

9. Чудаков, Д.А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля: учеб. пос. / Д.А. Чудаков. – М.: Колос, 1972. – 384 с.

10. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков [и др.]. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.

11. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики: динамика / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1983. – 640 с.

12. Гуськов, В.В. Тракторы. Часть II. Теория / В.В. Гуськов. – Мн.: Вышэйшая школа, 1977. – 384 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.12.2016

УДК 621.923

## КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Л.М. Акулович,**

*профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**Л.Е. Сергеев,**

*доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**Е.В. Сенчуров,**

*начальник отдела ВНТР НИИМЭСХ БГАТУ*

**Е.Г. Германович,**

*магистрант БГАТУ*

*В статье рассмотрены методы технологического обеспечения коррозионной стойкости закаточных роликов, используемых в пищевой промышленности. Установлено, что применение магнитно-абразивной обработки позволяет повысить коррозионную стойкость детали в 1,25-2,7 раза по сравнению с другими методами.*

*Ключевые слова: закаточный ролик, коррозионная стойкость, магнитно-абразивная обработка.*

*The article describes the methods of technological process of corrosion resistance of seaming rollers used in the food industry. It was found that the use of magnetic-abrasive machining improves the corrosion resistance of parts in 1,25-2,7 times, compared to other methods.*

*Keywords: seaming rollers, corrosion resistance, magnetic-abrasive machining.*

### Введение

Общая масса металла, используемого в разнообразных объектах техники и конструкциях, непрерывно возрастает из года в год. Потери металла от коррозии также адекватно увеличиваются, достигая таких масштабов, что становятся сравнимыми с затратами на развитие крупнейших отраслей промышленности. Подсчитано, что вследствие коррозионных разрушений ежегодно выходят из строя конструкции, в которых заключено столько же металла, сколько дает 1/3 мощностей металлургической промышленности. До 2/3 металла, заключенного в выходящих из строя металлоконструкциях, возвращается в металлооборот как вторсырье, а 10-15 % общего объема ежегодно добываемого металла теряется и составляет невозвратимые потери. Поэтому считается, что каждая 6-я домна металлургической промышленности работает на восполнение коррозионных потерь [1, 2].

Проблемы коррозии постоянно обостряются из-за непрерывного увеличения номенклатуры производимых металлов и ужесточения условий их использования. Среда, в которой используются металлические конструкции, становится все более агрессивной, в том числе и за счет ее загрязнения. Металлические изделия, используемые в технике, работают в условиях все более высоких температур и давлений, мощных потоков газов

и жидкостей. Поэтому вопросы защиты металлических материалов от коррозии становятся все более актуальными. Полностью предотвратить коррозию металлов невозможно, поэтому единственным путем борьбы с ней является поиск способов ее замедления [1].

Проблема защиты металлов от коррозии возникла почти в самом начале их использования. Люди пытались защитить металлы от атмосферного воздействия с помощью жира, масел, а позднее и покрытием другими металлами и, прежде всего, легкоплавким оловом (лужением). В настоящее время борьбу с коррозией ведут сразу в нескольких направлениях – пытаются изменить среду, в которой работает металлическое изделие, повлиять на коррозионную устойчивость самого материала, предотвратить контакт между металлом и агрессивными веществами внешней среды.

### Основная часть

Разрушение металлических конструкций, сельскохозяйственных и транспортных машин, промышленной аппаратуры становится причиной простоев, аварий, ухудшения качества продукции. Учет возможной коррозии приводит к повышенным затратам металла при изготовлении аппаратов высокого давления, паровых котлов, металлических контейнеров для токсичных и радиоактивных веществ и т.д. Это увеличи-

вает общие убытки от коррозии. Немалые средства приходится тратить на противокоррозионную защиту. Соотношение прямых убытков, косвенных убытков и расходов на защиту от коррозии оценивают как (3-4):1:1. В промышленно развитых странах ущерб от коррозии достигает 4 % национального дохода [2].

В соответствии с Единой системой защиты от коррозии и старения (ГОСТ 9.908-85) коррозия металлов определена как разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой [3]. В системе международной стандартизации это понятие несколько шире: физико-химическое взаимодействие между металлом и средой, в результате которого изменяются свойства металла и часто происходит ухудшение функциональных характеристик металла, среды или включающей их технической системы [4].

Коррозия вызывается химической реакцией металла с веществами окружающей среды, протекающей на границе металла и среды. Чаще всего это окисление металла, например, кислородом воздуха или кислотами, содержащимися в растворах, с которыми контактирует металл. Особенно подвержены этому металлы, расположенные в ряду напряжений (ряду активности) левее водорода, в том числе железо:



Гидроксид железа (III) очень неустойчив, быстро теряет воду и превращается в оксид железа (III) [5]. Это соединение не защищает поверхность железа от дальнейшего окисления.

