

**С.В. Ковалевский, д.т.н., проф.**

**В.И. Тулунов, к.т.н., асист.**

**И.Н. Стародубцев, аспирант.**

*Донбасская государственная машиностроительная академия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ УПОРЯДОЧЕННОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*В статье представлены обоснования механизмов формирования упорядоченных структур поверхностных слоев деталей машин при упрочняющей обработке, направленных на улучшение их эксплуатационных свойств. Исследованы и обоснованы преимущества применения различных технологических сред для обработки деталей, с целью создания фрактальных и упорядоченных структур поверхностных слоев деталей машин. Изложенные в статье подходы позволяют получать регулярные, фрактальные, упорядоченные структуры как поверхности материалов, так и специальных покрытий, которые обладают более высокими эксплуатационными характеристиками при сокращении энергетических затрат.*

**Введение.** Актуальной задачей решения проблемы повышения эксплуатационных показателей деталей машин, является интегрированное формирование на основе придания специальных свойств их рабочих поверхностей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Наиболее эффективными, наряду с традиционно применяемыми технологиями являются технологии, направленные на упрочнение материалов в сочетании с уменьшением затрат энергии расходуемой на их формирование. Анализ методов обеспечения заданных свойств деталей позволяет выявить некоторые особенности тенденций этой области: для обеспечения определенных требований работы деталей (долговечность, износостойкость и т. д.) предъявляются достаточно жесткие требования к точности, качеству и физико-механическим свойствам деталей машин. Этим требованиям можно достигнуть на основе создания специальных сплавов и сталей, обладающих высокими эксплуатационными показателями. Однако во многих случаях становится нерациональным использование дорогостоящих материалов. Упрочнение путем цементации, азотирования, термической обработки является эффективным, но достаточно энергоемким, требующим финишной обработки. Современные и прогрессивные методы упрочнения и придания специальных свойств деталей машин основанном на создании

регулярных структур на поверхности деталей, а также покрытий, обладающих повышенными физико-механическими свойствами по отношению к основному материалу детали, в том числе, на наноуровне, свойства которого значительно отличаются от свойств материала полученного традиционными методами упрочнения, не требующие финишной механической обработки, а также не влекут за собой изменение размерных характеристик детали.

**Целью** данной статьи является систематизация и определение новых путей формирования упорядоченных структур поверхностных слоев деталей машин при упрочняющей обработке.

**Основная часть.** Известно, что каждому виду эксплуатационных свойств изделий отвечает определенное поле рассеивания комплекса показателей качества, поэтому обеспечение отдельных показателей качества не гарантирует требуемые эксплуатационные свойства изделия. Формирование свойств изделия можно представить как процесс взаимодействия предмета производства с технологической и окружающей средой, которые являются носителями механизма наследования и трансформации свойств изделий во время их изготовления. Для каждой детали может быть создана оптимальная технологическая среда, в которой должны формироваться оптимальные эксплуатационные свойства [1].

Интегрированные технологии повышения качества эксплуатационных свойств в настоящее время получают все большее распространения и применения [4, 6, 7].

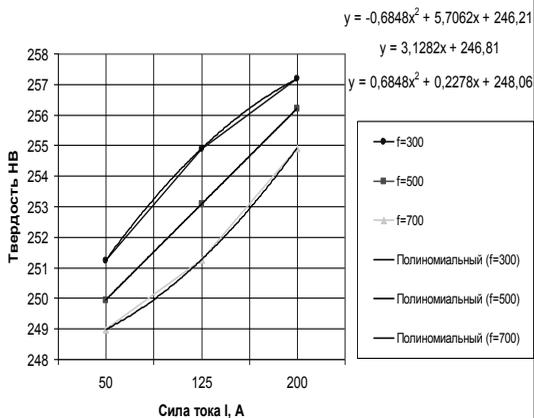
В «Научно-исследовательской лаборатории специальных методов обработки деталей машин тяжелого машиностроения» кафедры Технологии и управления производством, Донбасской государственной машиностроительной академии ведутся разработки по усовершенствованию интегрированных методов упрочнения и создания специальных покрытий на поверхностях деталей машин. Основные результаты ее деятельности можно сформулировать следующим образом.

1. Перспективным являются интегрированные технологические процессы, основой которых является обработка детали в управляемой, изменяющейся упорядоченной среде. К таким разработкам можно отнести *импульсную технологию в резонансном режиме*, способную многократно повысить производительность труда, эффективность использования ресурсов и снизить материалоемкость производства [2–4]. Сущностью этих методов является обработка поверхностей концентрированными потоками энергии в резонансном режиме, которые обеспечивают повышенную интенсивность технологического воздействия на материал, основанных на использовании мощных источников энергии [5, 6].

