проблема бокового износа колес и рельсов является одной из первостепенных и самых значимых для железнодорожной отрасли. Более 30 лет данная проблема активно решается [1]. Внедрение новых казавшихся перспективными технических решений, таких как лубрификация, замена подшипников качения на подшипники скольжения в буксовых узлах, уменьшение ширины железнодорожной колеи и других, оказалось малоэффективным.

Стоит отметить, что износ и дефекты контактно-усталостного происхождения являются поверхностными дефектами. Однако между

данными видами дефектов существует антагонистическая взаимосвязь [2]. При добавлении смазки в зону контакта колеса и рельса износ сильно замедляется, однако контактно-усталостные дефекты возникают только при условии присутствия смазки. Оба вида дефектов связаны между собой изменением коэффициента трения, с увеличением которого возрастает коэффициент тяги, что приводит к увеличению износа в рассматриваемой паре трения.

Для дополнительного увеличения коэффициента тяги в зону контакта колеса и рельса подается песок, а для уменьшения износа, одновременно с песком, подается смазка. Стоит

отметить, что песок, являясь абразивным материалом, существенно ускоряет износ колес и рельсов. Вследствие контактного взаимодействия колес и рельсов песок размалывается и превращается в адсорбционно-активную среду, интенсивно поглощающую смазку и, как следствие, эффективность лубрикации резко снижается [3].

Боковой износ железнодорожных колес и рельсов приводит и продолжает приводить к колоссальным потерям в железнодорожной сфере, а материальные потери от износа гребней колес в разы выше, по сравнению с износом поверхностей катания по причине необходимости большего съема металла при обточке.

### Современное состояние вопроса повреждаемости гребней колесных пар

Износ гребней колесных пар является лидирующим типом дефектов среди всех повреждений железнодорожных колес, возникающих вследствие контактного взаимодействия колеса и рельса. Несмотря на изменение в разные годы объема и структуры перевозочного процесса, проблема бокового износа колесных пар не теряет своей остроты. По данным Центральной дирекции инфраструктуры Управления вагонного хозяйства и Проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства за 10 месяцев 2016 года в текущий отцепочный ремонт (ТОР) было направлено

1 142 758 вагонов приписки России [4].

В табл. 1 приводятся данные по числу отцепок в ТОР с разбивкой по типам дефектов, возникших в эксплуатации.

### 1. Данные по числу отцепок в ТОР за 10 месяцев 2016 г. с разбивкой по типам дефектов

Основные узлы вагонов	Число отцепок в ТОР	% от общего числа вагонов, поступивших в ТОР
Колёсные пары	412 639	71,34 %
Буксовые узлы	255	0,04 %
Тележки	135 819	23,48 %
Автосцепное устройство	8 212	1,42 %
Автотормозное оборудование	8 806	1,52 %
Кузова	10 583	1,83 %
Рамы	0	0 %
Прочие	2 130	0,37 %
ИТОГО:	578 444	100 %

Как видно из табл. 1, более 71 % отцепок в ТОР за отчетный период связано с дефектами колесных пар.

В табл. 2. показана динамика поступления в текущий отцепочный ремонт грузовых вагонов по неисправностям колесных пар.

### 2. Динамика поступления в ТОР грузовых вагонов по неисправностям колесных пар

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Число отцепов по неисправности колесных пар	274 121	287 576	320 499	355 777	440 026	500 021

Как видно из табл. 2 за последние 6 лет число отцепов в ТОР по неисправности колесных пар возросло на 82 %.

В табл. 3 приведено сравнение отцепок в ТОР грузовых вагонов приписки РФ за 10 месяцев 2015 г. и 10 месяцев 2016 г. по всем неисправностям колесных пар.

Из табл. 3 видно, что за 10 месяцев 2016 г. более 69,5 % неисправностей колесных пар являются дефектами гребня колеса.

