

из чугуна ВЧТГ, показали, что эпициклические шестерни из высокопрочного чугуна принципиально работоспособны: недопустимых дефектов и трещин после эксплуатации не обнаруживается. Показано, что в одинаковых эксплуатационных условиях поверхности шестерен из нового материала «Моника» повреждены в меньшей степени, чем стальные.

2. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является перспективным для изготовления зубчатых колес номенклатуры ОАО «Гомсельмаш», особенно крупногабаритных, поскольку обеспечиваются приемлемые служебные свойства, которые хорошо регулируются путем соответствующего подбора режимов термообработки.

3. По данным плано-экономического управления ОАО «Гомсельмаш», стоимость получаемых в индивидуальном производстве крупногабаритных зубчатых колес из чугуна ВЧТГ на 20 % ниже по сравнению с серийными стальными.

#### Библиографические ссылки

1. Цитович И. С., Каноник И. В., Вавуло В. А. Трансмиссии автомобилей. – Минск : Наука и техника, 1979. – 256 с.
2. Шебастинов М. П. Высокопрочный чугун в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1988. – 216 с.

Получено 02.06.2017

3. Там же.
4. Микрюков В. М., Сазонов О. А. Применение бейнитного высокопрочного чугуна // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей : инф. сборник тех. материалов / под ред. Н. Н. Александрова [и др.]. – М. : Metallurg, 2004. – С. 260–262.
5. Беликов А. И., Жуков Л. А., Маццарелли Д. Н. Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
6. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В. А. Жмайлик [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь). – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 73–77.
7. Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В. О. Замятнин [и др.] // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь). – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 79–84.
8. Пат. 15617 Респ. Беларусь, МПК С 22С37/04. Чугун с шаровидным графитом и высоким сопротивлением усталости / Л. А. Сосновский, В. А. Жмайлик, Н. В. Псырков, В. О. Замятнин, В. В. Комиссаров ; заявители РУП «Гомсельмаш», ООО «НПО Трибофатика». – № а20101428 ; заявл. 04.10.2010 ; опубл. 30.04.2012. – 4 с.
9. Цитович И. С., Каноник И. В., Вавуло В. А. Указ. соч.

УДК 621.822

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-112-117

**В. И. Гольдфарб**, доктор технических наук, профессор, Институт механики ИжГТУ имени М. Т. Калашникова  
**Е. С. Трубочев**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова  
**Е. В. Харанжевский**, доктор технических наук, Удмуртский государственный университет, Ижевск  
**А. Г. Ипатов**, кандидат технических наук, Ижевская государственная сельскохозяйственная академия  
**К. В. Богданов**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова  
**Ю. Ю. Матвеева**, АО «ИЭМЗ «КУПОЛ»

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ

### Введение

Как показала практика производства низкоскоростных тяжело нагруженных спиральных редукторов трубопроводной арматуры (ТПА) [1], в вечном вопросе совершенствования опор валов имеются резервы как с эксплуатационной, так и с технологической точек зрения. В трех поколениях конструкций этих редукторов [2] применялись разные варианты решений этого вопроса:

– опоры скольжения «сталь – чугун» (вал по корпусу, как это реализовано во многих «бюджетных» импортных редукторах [3], де-факто занимающих до половины отечественного рынка этой техники);

– подшипники качения, применение которых позволило обеспечить повышенную надежность и КПД редукторов, но вместе с тем обусловило появление ряда компоновочных ограничений и возрастание себестоимости редукторов (что связано с дефицитом

некоторых, удобных для компоновки, серий подшипников из-за падения отечественной подшипниковой отрасли);

– подшипники скольжения на основе металлофторопластового листа [4].

Последнее решение в целом оказалось достаточно надежным и эффективным с точки зрения обеспечения высокого КПД редуктора, дало универсализм в компоновке различных исполнений редукторов и обеспечило на первом этапе удовлетворительные экономические характеристики. Однако совершенствование редукторной техники и технологии с возрастающей остротой ставило вопрос о замещении этого решения другим, более экономичным, что в особенности стало актуальным из-за макроэкономических событий последних лет.