При одновременном воздействии на металл внешней среды и механических напряжений все коррозионные процессы активизируются, поскольку при этом понижается термическая устойчивость металла, нарушаются оксидные пленки на поверхности металла, усиливаются электрохимические процессы в местах появления трещин и неоднородностей.

На рис. 1 представлена схема коррозии стали при контакте с водой и строение слоя ржавчины на по-

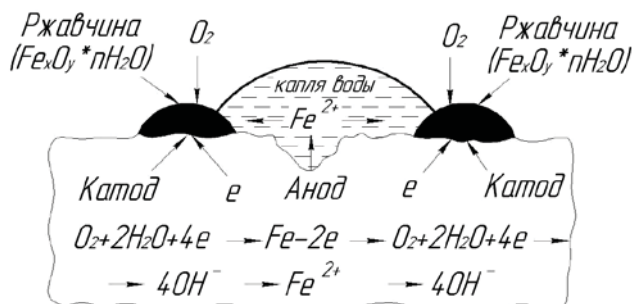


Рисунок 1. Схема коррозии стали при контакте с водой

верхности железа при атмосферной коррозии (рис. 2).

Межкристаллитная коррозия (рис. 3) является одним из наиболее опасных видов местной коррозии, приводящей к избирательному разрушению границ зерен, что сопровождается потерей прочности и пластичности сплава (часто без изменения его внешнего вида) и преждевременным разрушением конструк-

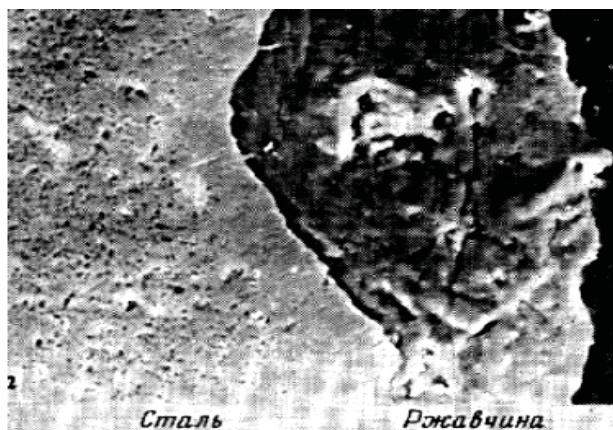


Рисунок 2. Строение слоя ржавчины на поверхности железа при атмосферной коррозии

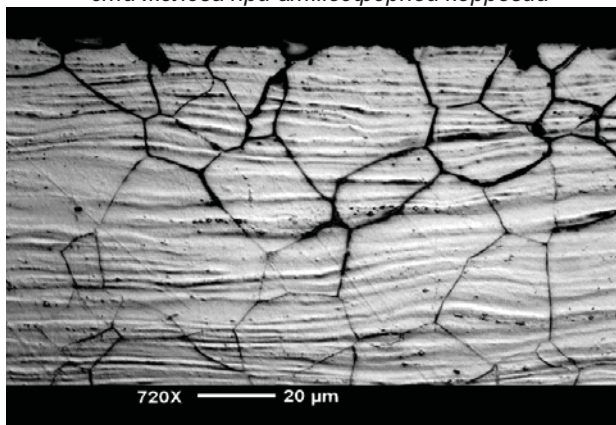


Рисунок 3. Межкристаллитная коррозия

ций. Коррозия этого вида наблюдается у многих сплавов: хромистых и хромоникелевых сталей, никелевых сплавов, алюминиевых сплавов и др. [6].

Причиной склонности сплавов к межкристаллитной коррозии чаще всего являются структурные превращения на границах зерен (образование, так называемых, избыточных фаз), которые превращают эту узкую зону в мало поляризующийся анод, который и подвергается усиленному коррозионному разрушению [6].

Условно методы защиты металлов от коррозии, которые разработали ученые и производители, классифицируют, используя в качестве признаков направление воздействия на процесс, степень активности защиты и др. К первой группе относятся методы, основанные на воздействии на металл или на коррозионную среду. Под воздействием на металл понимается его легирование, т. е. создание сплавов за счет введения таких компонентов, которые позволяют уменьшить скорость его коррозионного разрушения.

Отдельную группу составляют методы, в основе которых лежит воздействие на границу металла с внешней средой, основанное на использовании покрытий или воздействии путем изменения потенциала. Сюда относят анодную и катодную защиту.

Все методы снижения коррозионных потерь предпочтительно использовать в комплексе уже на стадии проектирования объекта или конструкции из-

деля. Одним из важнейших в числе учитываемых факторов должен быть выбор материалов и методов снижения коррозионных потерь [7].