Марков Д.П. (д.т.н., ВНИИЖТ) выделяет первичные и вторичные факторы, влияющие на повреждаемость колес и безопасность дви-

жения поездов. Около 10 первичных факторов напрямую влияют на состояние колесных пар при их взаимодействии с рельсовым полотном. Перечислим некоторые из них: значения твердости и структура поверхностного слоя колесной и рельсовой стали, вес вагона и давление в пятне контакта колеса и рельса, температура окружающей среды, величина проскальзывания колеса по рельсу, радиусы кривизны пути, скорости качения и др. Учитывая взаимодействие колес с тормозными колодками различных типов, количество данных факторов увеличивается до 15.

Количество вторичных факторов существенно больше. К примеру, площадь пятна контакта определяется главным образом геомет-

рией профиля колес и рельсов, соотношением диаметров колес и общим состоянием ходовых частей подвижного состава.

### 3. Сравнение отцепок в ТОП грузовых вагонов приписки РФ за 2015 и 2016 гг. по неисправностям колесных пар

Неисправность	10 месяцев 2015 г.	10 месяцев 2016 г.	+/-
Неисправность вагона в результате схода с рельс	154	172	11,7%
Тонкий гребень	216 900	275 593	27,1 %
Прокат по кругу катания выше нормы	414	446	7,7 %
Кольцевые выработки на поверхности катания	459	525	14,4 %
Навар на поверхности катания	376	188	-50,0 %
Ползун на поверхности катания	13 251	10 884	-17,9 %
Выщербины обода колеса, раковины	85 487	82 019	-4,1 %
Уширение обода колеса	925	1191	28,8 %
Остроконечный накат гребня	16020	12 608	-21,3 %
Вертикальный подрез гребня	44	63	43,2 %
Тонкий обод	213	327	53,5 %
Трещина обода, откол обода	695	911	31,1 %
Ослабление ступицы на оси	13	4	-69,2 %
Трещина гребня, откол гребня колеса	127	74	-41,7 %
Откол обода колеса	147	146	-0,7 %
Ползун на поверхности катания	46	106	130,4 %
Неравномерный прокат по кругу катания	25 014	28 728	14,8 %
Трещина диска колесной пары	295	316	7,1 %
Трещина оси колесной пары	314	124	-60,5 %
Протертости оси колесной пары	210	67	-68,1 %
Повреждения оси колесной пары	5	0	-100 %
ИТОГО:	361 126	414 967	14,9 %

Стоит отметить, что бороться различными способами с дефектами, связанными с равномерным износом колес на круге катания нецелесообразно, поскольку переточка колес является простым и дешевым способом устранения дефекта и, вместе с тем, равномерный прокат поверхности катания колеса удаляет зародыши контактно-усталостных повреждений, способных привести к возникновению серьезных дефектов колесных пар [5]. Особое внимание следует обратить на дефекты гребня колеса, как наиболее распространенные и опасные повреждения, способные привести к выкатыванию колеса на головку рельса и крушению подвижного состава.

#### Способы снижения износа и повреждаемости контактных поверхностей железнодорожных колес

В настоящее время на сети железных дорог России и СНГ применяется множество различ-

ных способов снижения износа и повреждаемости контактных поверхностей железнодорожных колес.

Одним из самых распространенных способов снижения износа контактных поверхностей колеса и рельса является смазка: уменьшение коэффициента трения при контакте колеса с рельсовым полотном путем добавления смазки в зону их взаимодействия. Данный метод влечет за собой уменьшение коэффициента тяги и лишь частично решает проблему износа контактных поверхностей. Кроме того, смазка создает проблему выхода из строя колесных пар по тормозным и контактно-усталостным повреждениям из-за большего проскальзывания колеса по головке рельса, а контактно-усталостная прочность, наравне с износостойкостью, является одной из важнейших характеристик колес подвижного состава, определяющих их эксплуатационную надежность. При смазывании взаимо-

действующих поверхностей износ уменьшается, в то время как контактная усталость, напротив, может развиваться только в присутствии жидкости [6].