2. Широкими возможностями обладают технологические методы обработки с образованием микрорельефов с высокооднородными по форме и размерам, регулярно расположенными микронеровностями, а также целенаправленным обеспечением структурных и фазовых изменений, напряженного состояния и свойств металла поверхностных слоев деталей. В частности, к таким относится электромеханическое чистовое точение с использованием импульсных токов на среднеуглеродистой стали твердости поверхности в интервале 248–260 НВ, шероховатости в интервале Ra 3,2–2,5 мкм (рис. 1). Связь технологических режимов с показателями качества обработанной поверхности иллюстрируют графики, зависимости НВ и Ra от силы тока и его частоты при различных скважностях импульсного тока.

3. Достаточно эффективным методом формирования рабочих поверхностей деталей является комбинированная абразивная обработка, основанная на использовании свободного абразива. Одним из таких перспективных способов обеспечения высокого качества рабочей поверхности является технология электро-магнитно-абразивной обработки (ЭМАО). Этот метод прост в осуществлении, обеспечивает высокое качество обработанных поверхностей деталей [7, 8]. Электро-магнитно-абразивная обработка, осуществляемая при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле, созданного непосредственно в зоне резания, позволяет удалить припуск с применением порошковой ферромагнитной абразивной массы. Электро-магнитно-абразивным способом можно успешно обрабатывать поверхности: цилиндрические наружные и внутренние, плоские, тела вращения с криволинейной образующей, винтовые и др. (рис. 2). Этим методом достигается твердость поверхности в интервале 231–297 НВ, шероховатость в интервале Ra 1,42–0,69 мкм. Упрочнение поверхности возрастает в 1,07–1,38 раз. Шероховатость на стали снижается в 2,3–4,6 раза.

**Зависимость твердости от силы тока**



**Зависимость шероховатости от частоты импульсного тока**

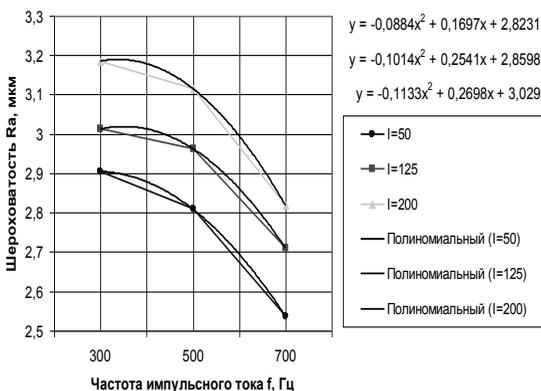


Рис. 1. Зависимость твердости от силы тока и зависимость шероховатости от частоты импульсного тока соответственно



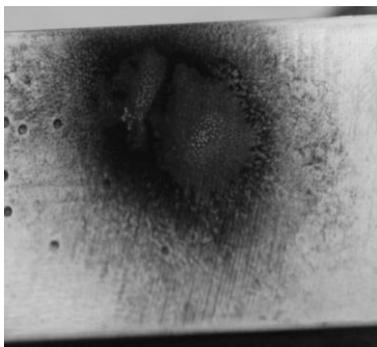
*Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения электро-магнитно-абразивной обработки: 1 – заготовка; 2 – патрон ГОСТ 2675–80; 3 – барабан с магнитом Ф75 мм; 4 – двигатель постоянного тока (ДПТ); 5 – токосъемник; 6 – держатель; 7 – резцедержатель; 8 – тара с абразивом и Al порошком*

4. Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) с эффектом резонанса, учитывая параметры объекта, его свойства, характеристики, позволяет получать упорядочивание структуры поверхности обрабатываемой детали, а также обеспечение требуемых показателей качества (шероховатости) непосредственно в процессе резания [9–11]. В частности, используя жидкую плотную среду, например масло, рабочая среда выполняет силовую функцию, воздействуя на помещенную в нее обрабатываемую деталь в условиях резонанса при этом на поверхности заготовки, происходит наклеп, который устраняет микротрещины, выравнивает физико-механические свойства, структурные неоднородности, устраняет повышенные напряжения. Можно отметить, что используя сочетания слабых и сильных воздействий среды, которые позволяют изменять свойства и параметры объекта обработки, можно получать различные эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин, тем самым минимизируя энергетические затраты [12]. В связи с рассмотрением таких эффектов, вводя деталь в электромагнитное поле и воздействуя им на деталь в зависимости от частоты тока, наблюдаются так называемый скин-эффект, при этом реакция поведения детали способствует формированию фрактальных структур. Проявление упорядоченных и фрактальных структур напрямую зависит от размеров детали, материала, из которого она изготовлена, его состояния и параметров воздействия. Так называемый «ковёр Серпинского» наглядный пример образования фракталов, упорядоченных структур и реновации среды, этот эффект образуется под воздействием некой среды, звуковых колебаний, электромагнитных колебаний и др. Получая такую упорядоченную структуру поверхность металла имеет отличительные эксплуатационные свойства от неупорядоченной структуры.