### Материалы и методы проведения эксперимента

Коррозионная стойкость рабочих поверхностей деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Основные свойства поверхности формируются в процессе ее изготовления и особенно на отделочных операциях. Создание новых отделочных методов обработки и совершенствование известных сопряжено с необходимостью использования прогрессивных режущих инструментов.

Наиболее эффективными способами для финишной обработки фасонных поверхностей деталей являются методы, основанные на использовании эластичной связки или незакрепленного абразива. Одним из перспективных способов обеспечения высокого качества рабочей поверхности является технология магнитно-абразивной обработки. Этот способ прост в осуществлении, экологически чист, обеспечивает высокое качество обработанных поверхностей деталей и существенное повышение их сопротивляемости износу, коррозии и механическим нагрузкам, обладает высокой производительностью и успешно заменяет процессы химической и электрохимической обработки.

Для возможности реализации магнитно-абразивной обработки были проведены экспериментальные исследования по определению технологических режимов обработки поверхности закаточного ролика.

Материал ролика Х12М ГОСТ 5950-73, НВ 90-120. В качестве оборудования для МАО использовался станок СФТ 2.150.00.00.000. ФАП – Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81 (рис. 4), зернистость ФАП,  $\Delta=100/160$  мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 %-й водный раствор. Величина рабочего зазора варьировалась от  $\delta = 1-3,5$  мм, коэффициент заполнения рабочего зазора,  $k_z=1$ , время обработки составляло  $t = 120$  с. Исходная шероховатость поверхности ролика  $Ra_1=0,8-1$  мкм. Выходными показателями служит величина удельного массового съема материала,  $Q$  мг и достигаемая шероховатость поверхности,  $Ra_2$ , мкм. Изменение массового съема производили на весах аналитических ВЛА 200 с

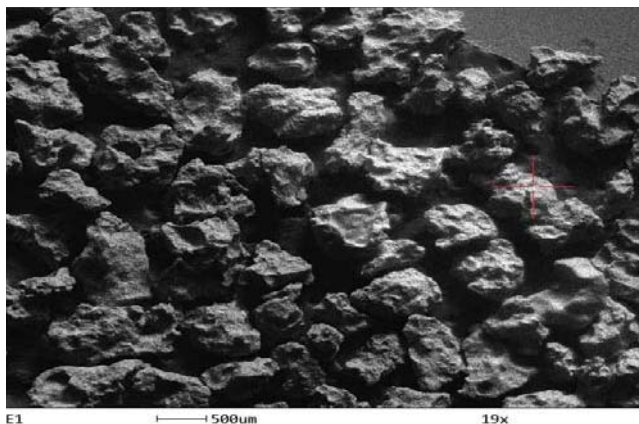


Рисунок 4. Морфология ферроабразивного порошка Ж15КТ

точностью до  $10^{-6}$  кг, шероховатость – на профилографе-профилометре 252-Калибр.

Методика проведения эксперимента включает ускоренные испытания при периодическом или полном погружении в раствор путем нанесения на поверхность испытываемых покрытий специальных паст или при воздействии солевого раствора в специальных коррозионных камерах (емкостях).

При использовании этого метода оценки на образец коррозионных испытаний накладывают прозрачную сетку, разделенную на квадраты ( $1 \times 1$  мм). Поэтому величинам  $n$  и  $N$  соответствует число квадратов  $n$  сетки, в которые попадают очаги коррозии до основы из общего числа квадратов сетки  $N$ .

В ходе исследований установлены особенности влияния защитных слоев, полученных термической обработкой, шлифованием и магнитно-абразивной обработкой, на коррозионные свойства исследуемого закаточного ролика.

Для этого проводились коррозионные испытания в 10 %-м водном растворе NaCl при температуре 20 °С. Методика определения коррозионной стойкости заключалась в оценке площади поверхности, занятой продуктами коррозии.

Испытаниям были подвергнуты образцы после токарной обработки, термической обработки, шлифования и магнитно-абразивной обработки (МАО). На рис. 5а представлен образец, обработанный методом МАО, до проведения испытаний на коррозионную стойкость. На рис. 5 б-в показана кинетика развития коррозии данного образца, которая наблюдалась в течение 336 часов, также выделены основные очаги коррозии (рис. 5, 1-2)

На основании полученных данных измерений площади, занятой продуктами коррозии, были построены зависимости интенсивности развития коррозии исследуемого образца от времени нахождения в экспериментальном растворе (рис. 6).