Эффективным способом улучшения характеристик контактных поверхностей стала их лазерная

модификация [5, 6] с нанесением антифрикционных покрытий. В настоящей работе отражены результаты нашей разработки в этой области, практически реализованные в течение последних двух лет при изготовлении радиальных и торцовых опор валов спиральных редукторов ТПА.

**Некоторые исходные положения**

По сути практическая задача состояла в замещении показавшего свою эффективность материала MU S [7]. Его основные нагрузочные и антифрикционные характеристики, перечисленные в таблице, стали для нас исходными при разработке новой технологии.

**Основные характеристики материала MU S [8]**

Максимальная работоспособность при сухом трении (PV-фактор)	Постоянная нагрузка	3,6 МПа · м/с
	Мгновенная нагрузка	250 МПа · м/с
Максимально допустимая нагрузка	Статическая	140 МПа
	При вращении	60 МПа
Коэффициент трения		0,03...0,2
Рабочая температура		-200...+280 °С

В силу специфики режима работы редукторов (низкие скорости, высокие и кратковременно действующие нагрузочные и перегрузочные моменты, относительно большие перекосы деталей) особую важность и одновременно сложность представляло из себя обеспечение работоспособности при максимальных контактных давлениях, действующих в подшипниках скольжения.

**Материалы и технология покрытия**

Привлекательными с точки зрения прочностных характеристик и несущей способности являются антифрикционные покрытия на основе бронз. Выбор их сопряжен рядом недостатков, в частности:

- нанесение довольно толстых (до 5 мм) покрытий, при этом снижается прочность сцепления с основой;
- сложность нанесения из-за высокой химической активности меди;
- необходимость работы в паре только с упрочненными поверхностями (низкая твердость контртела вызывает интенсивный износ последнего).

Благоприятными материалами в плане высоких антифрикционных свойств, демпферной способности и простоты использования являются баббиты. Низкая температура плавления баббитовых сплавов не вызывает сложности в нанесении на поверхности подшипника скольжения, возможность регулировки толщины наносимого слоя, а также возможность широкой модификации баббитовых сплавов заставили сделать выбор в пользу баббита Б83. Основная задача разработки технологии нанесения баббитового покрытия сводилась к повышению несущей способности покрытия, повышению термопрочности и высокой прирабатываемости при бедной смазке. Для модификации была принята технология нанесения покрытия с использованием высококонцентрированного источника энергии – лазерного излучения. Ра-

боты по упрочнению и синтезу антифрикционных покрытий с использованием лазерного излучения представлены в ряде работ [9–12] и доказывают свою эффективность.

С этой целью нами была разработана методика нанесения покрытия, включающая источник лазерного излучения и устройство для нанесения и разравнивания порошкового материала на основе баббита Б83, легированного дисульфидом молибдена MoS2 и порошковым графитом (рис. 1).

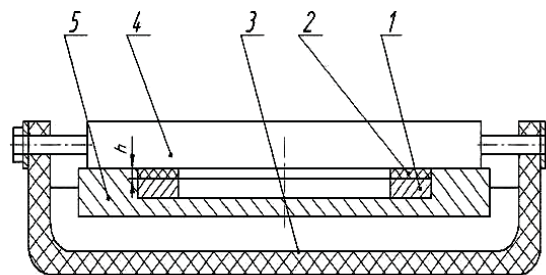


Рис. 1. Приспособление для нанесения порошковой композиции: 1 – основание подшипника скольжения; 2 – нанесенная порошковая композиция; 3 – основание; 4 – выравнивающий нож; 5 – матрица

Порошковая композиция на основе баббита Б83 дисперсностью 5...40 мкм смешивалась с дисульфидом молибдена (2,5 % по массе), добавлялся порошок графита (1 % по массе). На основе порошковой композиции готовили суспензию с использованием 2%-го раствора жидкой канифоли. Готовая суспензия при помощи приспособления наносилась на поверхность подшипника скольжения, разравнивалась и подвергалась сушке – испарению растворителя.