В России и СНГ была проделана значительная работа по определению степени влияния различных легирующих элементов на прочностные характеристики колесной стали [7]. Основным вклад в данном направлении внесли ВНИИЖТ и ФГУП «ЦНИИчермет имени И.П. Бардина», а также Украинский институт черных металлов. При этом колесную сталь легируют различными элементами: хромом, марганцем, кремнием, наиболее часто используемыми для придания стойкости стали; никелем, титаном и молибденом – элементами, придающими вязкость.

Исследовались стали с содержанием углерода от 0,29 до 0,72 %; марганца от 0,6 до 2 %; кремния от 0,26 до 1,6 %; хрома от 0,14 до 1,87 %; ванадия от 0,06 до 0,26 %; титана от 0,04 до 0,21 %; молибдена от 0,05 до 0,22 %. Свойства колесных сталей изучались при их нормализованном и упрочненном состоянии. Исследовались такие свойства стали, как ударная вязкость, контактно-усталостная долговечность, износостойкость, пластичность и другие.

По итогам проведенного комплекса работ было сформировано понимание нецелесообразности легирования колесной стали с содержанием углерода более 0,5 %, поскольку положительные свойства колесной стали при легировании существенно ослабевают с увеличением содержания углерода.

Традиционная технология закалки сталей токами высокой частоты широко применяется во множестве отраслей промышленности, в том числе в железнодорожной сфере для повышения износостойкости колес подвижного состава. При выборе температуры закалки руководствуются диаграммой Fe – Fe<sub>3</sub>C [8].

Сущность классических способов закалки поверхностного слоя, таких как закалка ТВЧ, состоит в локальном нагреве поверхности металла. При этом приповерхностный слой обрабатываемого материала быстро нагревается выше критической температуры и создается резкий температурный градиент. Далее поверхностный слой обрабатываемого материала охлаждается за счет отвода тепла вглубь детали.

К преимуществам термообработки колесных пар способом ТВЧ следует отнести минимальное время нахождения обрабатываемой детали в аустенитной фазе, что дает возмож-

ность получить мелкодисперсную структуру. Также из преимуществ данного технологического процесса следует выделить возможность автоматизации закалки и отсутствие необходимости нагрева всей детали.

Недостатки закалки колесных пар ТВЧ состоят во внесении в обрабатываемые детали остаточных напряжений и деформаций, которые, в свою очередь, могут суммироваться с внешними знакопеременными напряжениями и с напряжениями, вносимыми в изделие в процессе изготовления. Существенным недостатком является сложность получения равномерного распределения твердости и контролируемой структуры закаленной поверхности, а также вероятность образования микротрещин.

Многие вагонные и локомотивные депо России и СНГ имеют в своем составе оборудование для плазменной закалки колесных пар. К преимуществам такого способа упрочнения можно отнести возможность производить упрочнение непосредственно под вагоном или локомотивом без выкатки колесной пары. Особенностью процесса является необходимость использования защитного и плазмообразующего газа. Для решения описанной задачи эта технология является самой распространенной и активно внедряется ВНИИЖТ.

С использованием плазменного оборудования возможно производить закалку колесных пар со скоростью до 0,5...0,6 м/мин. В промышленные циклы предприятий ОАО «РЖД» внедрено около 90 установок плазменного упрочнения. В работоспособном состоянии из них поддерживается около 70 [9]. Принцип технологии плазменного упрочнения состоит в использовании многокомпонентного высокотемпературного потока продуктов сгорания метана.

При использовании технологии плазменного упрочнения вероятно образование высоких остаточных напряжений. Согласно [10] в зоне плазменного упрочнения гребней бандажей колес возникают высокие растягивающие остаточные напряжения. Опыт эксплуатации железнодорожных деталей и узлов показывает, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на надежность техники.

В случае возникновения в приповерхностных слоях деталей остаточных напряжений, в процессе эксплуатации вероятно их суммирование с внешними знакопеременными, либо растягивающими напряжениями, что, в свою очередь, может приводить к возникновению

трещин, выщербин и прочих дефектов контактно-усталостного происхождения и вызывать эффекты, способные прямо и косвенно влиять на безопасность движения поездов.