Поверхность после токарной обработки (рис. 7а) имеет регулярную структуру, определяемую режимами обработки, геометрией режущей кромки инструмента и т.д. Поверхность является комбинацией шероховатости, генерируемой подачей инструмента и случайной составляющей микро-шероховатости, генерируемой процессом стружкоудаления. Структура шероховатости определяется микрогеометрией режущей кромки резца, постоянно изменяющейся в процессе резания. Частота, с которой происходит это изменение, частично определяется неомогенностью обрабатываемого материала.

Гистограмма (рис. 8а) показывает распределение высот, близкое к гауссовскому, что подтверждается также значениями асимметрии. Такие значения характерны для кругового точения. Значение параметра  $Ra$  при круговом точении может варьироваться весьма существенно, поскольку оно зависит от формы режущей кромки резца, глубины резания и отношения подачи к частоте вращения заготовки.

Как видно из графиков материального объема и маслосъемности (рис. 8 б-г), в процессе трения данного

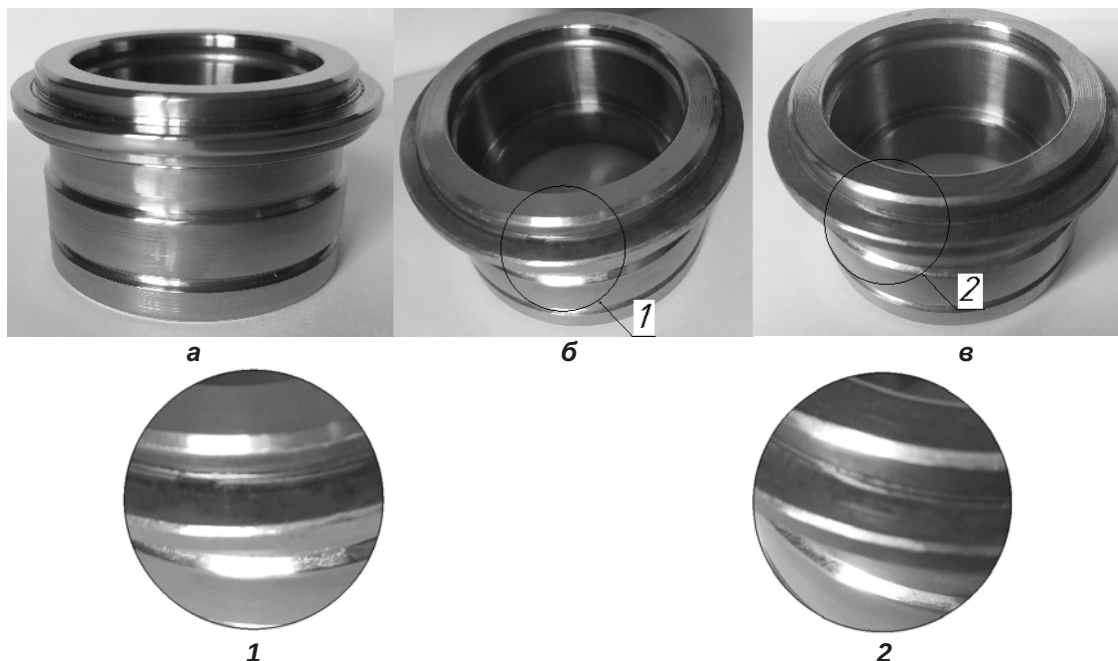


Рисунок 5. Экспериментальные образцы закаточного ролика, обработанного методом МАО:  
а – до начала эксперимента; б – через 48 часов; в – через 336 часов; 1, 2 – очаги коррозии

Таблица 1. Данные измерения  
покрытия коррозией образцов

| Время проведения эксперимента, час. | Площадь покрытия образца коррозией, % |                             |                  |           |
|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|------------------|-----------|
|                                     | после токарной обработки              | после термической обработки | после шлифования | после МАО |
| 48                                  | 7                                     | 5                           | 5                | 3         |
| 96                                  | 14                                    | 7                           | 8                | 5         |
| 168                                 | 18                                    | 12                          | 10               | 8         |
| 240                                 | 25                                    | 16                          | 12               | 10        |
| 336                                 | 32                                    | 18                          | 15               | 12        |