Лазерную обработку нанесенного порошкового материала производили на стальной подложке в виде кольца (поз. 2, рис. 1), которое прижималось к матрице 5, выполненной из алюминиевого сплава АЛ-9 для отвода тепла от подшипника скольжения и предупреждения деформации и коробления. Для лазерной обработки использовали твердотельный лазер с длиной волны 1,06 мкм мощностью 300 Вт. Луч лазера фокусировали в пятно диаметром 1,2 мм.

**Лабораторные исследования образцов**

Для анализа работоспособности покрытий выполнили триботехнические испытания в условиях сухого с использованием машины трения СМТ-2070, по схеме нагружения «диск – колодка» согласно ГОСТ 23222–84. Для анализа структурного и фазового состава покрытий выполнили металлографические исследования на микроскопе Neophot 32. Рентгеноструктурные исследования на автоматизированном дифрактометре ДРОН-6. Растровое изображение поверхности получали на сканирующем электронном микроскопе FEI INSPECT S50 при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для измерения микротвердости структурных составляющих и для получения распределения микротвердости по толщине покрытия применили прибор ПМТ-3М.

Вид поверхности во вторичных электронах после лазерной наплавки и результаты энергодисперсион-

ного анализа представлены на рис. 2 и 3. Видно, что в результате лазерного плавления формируется ровный слой с высокой плотностью. Энергодисперсионный микроанализ показывает содержание атомов олова, сурьмы, меди и железа на поверхности образцов. Олово, сурьма и медь входят в состав баббитового порошка Б83, а появление спектральных линий, принадлежащих железу, вызвано совместным переплавом порошкового слоя и тонкого поверхностного слоя стальной подложки.

Микроструктурные исследования показали наличие «стандартных» фаз баббитового покрытия: мягкой основы ( $\alpha$ -фазы), твердых включений на основе интерметаллидов ( $\beta$ -фазы) и игольчатых включений ( $\gamma$ -фазы) –  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (рис. 4).

Особенностью микроструктуры покрытия является повышенная дисперсность включений, что объясняется высокими скоростями кристаллизации, особенно  $\gamma$ -фазы. В зоне сплавления нет пор и непроваров, что говорит о верных режимах обработки и обеспечении высокой прочности соединения.

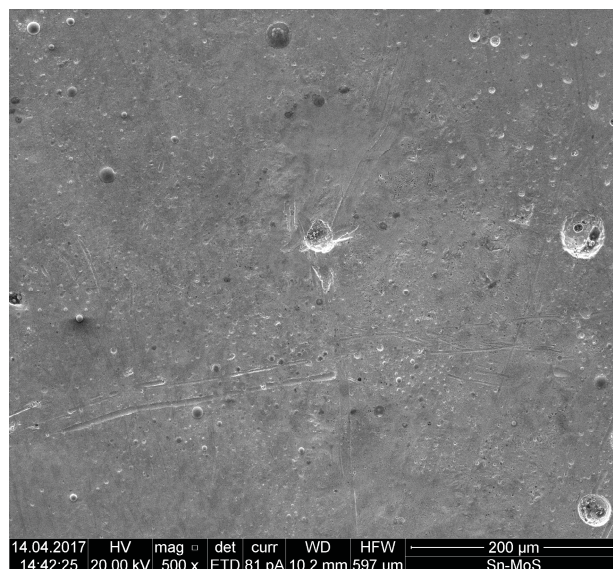


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности баббитового композиционного покрытия после лазерной наплавки ( $\times 500$ )