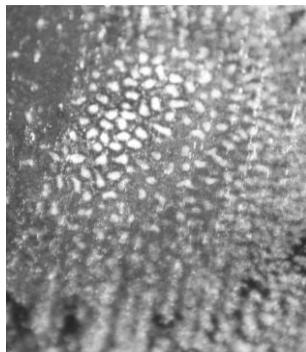
Использование скин-эффекта и ввода дополнительной энергии позволяет получить определенные свойства углеродных связей на поверхности детали, в так называемой толщине скин-слоя, которая измеряется в микронах. Помимо того структура имеет упорядоченный вид – фрактальный. Совмещение и учет всех параметров и свойств сред и объекта позволяет на поверхности детали получать

нанопокрyтия в виде графена или углеродных нанотрубок. Так как соотношение толщины скин-эффекта (среды), в которой формируется графен [14, 15] и толщины получаемого слоя (нанометры) достаточно велики, возникает возможность и целесообразность получать многослойные покpытия. Перспективы использования графена в технике существенно зависят от разработки способов его простого и дешевого изготовления. За последние годы в этом направлении была проделана очень большая работа [16, 17]. Метод микромеханического расщепления, разработанный группой А.К. Гейма, является довольно трудоемким и позволяет получить только очень небольшие (порядка микрона) чешуйки графена. Более перспективными для промышленных приложений являются эпитаксиальное изготовление графена на поверхности карбида кремния, позволяющее получать большие образцы графена с контролируемым числом атомных слоев. Также очень перспективен метод газофазного осаждения графена на поверхность металла [18–20], позволяющий получить образцы графена размерами до десятков сантиметров. Для изготовления композитных материалов, включающих графен, были разработаны методы расщепления графена ультразвуком. Таким образом, имеются все основания полагать, что графен так или иначе будет использоваться не только в промышленно производящихся электронных устройствах, но и машиностроении уже в самые ближайшие годы.

Как известно, что графен, фуллерены и нанотрубки обладая высокими прочностными характеристиками, имеет достаточно большую гибкость, тепло- и электропроводность, а покpытия из таких материалов позволяют повысить эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей.



а)



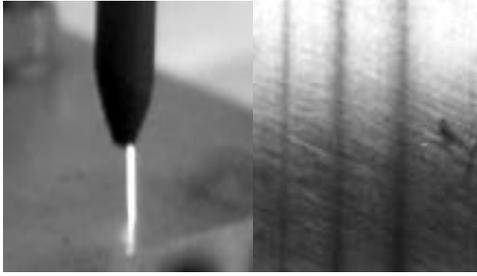
б)

*Рис. 3. Фрактальная структура нанесенного графита на поверхность образца: а – исходный образец; б – область фракталов*

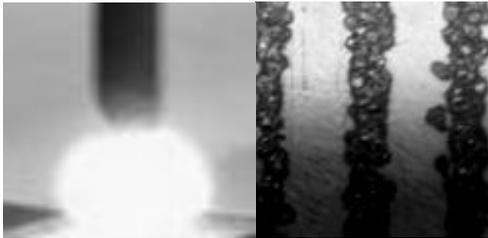
Среда, в которую помещается деталь в процессе обработки может быть локальная, это хорошо видно из метода упрочнения и нанесение мелкодисперсных регулярных структур – электронно-ионная имплантация в открытом воздухе, наряду с аналогичными видами обработки, которые производятся либо в вакууме или инертном газе. Как показали наши экспериментальные исследования совсем не обязательно весь объект сразу изолировать от процесса окисления, достаточно создать определенные условия в месте непосредственного воздействия. Упрочнение поверхности детали посредством нанесения СВЧ реагентов, термитных смесей на деталь, которое осуществляется с одновременным помещением в высокочастотное поле, приводит к упорядочиванию структуры поверхности детали после такой обработки, по сравнению с методом без использования высокочастотного поля. Так же эффект наблюдается в работе [13], где деталь помещалась в реактор и реакция происходила в среде аргона.