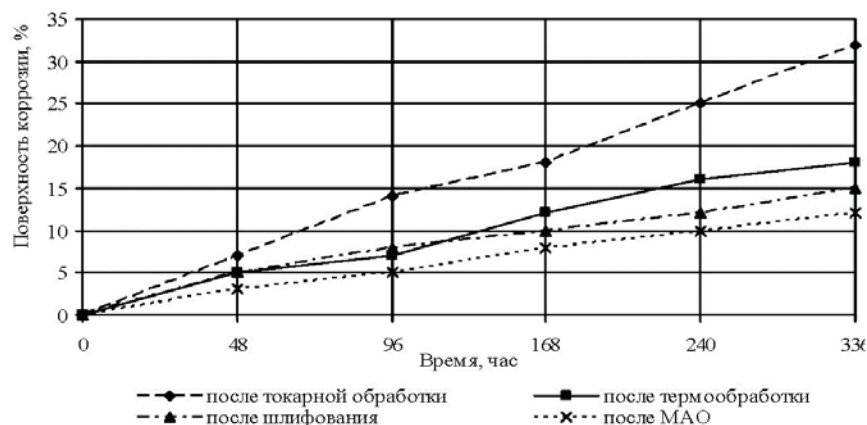


Рисунок 6. График коррозии образцов в зависимости от времени проведения эксперимента

типа поверхности происходит достаточно быстрое удаление, приблизительно 50 % от общей высоты шероховатости, после чего наступает некоторая стабилизация.

Впадины, возникающие в образце, достаточно узкие и строго ориентированы поперек направлению движения инструмента [8].

Структура поверхности после шлифования (рис. 7б) представляет собой множество неглубоких, параллельно расположенных царапин, произведенных абразивными зернами, находящихся на периферии шлифовального круга. Зерна, участвующие в процессе шлифования, имеют разную степень износа, что приводит к неоднородности получаемой шероховатости поверхности.

Новые зерна, не подвергнувшиеся износу, производят резание поверхности. Поскольку инструмент для правки шлифовальных кругов придает поверхности шлифовального круга ярко выраженную направленную структуру, то совместно с траекторией движения шлифовального круга это определяет анизотропность получаемой поверхности (рис. 9).

Особенностью тонкого шлифования является наличие на поверхности четко выраженных глубоких впадин, не характерных для других видов шлифования. Данные впадины создаются острыми