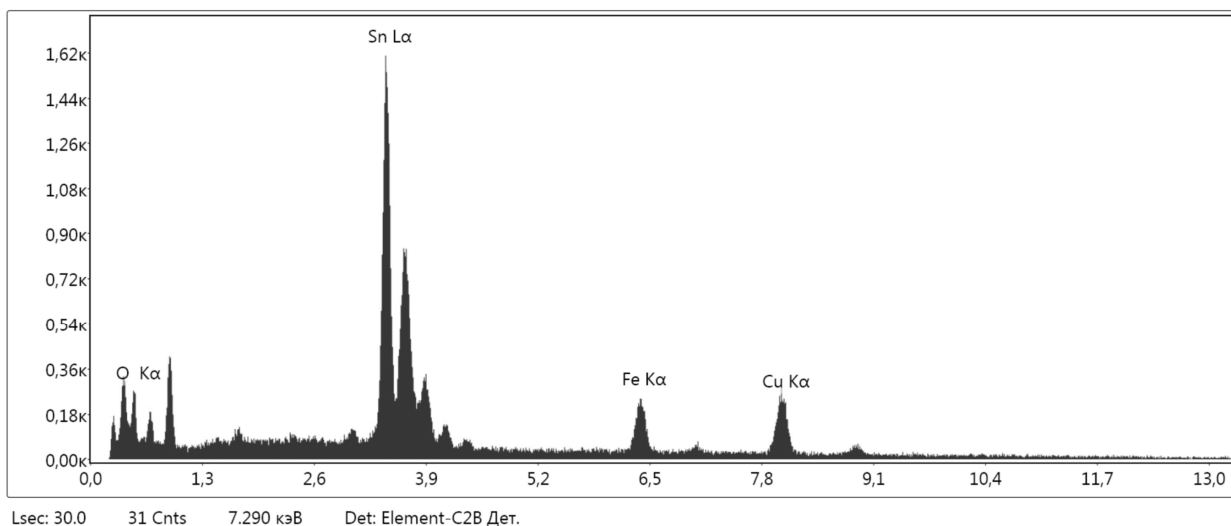


Рис. 3. Энергодисперсионный микроанализ поверхности покрытия

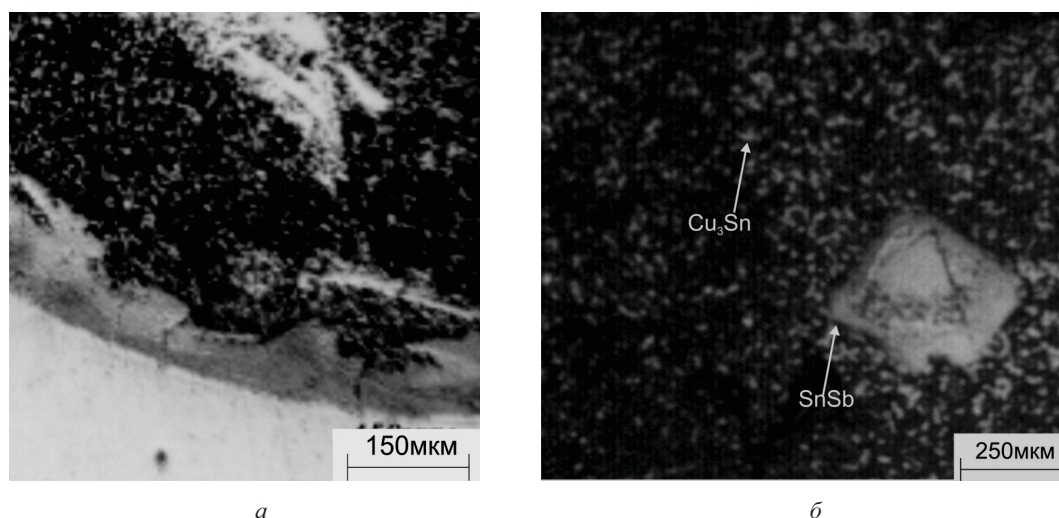


Рис. 4. Микроструктура формируемых покрытий

На работоспособность покрытия определяющее влияние оказывают типы формируемых структур и их распределение в объеме покрытия. Рентгеноструктурные исследования выявили наличие интерметаллидных соединений на основе SnSb, Cu<sub>3</sub>Sn, а также соединения на основе Fe<sub>2</sub>Sn (рис. 5).