5. Электронно-ионная имплантация заключается в обработке деталей в среде коронного разряда с ускоряющим потенциалом между электродом-имплантатом и поверхностью детали. Это обеспечивает перенос ионов в потоке электрического тока высокой плотности, где в качестве проводника служит шнур коронного разряда напряжением до 25 кВ. Данному шнуру характерны свойства сложного проводника с высоким разрядением внутренней части шнура при условии согласования полярности тока, который и переносит формирующий имплантируемый поток ионов материала электрода (рис. 4).

Преимуществом такого метода является возможность использования оборудования, применяемого для выполнения предварительной механической обработки детали. При этом исключается использование сложного и дорогостоящего вакуумного оборудования, упрощается процесс обработки, что определяет низкие затраты на изготовление деталей машин заданного качества [21].



а)



б)

*Рис. 4. Обработанный насыщением образец:  
а – без дугового разряда, б – при дуговом разряде*

Обеспечение заданных эксплуатационных характеристик, при изготовлении деталей машин, возможно за счет различных технологических воздействий и в первую очередь более полного использования эффекта при сочетании силовых и слабых воздействий, применения технологической среды способствующей самоорганизации процессов.

**Вывод.** Использование новых интегрированных технологий позволяют получать заданные эксплуатационные характеристики, только лишь в том случае, когда учитывается технологическая наследственность на протяжении всего процесса изготовления машины, а также качество самого объекта, свойства материала и параметров используемых технологических сред. Сочетание нескольких видов воздействий, одно из которых является реновационной средой, а остальные силовыми механизмами, позволяет получать улучшенные эксплуатационные свойства. В отличии от традиционных методов достижения требуемых показателей качества, изложенный подход позволяет получать регулярные, фрактальные, упорядоченные структуры как поверхности металлов,

так и специальных покрытий, которые обладают более высокими эксплуатационными характеристиками с меньшими энергетическими затратами.

### Список использованной литературы:

1. Григорьева Н.С. Повышение качества изделий при технологической наследственности и самоорганизации процессов / Н.С. Григорьева, В.В. Божидарник, В.А. Шабайкович // Наукові нотатки. Електронне наукове видання – журнал. – Луцк, 2007. – С.115–119.
2. Тулунов В.И. Повышение эффективности использования электрической энергии для поверхностного упрочнения детали при чистовом точении / В.И. Тулунов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матер. шостої Міжнар. наук.-тех. конф. 2–5 черв. 2008 р. / за заг. ред. В.Д. Ковальова.– Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 131.
3. Тулунов В.И. Повышение глубины упрочнения при электромеханическом чистовом точении / В.И. Тулунов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр. – Вип. 23. – Краматорськ ; К., 2008. – С. 277–281.
4. Ковалевский С.В. Комбинированная механическая обработка деталей типа тел вращения с использованием электропластического эффекта / С.В. Ковалевский, В.И. Тулунов // Нейросетевые технологии и их применение : сб. трудов междунар. науч. конф. “Нейросетевые технологии и их применение – 2004”. – Краматорск : ДГМА, 2004. – С. 130–136.
5. Ковалевский С.В. Поверхностная обработка импульсным магнитным полем деталей машин / С.В. Ковалевский, В.И. Тулунов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр. – Вип. 19. – Краматорськ ; К., 2006. – С. 181–185.
6. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина и др. – Новосибирск : Наука, 2003. – 318 с.