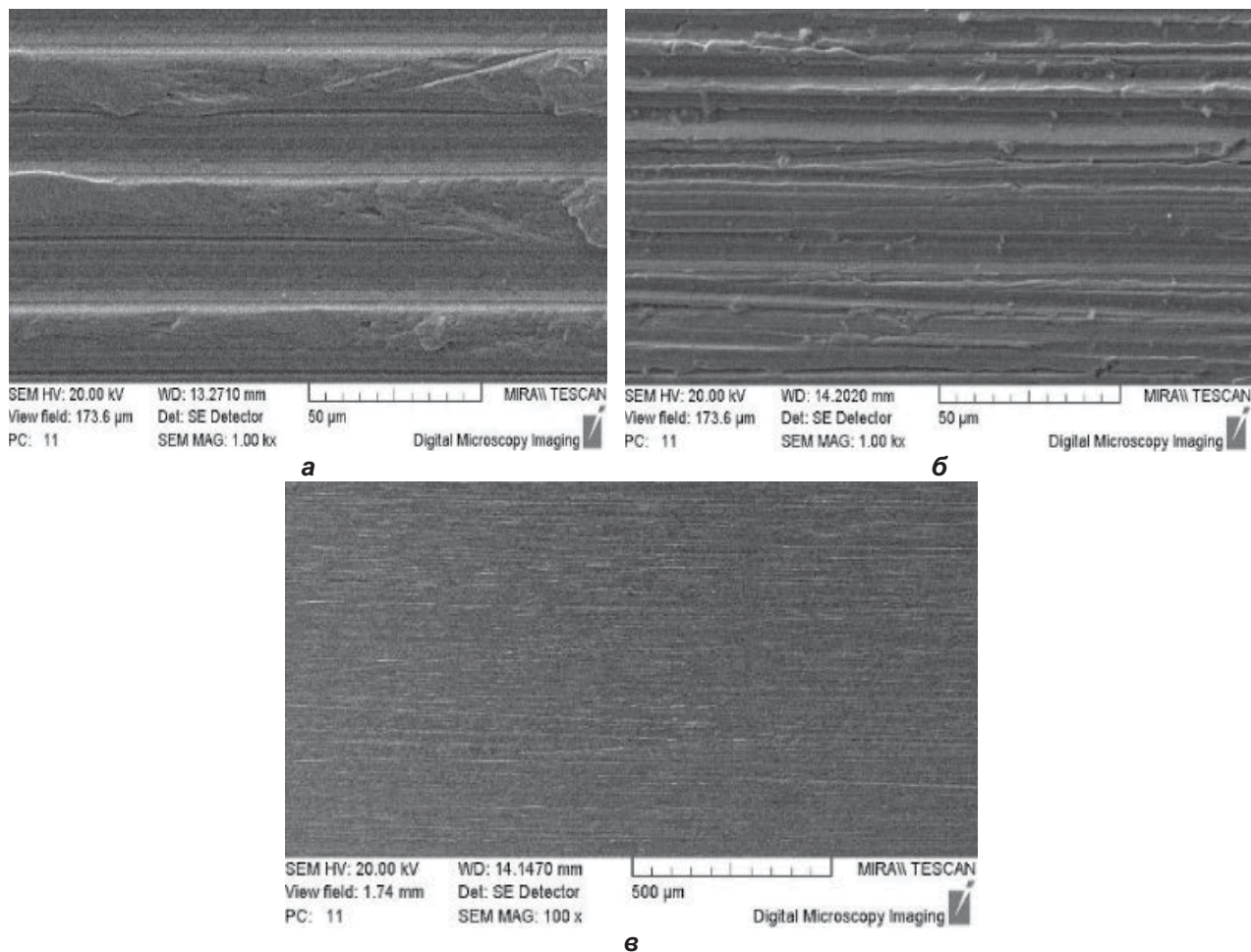


Рисунок 7. Топографии поверхностей исследуемых образцов:  
а – после токарной обработки; б – после шлифования; в – после магнитно-абразивной обработки

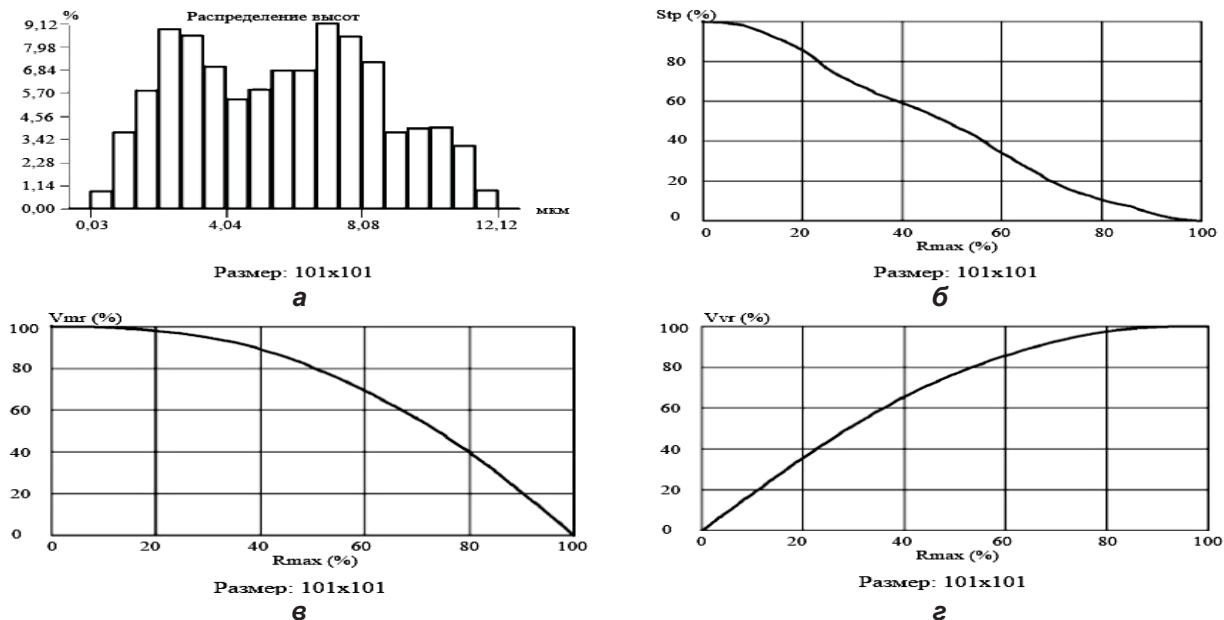


Рисунок 8. Топографические характеристики поверхности после токарной обработки:  
а – гистограмма распределения высот; б – опорная кривая поверхности; в – материальный объем;  
г – маслосъемность

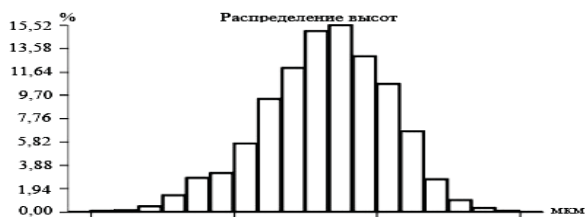
зернами, копирующими свой профиль на поверхность. График опорной кривой показывает хорошую несущую способность данной поверхности (рис. 9 б).

Поскольку шлифовальный круг вращается с большой скоростью, индивидуальные контактные взаимодействия накладываются друг на друга и совмещаются, включая резание, адгезионный и абразивный износ, пластическую деформацию и трещинообразование, одновременно происходящие на всей обрабатываемой поверхности. Следствием такого комплексного взаимодействия является близкая к гауссовской структура поверхности с редкими впадинами, оставляемыми единичными

несточенными абразивными зернами.