Первые исследования, нацеленные на анализ взаимодействия лазерного излучения с различными материалами, были проведены еще в начале 60-х гг. XX века. В результате данных исследований делался вывод о том, что нагрев лазерным лучом не имеет больших отличий от альтернативных видов нагрева. При нагревании лазером повышается температура заготовки, а физический смысл нагрева является хорошо изученным и состоит в увеличении амплитуды колебаний кристаллической решетки материала.

Процесс лазерного термоупрочнения состоит в быстром нагреве и охлаждении поверхностного слоя обрабатываемого материала благодаря преобразованию энергии лазерного излучения в тепловую энергию при определенном времени воздействия. При лазерной термообработке в зоне лазерного воздействия возникают фазы и структуры, аналогичные фазам и структурам, образующимся при традиционных способах закалки, таких как закалка в печач.

Однако к особенностям, присущим нагреву материала с использованием лазерного луча, можно отнести крайне высокие скорости нагрева и охлаждения за счет теплоотвода в тело металла, значительные температурные градиенты. Таким образом, тепловые процессы, инициированные лазерным воздействием, имеют некоторые отличия от традиционных способов нагрева материала. Особое значение при лазерной термообработке имеет изменение оптических и механических свойств обрабатываемого изделия, поскольку от способности поглощать излучение и коэффициента поглощения зависит объем распределенного внутри материала тепла, его пространственное расположение и термические циклы процесса.

Главным недостатком, препятствующим активному внедрению CO<sub>2</sub>-лазеров для решения данной задачи, является низкий электрооптический КПД процесса. Для углекислотного лазерного источника КПД от розетки составляет в среднем 7...10 %, а коэффициент поглощения металлами излучения рабочей длины волны CO<sub>2</sub>-лазера – 10,6 мкм также крайне невысок. Чтобы его увеличить применяют различные поглощающие покрытия, что, в свою очередь, приводит к появлению дополнительных технологических операций, усложняет процесс термообработки и кардинальным

образом не увеличивает поглощательную способность. В итоге суммарный КПД процесса не превышает доли процента.

За последние 15 лет на рынке появились мощные волоконные лазеры мульткиловаттного диапазона, которые произвели настоящую революцию в области обработки материалов. Уже сегодня большинство промышленных лидеров во всех отраслях производственного сектора, таких как автомобилестроение, судостроение, железнодорожная отрасль, авиация и космос, атомная промышленности и тяжелое машиностроение, сделали выбор в пользу волоконных лазеров [11].

Принцип термообработки с использованием волоконных лазеров схож с процессами термообработки, реализованными другими способами. Нагрев до температуры выше критической происходит энергией расфокусированного лазерного луча, перемещаемого по поверхности заготовки. На этой стадии происходит фазовое превращение из феррита в аустенит. Далее происходит быстрый теплоотвод за счет основного материала изделия, что приводит к преобразованию 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. Результат лазерной термообработки – повышение износостойкости и контактно-усталостной прочности обработанной детали в несколько раз.

Стоит также отметить, что вследствие отсутствия выдержки в аустенитной зоне при лазерной термообработке структура закаленного слоя имеет более мелкую фракцию и дисперсность, чем при объемной закалке, что положительно влияет на повышение твердости и износостойкости обработанной детали. Длины игл мартенсита могут отличаться в 2,5–3 раза при лазерной и традиционной термообработке. В результате данной особенности твердость детали, обработанной лазером, возрастает на 2...4 HRC, что недостижимо при классических способах закалки [12].

Кроме того, образуются дополнительные сжимающие напряжения, положительно влияющие на общее напряженное состояние изделия. При мелкодисперсной структуре закаленного слоя обрабатываемая деталь обла-

дает повышенными триботехническими характеристиками, достигается оптимальное сочетание твердости, прочности и пластичности. Также лазерное термоупрочнение позволяет достичь сильнейшего положительного эффекта при сопротивлении ползучести металла, так как мелкодисперсная структура предотвращает пластическое течение стали, возникающее вследствие резких градиентов температур [13]. Стоит также отметить, что структура, получаемая при закалке лазерным лучом, является более изотропной в сравнении с консервативными способами закалки.