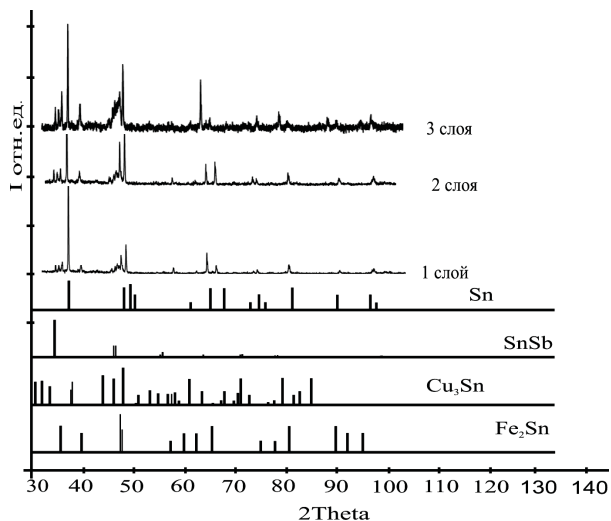


Рис. 5. Дифрактограммы покрытий при увеличении их толщины

Распределение структурных составляющих по толщине покрытия свидетельствует о том, что при обработке происходит достаточно интенсивное оплавление тонкого поверхностного слоя основы с наносимым порошковым материалом, что является основанием для повышения прочности сцепления покрытия с основой. Количественный анализ структурных составляющих выявил их неоднородность распределения по толщине покрытия: в зоне сцепления с основой преобладают соединения на основе Fe<sub>2</sub>Sn, SnSb, а также чистого олова. Поверхностные слои характеризуются повышенным содержанием соединений Cu<sub>3</sub>Sn. Основываясь на этом, можно сказать, что покрытие обладает градиентностью механических свойств, в частности, нижележащие слои более мягкие и податливые благодаря наличию α-твердого раствора и β-фазы (SnSb), а поверхностные слои более твердые за счет увеличения количества γ-фазы (Cu<sub>3</sub>Sn), обладающей более высокой твердостью. Таким образом, формируемое покрытие является композиционным по структурно-фазовому составу. Такая характеристика покрытия полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подшипникам скольжения, работающим при высоких удельных нагрузках.

Для анализа работоспособности предложенного покрытия произвели износные испытания в условиях сухого трения в сравнении с материалом MU S. Главный результат исследований (рис 6): проектируемое покрытие в целом не уступает указанному материалу. В начальный период работы оба покрытия подверглись приработке, характеризовавшейся интенсивным износом при повышающихся моментах трения. Предложенное покрытие приработалось зна-

чительно быстрее и перешло в режим нормальной работы, что объясняется наличием у него более мягкой структуры. Момент трения в период приработки у материала MU S несколько ниже, что объясняется работой тонкого инфильтрованного покрытия на основе тефлона.

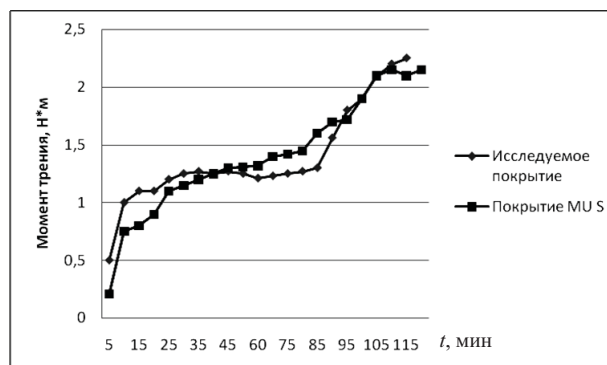


Рис. 6. Зависимость момента трения от времени (сухое трение, 15 МПа)