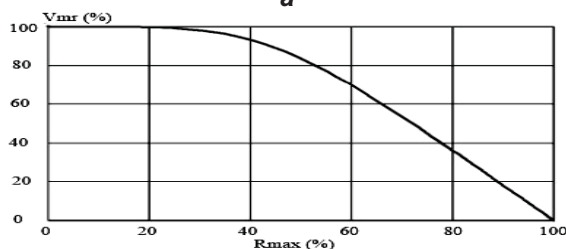
Высота большинства неровностей у шлифованной поверхности малая, но остаются одиночные впадины, таким образом, шероховатый профиль вырождается [8].

В процессе магнитно-абразивной обработки поверхности (рис. 7б) формируется частицами ферроабразивного порошка, приблизительно равного размера, контактирующими с ней в различных местах и под произвольными углами. С высокой достоверностью можно считать, что кинетическая энергия единичных взаимодействий одинакова. Количество единичных взаимодействий, приходящихся на местный участок поверхности, определяет глубину образуя-



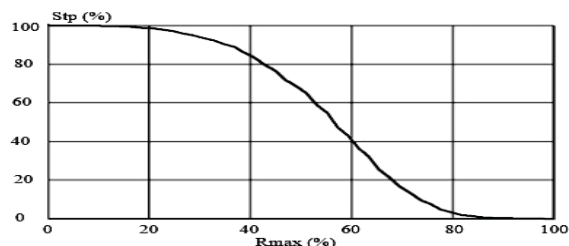
Размер: 100x100

а



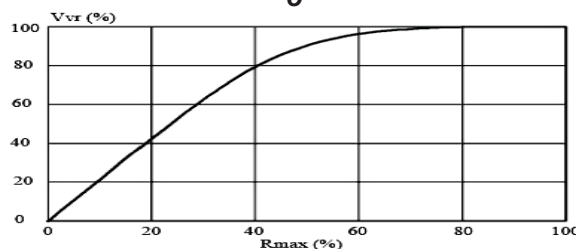
Размер: 100x100

б



Размер: 100x100

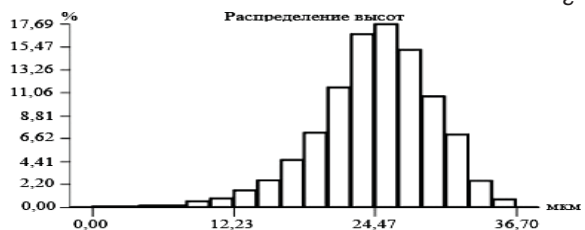
в



Размер: 100x100

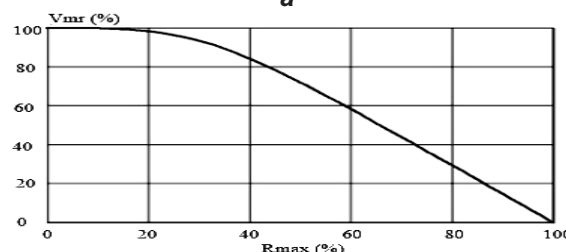
г

Рисунок 9. Топографические характеристики поверхности после шлифования:  
а – гистограмма распределения высот; б – опорная кривая поверхности; в – материальный объем;  
г – маслосъемность



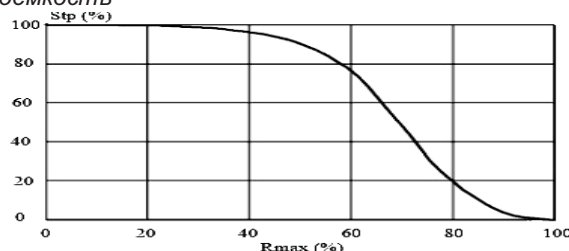
Размер: 81x82

а



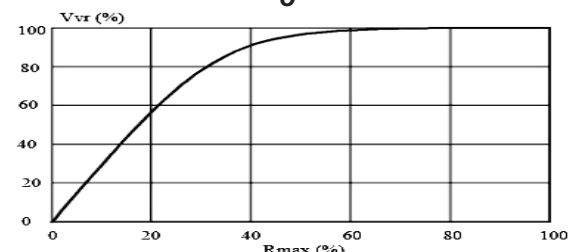
Размер: 81x82

б



Размер: 81x82

в



Размер: 81x82

г

Рисунок 10. Топографические характеристики поверхности после магнитно-абразивной обработки:  
а – гистограмма распределения высот; б – опорная кривая поверхности; в – материальный объем;  
г – маслосъемность

щейся на нем впадины. В результате, структура поверхности после МАО имеет случайный характер не только по площади, но и по амплитуде.