По мнению авторов, упрочнение с использованием именно волоконных лазеров должно в будущем быть использовано для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колесных пар. Лазерная поверхностная обработка имеет технологические преимущества по сравнению с традиционными способами упрочнения материалов. Вот некоторые из них:

- 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;
- существенная экономия электроэнергии;
- высокий КПД и низкое энергопотребление волоконного лазера;
- компактные размеры и высокая надежность лазерного оборудования;
- отсутствие необходимости в применении газовых смесей;
- передача излучения по транспортному волокну без юстировки;
- нет необходимости в нагреве всей массы детали;
- не нужна последующая термообработка;
- сохранение геометрии обрабатываемой детали;
- резкое уменьшение длительности термических циклов;
- более мелкодисперсная структура;
- более изотропная структура;
- экологичность и безвредность технологии для оператора;
- высокая производительность и минимальное время технологического цикла;

- минимальная себестоимость метра упрочненного слоя;
- возможность автоматизации и роботизации процесса.

Отметим, что лазерное термоупрочнение не является универсальным способом закалки всех металлических деталей. Однако большинство технологических задач возможно эффективно и производительно решать с помощью современных волоконных лазеров. К недостаткам технологического процесса лазерной термообработки необходимо отнести высокую стоимость лазерных комплексов, однако, в связи с массовым производством волоконных лазеров, есть устойчивая тенденция снижения стоимости за Ватт выходной мощности данных приборов, что делает их более доступными для потребителя [14].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Балановский, А.Е., Глазков, В.С. Мороз, Б.А.** Плазменное упрочнение гребней колесных пар подвижного состава // Сб. тр. СГУПС «Новые технологии на ВСЖД». – Новосибирск: СГУПС, 1999. – С. 57-65.
2. **Балановский, А.Е.** Особенности структурообразования в среднеуглеродистых сталях при плазменном поверхностном упрочнении и их влияние на сопротивляемость контактно-усталостным нагрузкам // Дисс. докт. техн. наук. – Иркутск, 2012. – 227 с.
3. **Балановский, А.Е., Хаяси, С.М.** Проблема износа пары трения колесо - рельс (краткий анализ и предложение). – Иркутск: Плазмопротек, 1997. – 56 с.
4. **Справочные материалы по причинам поступления грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт за 10 месяцев 2016 г.** РЖД.ЦДИУ ВХ.ПКБ.ВХ
5. **Марков, Д.П.** Триботехнические характеристики колесо-рельсовой пары трения // Трение и износ. – 1995. – Т16. – N1. – С. 138-156.
6. **Коган, А.Я.** Оценка износа рельсов и бандажей колесных пар при движении подвижного состава в кривых участках пути // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – №2. – С. 36-40.
7. **Ларин, Т.В., Парышев, Ю.М., Вихрова, А.М.** Низколегированная сталь для колес грузовых вагонов // Тематич. сб. тр. «Производство железнодорожных колес и рельсов». – Харьков, вып. III, – 1975. – С. 103-107.
8. **Инженерия поверхности детали /** Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с
9. **Петров С.Ю., Костюкевич А.И., Рябов А.А.** Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар // Мир транспорта. 02, 2013.
10. **Киселев, С.Н., Саврухин, А.В., Кузьмина, Г.Д.** Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное и структурное состояние гребней бан-

дажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. – № 6. – С.9–17.

11. Богданов, А.В., Соколов, В.И., Шмелев, С.А. Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки железнодорожных колес // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 10(76). – С. 32-38.

12. Забелин, А.М., Оришич, А.М., Чирков, А.М. Лазерные технологии машиностроения. – Новосибирск: Издательство Новосиб. гос. ун-та, – 2004. – 142 с.