В режиме нормальной работы момент трения у предложенного покрытия более постоянен и стабилен. Если работа металлофторопластовых опор характеризуется постепенным повышением момента трения, то композиционное баббитовое покрытие характеризуется длительной эксплуатацией с постоянным моментом. Повышение момента трения наступает лишь при эксплуатации покрытия в течение 90 мин с последующим скачкообразным повышением момента трения и разрушением покрытия. Объяснением стабильности работы может служить особенность строения композиционного покрытия, а градиентность состава и, следовательно, механических свойств по толщине покрытия позволяет одинаково хорошо противостоять высоким контактным нагрузкам и скоростным режимам с обеспечением высоких антифрикционных свойств. Для определения несущей характеристики покрытия произвели анализ величины момента трения в зависимости от прилагаемой нагрузки, при этом время воздействия одной нагрузки ограничивали 5 мин (рис. 7).

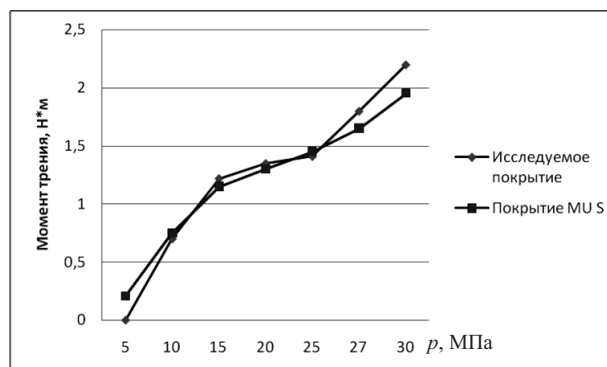


Рис. 7. Зависимость момента трения от контактного напряжения

Несущая способность предложенного покрытия в условиях сухого трения характеризуется более

плавным изменением момента трения при повышении контактной нагрузки. При повышении нагрузки свыше 25 МПа у предложенного покрытия наблюдается повышение момента трения без признаков микроразрушения покрытия. При повышении нагрузки свыше 30 МПа у предложенного покрытия наблюдаются небольшие скачкообразные изменения момента трения. Появление следов разрушения покрытия возникает при нагрузке свыше 35 МПа. У материала MU S (из оптического анализа поверхности трения) микроразрушения поверхности наступают в момент изнашивания тонкого поверхностного слоя из тефлона, что соответствует нагрузке 23 МПа. При дальнейшем увеличении контактной нагрузки у покрытия наблюдается нестабильность момента трения со значительным его повышением. Разрушение покрытия наступило при контактной нагрузке 37 МПа.

#### Аспекты практической реализации серийной технологии

Нанесение покрытия на детали серийной продукции производится на малогабаритной автоматизированной лазерной установке HTS-300P [13]. Исходной заготовкой является горячекатаный лист 1200×500×2,5 мм из стали 08пс, не подвергающийся какой бы то ни было предварительной подготовительной обработке. Последовательность изготовления следующая:

- раскрой листа на кольца и полоски – торцовые и радиальные опоры;
- нанесение и выравнивание материала покрытия;
- лазерная обработка покрытия.

Для нанесения и выравнивания покрытия применяется оснастка (рис. 8):

- магнитная плита для минимизации пространственных отклонений раскроенных заготовок (с этой же целью отдано предпочтение горячекатаному листу);
- трафарет из стального листа;
- выравнивающий нож (шпатель) из немагнитного материала.