Гистограмма распределения высот (рис. 10 а) показывает гауссовскую природу поверхности. Опорная кривая поверхности (рис. 10 б) имеет плавный переход от зоны незначительного контакта в зону развитого контакта, что является полезным ее свойством с точки зрения трибологии [8].

Произвольные координаты и размер данных микровпадин свидетельствует о случайной структуре поверхности по всей ее высоте. Как следствие, значения параметров шероховатости, рассчитанных вдоль и поперек направления обработки, оказываются приблизительно равными.

После МАО на поверхности остаются единичные микровпадины. Данные микровпадины имеют случайные координаты по горизонтали и размеры, однако их форма приблизительно одинакова. Это показывает одновременно множественный характер взаимодействий и случайное их распределение.

Данный вид обработки обладает определенным трибологическим потенциалом и наиболее перспективен в качестве метода финишной обработки.

На рис. 11 представлены профилограммы поверхностного слоя после шлифования и МАО.

Уменьшение шероховатости поверхности существенно улучшает антикоррозионную стойкость деталей и позволяет повысить срок эксплуатации. Это особенно важно в данном случае, так как для поверхности закаточного ролика не могут быть использованы защитные покрытия для обеспечения наилучшей коррозионной стойкости.

#### Заключение

Образец после магнитно-абразивной обработки, выдержавший 336 часов испытаний в 10 %-м растворе NaCl, имеет площадь, занятую продуктами коррозии 12 % (коррозия была выявлена лишь на рабочем участке закаточного ролика), в отличие от остальных образцов – после токарной обработки, после термообработки и после шлифования, процент покрытия продуктами коррозии которых составил 32, 18, 15 %, соответственно.

Анализ приведенных результатов эксперимента показывает, что выбор технологической схемы обработки позволяет управлять коррозионной стойкостью поверхности детали.

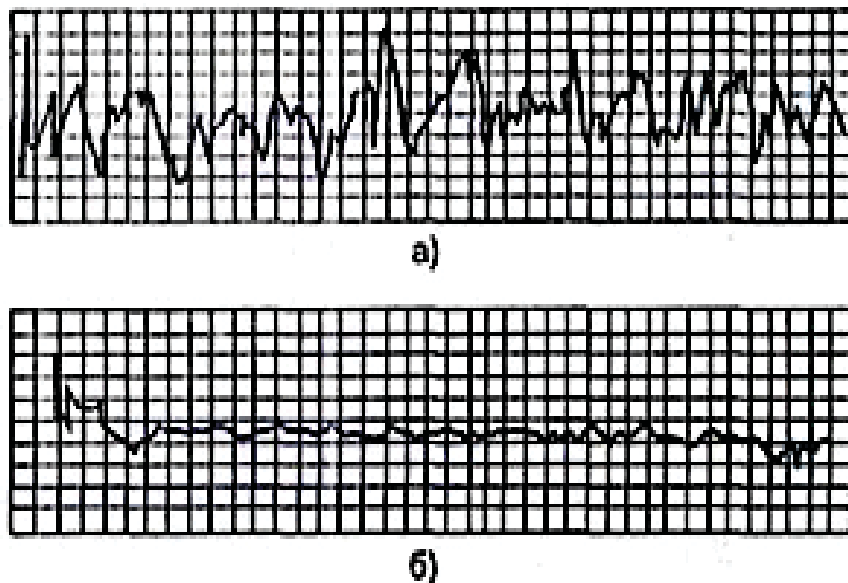


Рисунок 11. Профилограммы поверхностного слоя закаточного ролика:  
а – после шлифования; б – после магнитно-абразивной обработки

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайловский, Ю. Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты / Ю. Н. Михайловский – М.: Металлургия, 1989. – 102 с.
2. Герасименко, А. А. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справочник в 2 т. / А. А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 1. – 688 с.
3. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости: ГОСТ 9.908-85. – Введ. 01.01.1987. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 17 с.
4. Коррозия металлов. Термины: ГОСТ 5272-68. – Введ. 01.01.1969. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 23 с.
5. Кофанова, Н. К. Коррозия и защита металлов / Н. К. Кофанова. – Алчевск: Донбасс. гор.-металлург. институт, 2003. – 181 с.
6. Княжева, В. М. Новые достижения в области теории и практики противокоррозионной защиты материалов / В. М. Княжева. – М., 1981. – С. 49-71.
7. Плудек, В. Защита от коррозии на стадии проектирования / В. Плудек – М.: Мир. – 1980. – 440 с.
8. Порошин, В. В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография / В. В. Порошин – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 04.01.2017