7. *Новостройная О.С.* Исследование режимов электромагнитно-абразивной обработки / *О.С. Новостройная* // Студенческий вестник ДГМА. – 2010. – С. 89–93.
8. *Новостройная О.С.* Исследование влияния наполнителей при электромагнитно-абразивной обработке / *О.С. Новостройная* // Молодая наука XXI века : сб. тр. – Краматорск: ДГМА, 2010. – С. 113–116.
9. *Стародубцев И.Н.* Комбинированный технологический процесс механообработки деталей машин при помощи вибрационной обработки и поверхностно-активных веществ / *И.Н. Стародубцев* // Студенческий вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск, 2010. – С. 34–38.
10. *Стародубцев И.Н.* Исследование процесса механообработки с применением резонансных частот и ПАВ / *И.Н. Стародубцев* // Молодая наука 21 века : сб. науч. тр. – Краматорск, 2011. – С. 84–90.
11. *Кумабэ Д.* Вибрационное резание / *Д.Кумабэ* ; пер. с яп. *С.Л. Масленникова* ; ред. *Портнова И.И., Белова В.В.* – М. : Машиностроение, 1985. – 423 с.
12. *Ковалевський С.В.* Аналіз стану проблеми реновації деталей автомобілів технологічними методами / *С.В. Ковалевський, А.В. Лукічов, С.А. Матвієнко* // Вісник ЖДТУ. – № 3 (62). – 2012. – С. 74–78.
13. *Ковалевский С.В.* Метод повышения качества рабочих поверхностей деталей машин с использованием реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / *С.В. Ковалевский, И.Н. Стародубцев* // Вестник донбасской гос. машиностроительной академии. – № 2(27). – 2012. – С. 38–42.
14. *Козырева Л.В.* Ресурсосберегающие нанотехнологии на предприятиях технического сервиса: монография / *Л.В. Козырева.* – Тверь : ТГТУ, 2010. – 188 с.
15. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства / *А.В. Елецкий* // Успехи физ. наук. – 2002. – Т. 172. – № 4. – С. 401–438.
16. *Geim A.K.* Graphene: status and prospects, *Science* 324, 1530 (2009).
17. *Mikhailov S.* Physics and applications of graphene - theory, InTech, Rijeka (2011).

18. *Obraztsov A.N., Obraztsova E.A., Tyurnina A.V., Zolotukhin A.A.* Chemical vapor deposition of thin graphite films of nanometer thickness, *Carbon* 45, 2017 (2007).
19. *Reina A., Jia X.T., Ho J., Nezich D. and ol.* Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition, *Nano Lett.* 9, 30 (2009).
20. *K.S. Kim, Y. Zhao, H. Jang and ol.* Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, *Nature* 457, 706 (2009).
21. А.с. 64959 Україна, МПК С23С 14/40. Спосіб зміцнення поверхонь деталей машин методом іонної імплантації в повітряному середовищі / *С.В. Сокур.* – 2011.

КОВАЛЕВСКИЙ С.В. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Технологии и управления производством Донбасской государственной машиностроительной академии.

Научные интересы:

- механическая обработка поверхностей в машиностроении;
- нанотехнологии.

ТУЛУПОВ В.И. – кандидат технических наук, ассистент кафедры Технологии и управления производством Донбасской государственной машиностроительной академии.

Научные интересы:

- нанотехнологии.

СТАРОДУБЦЕВ И.Н. – аспирант кафедры Технологии и управления производством Донбасской государственной машиностроительной академии.

Научные интересы:

- нанотехнологии.

Статья поступила в редакцию 11.04.2012

## АННОТАЦИИ

**Ковалевский С.В. Тулунов В.И., Стародубцев И.Н.**  
**Исследование механизмов формирования упорядоченных структур поверхностей деталей машин.**

**Ковалевський С.В. Тулунов В.І., Стародубцев І.М.**  
**Дослідження механізмів формування впорядкованості робочих поверхонь деталей машин.**

У статті представлені обґрунтування механізмів формування впорядкованих структур поверхневих шарів деталей машин при зміцнювальній обробці, спрямованих на поліпшення їх експлуатаційних властивостей. Досліджено та обґрунтовано переваги застосування різних технологічних середовищ для обробки деталей, з метою створення фрактальних і впорядкованих структур поверхневих шарів деталей машин. Викладені у статті підходи дозволяють отримувати регулярні, фрактальні, впорядковані структури, як поверхні матеріалів, так і спеціальних покриттів, які володіють більш високими експлуатаційними характеристиками при скороченні енергетичних витрат.

**S. Kovalevsky, V. Tulupov, I. Starodubtsev. Investigation of the mechanisms of formation of ordered work surfaces of machine parts.**

The paper presents the study of mechanisms of formation of ordered structures of the surface layers of machine parts in strengthening treatment to improve their performance characteristics. Investigated and substantiated benefits of various technological mediums for machining parts, to create fractal and ordered structures of the surface layers of machine parts. Set out in Article approaches can get regular, fractal, ordered structures, the surfaces of materials and special coatings that have higher performance while reducing energy costs.

Ключевые слова: интегрированные технологии, эксплуатационные свойства, СВС, резонанс, упрочнение, фракталы, графен.

Ключові слова: інтегровані технології, експлуатаційні властивості, СВС, резонанс, зміцнення, фрактали, графен.

Keywords: integrated technology, operational properties, CBC, resonance, hardening, fractals, graphene.