13. Богданов, А.В. Волоконные технологические лазеры и их применение: учеб. пособ. / А. В. Богданов, Ю. В. Голубенко. – СПб.: Лань, 2016. – 208 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).

14. Dr. Arnold Mayer. OPTECH CONSULTING. High Power Lasers for Materials Processing. Market Analysis and Forecast. October 2017.

## REFERENCES

1. Balanovsky, A.E., Glazkov, V.S., Moroz, B.A. Flange plasma strengthening of rolling-stack wheel pairs // *Proceedings of SSUC "New Technologies on ESR"*. – Novosibirsk: SSUC, 1999. – pp. 57-65.

2. Balanovsky, A.E. Structurization peculiarities in medium carbon steels at plasma surface strengthening and their impact upon resistance to fatigue loads // *D. Eng. Degree Thesis*. – Irkutsk, 2012. – pp. 227.

3. Balanovsky, A.E., Hayasy, S.M. *Wear Problem in Friction Couple of Wheel-Rail* (short analysis and offers). – Irkutsk: Plasmaprotec, 1997. – pp. 56.

4. Reference sources on reasons of freight car delivery for current uncoupling repair during 10 months of 2016. RR CDIU CM.PKB.CM

5. Markov, D.P. Tribologic characteristics of Wheel-Rail Friction Couple // *Friction and Wear*. – 1995. – Vol. 16. – No.1. – pp. 138-156.

6. Kogan, A.Ya. Assessment of rails and wheel pair tread wear at rolling-stock motion along crooked ways // *Bulletin of ARRIRC*. – 1990. – No.2. – pp. 36-40.

7. Larin, T.V., Paryshev, Yu.M., Vikhrova, A.M. Low-alloy steel for freight car wheels // *"Rail and Railway Wheel Manufacturing" Topic Proceedings*. Kharkov, Issue III, - 1975. – pp. 103-107.

8. *Part Surface Engineering* / Authors' Group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

9. Petrov S.Y., Kostukevitsh A.I., Ryabov A.A. Hardening of the ridges and reduced wear of wheel. *Mir transporta – World of transport*, 2013, no. 2.

10. Kiselyov, S.N., Savrukhin, A.V., Kuzmina, G.D. Plasma treatment impact upon stress-strain and structural state of wheel tread flanges in locomotives // *Welding*. – 2001. – No.6. – pp. 9-17.

11. Bogdanov, A.V., Sokolov, V.I., Shmelyov, S.A. Choice of optical arrangement optimum patterns for problem of railway wheel laser thermal treatment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.10(76). – pp. 32-38.

12. Zabelin, A.M., Orishich, A.M., Chirkov, A.M. *Laser Technologies in Mechanical Engineering*. – Novosibirsk: Publishing House of Novosibirsk State University, - 2004. – pp. 142.

13. Bogdanov, A.V. *Fiber Technological Lasers and Their Application: manual* / A.V. Bogdanov, Yu.V. Golubenko. – S-Pb.: Lan, 2016. – pp. 208. (Textbooks for Colleges. Special Literature).

14. Dr. Arnold Mayer. OPTECH CONSULTING. High Power Lasers for Materials Processing. Market Analysis and Forecast. October 2017.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

УДК 621.789

DOI: 10.30987/article\_5b71326c345ef3.52170494

М.А. Тамаркин, д.т.н.,

С.Н. Шевцов, д.т.н.,

В.А. Лебедев, к.т.н.,

Ф.А. Пастухов, ведущий инженер

(Донской государственный технический университет, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## Технология вибрационной стабилизирующей обработки изделий машиностроения

В статье раскрыта сущность вибрационной стабилизирующей обработки деталей и представлены способы её реализации; предложены методики разработки технологической системы, расчёта параметров управляющего воздействия стабилизирующей обработки; даны рекомендации по проектированию технологического оборудования.

**Ключевые слова:** вибрационная стабилизирующая обработка; технология; управляющие воздействия; энергопотребление.