Рис. 8. Трафарет для нанесения и выравнивания материала покрытия

При отладке режима лазерной обработки мы минимизировали время обработки и геометрические погрешности деталей – разнотолщинность, пространственные отклонения и микронеровности поверхности. Ограничением являлось отсутствие непроплава подложки (это ведет к боллинг-эффекту) и избыточного проплавления (появление избыточного железа в составе наносимого покрытия). Оптимальным стал вариант, при котором проплавление

ведется строчками, сходящимися от крайних участков деталей к срединным. В частности, для торцовых опор (колец) строчки являлись дугами окружностей, пронумерованными в последовательности проплавления, как показано на рис. 9.

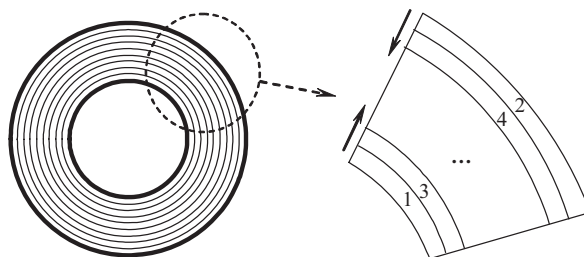


Рис. 9. Последовательность обработки зон проплавления кольца

Стабильность получения свойств покрытия в процессе отладки контролировалась по геометрическим (разнотолщинность, микрогеометрия) и эксплуатационным (коэффициент трения, ресурс) параметрам.

Время нанесения покрытия на кольцо с наружным диаметром 125 мм составило около 2 мин, а итоговый эффект – относительный выигрыш в стоимости опор скольжения редукторов при многономенклатурном мелкосерийном их производстве – не менее чем 40-55 % (предварительная оценка).

#### Библиографические ссылки

1. Спиридные редукторы трубопроводной арматуры / В. И. Гольдфарб, Д. В. Главатских, Е. С. Трубачев, А. С. Кузнецов, Е. В. Лукин, Д. Е. Иванов, В. Ю. Пузанов. – М.: Вече, 2011. – 224 с.
2. Там же.
3. Гольдфарб В. И., Трубачев Е. С., Кузнецов А. С. Возможности и проблемы импортозамещения на рынке редукторов ТПА // Арматуростроение. – 2015. – № 2(95). – С. 60–65.
4. URL: [http://www.gidmash.ru/files/catalog\\_HMGroup.pdf](http://www.gidmash.ru/files/catalog_HMGroup.pdf) (дата обращения: 17.04.17).
5. Тескер Е. И. Повышение эксплуатационных свойств механических систем модификацией поверхностей трения полимерными материалами // Теория и практика зубчатых передач : тр. междунар. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – С. 26–28.
6. Исследование механизма формирования адгезионных связей фторполимерных пленочных покрытий с металлической подложкой под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера / Е. И. Тескер, А. О. Литинский, С. Е. Тескер, А. Н. Кольченко // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 1. – С. 70–77.
7. Тескер Е. И. Указ. соч.
8. Там же.
9. Харанжевский Е. В. Расслоение жидкости и формирование пересыщенных твердых растворов в системе Fe – Cu при высокоскоростном лазерном плавлении // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 9. – С. 920–926.
10. Kharanzhevskiy E., Reshetnikov S. Chromium oxide dissolution in steels via short pulse laser processing // Appl. Phys. A. – 2014. – Vol. 115. – Pp. 1469–1477.

11. Синтез композитных покрытий при высокоскоростном лазерном спекании металлических порошковых смесей / М. Д. Кривилев, Е. В. Харанжевский, В. Г. Лебедев, Д. А. Данилов, Е. В. Данилова, П. К. Галенко // Физика металлов и металловедение. – 2013. – Т. 114, № 10. – С. 871–893.

12. *Ипатов А. Г., Харанжевский Е. В., Матвеева Ю. Ю.* Структура и свойства модифицированного антифрикцион-

Получено 11.05.2017

ного покрытия на основе металлической композиции // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 2(47). – С. 46–53.

13. URL: <http://version-two.lazer-bulat.ru/catalog?p=122> (дата обращения: 17.04.17).

14. Там же.