

УДК 669.056.9:621.118.6+621.81.01  
DOI: 10.12737/article\_59f074a618ac30.67474984

**В.И. Бутенко**, д.т.н.,  
**Д.С. Дуров**, к.т.н.,  
**Р.Г. Шаповалов**, к.т.н.  
(Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета Россия,  
347928, Таганрог, Ростовская область, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44)  
E-mail: mkk@egf.tsure.ru

## **Особенности формирования и поведения функциональных полислоев на поверхностях деталей трибосистем**

*Приведены результаты модельных и металлографических исследований механизмов возможных перемещений компонентов внутри функциональных полислоев на поверхностях деталей трибосистем и образования в них сегрегаций, позволившие выявить степень влияния сегрегируемых элементов на особенности структурирования материала функциональных полислоев в технологических процессах их формирования и поведения при трении, а также определить направления возможного управляемого воздействия на их состояние с целью повышения износостойкости поверхностей деталей трибосистем и уменьшения коэффициента трения между их контактируемыми поверхностями в условиях высоких нагрузок, скоростей и агрессивных сред.*

**Ключевые слова:** структура; деталь; сегрегация; износостойкость; поверхность; компоненты; кластер.

**V.I. Butenko**, D. Eng.,  
**D.S. Durov**, Can. Eng.,  
**R.G. Shapovalov**, Can. Eng.  
(Institute of Radio-Engineering Systems and Control of Southern Federal University  
44, Nekrasovsky Alleyway, GSP-17A, Rostov region, Taganrog, 347928, Russia)

## **Peculiarities of formation and behavior of functional poly-layers on surfaces of tribosystem parts**

*There are shown results of model and metallographic researches of mechanisms of component possible displacements within functional poly-layers on parts surfaces of tribosystems and the segregation formation in them allowing the reveal of the impact degree of segregated elements upon structuring peculiarities of functional poly-layers material in engineering processes of their formation and a conduct at friction, and also the definition of a direction of a possible controlled impact upon their state with the purpose of the wear-resistance increase in surfaces of tribosystem parts and the friction constant decrease between their contacting surfaces under conditions of high loads, velocities and hostile environments.*

**Keywords:** structure; part; segregation; wear-resistance; surface; components; cluster.

Важнейшей проблемой современного машиностроительного производства является повышение работоспособности деталей машин, эксплуатируемых в агрессивных средах при высоких скоростях и нагрузках [1, 2]. Решение этой проблемы во многих случаях может быть достигнуто созданием на поверхностях деталей машин функциональных полислоев (ФПС) [3].

На рис. 1 дана обобщенная схема поверхности детали с ФПС, включающими нивелирующий слой 3, промежуточный слой 2 и функциональный слой наноразмерной толщины 1. Нанесение на предварительно обработанную поверхность заготовки детали нивелирующего слоя 3 необходимо для уменьшения шероховатости поверхности и создания основы для нанесения промежуточного 2 или

функционального 4 слоев. Нанесение промежуточного слоя 2 целесообразно осуществлять в тех случаях, когда детали эксплуатируются в условиях одновременного действия нескольких различных факторов, например, износа, знакопеременных нагрузок и ударного воздействия [3].

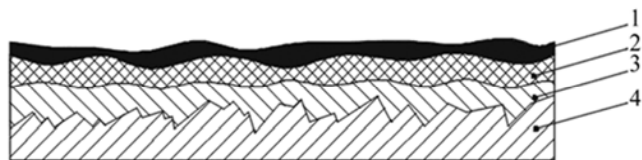


Рис. 1. Схема ФПС на поверхности детали:

1 – функциональный слой; 2 – промежуточный слой;  
3 – нивелирующий слой; 4 – основной материал

В настоящее время разработаны и доведены до промышленного использования технологии создания на поверхностях деталей машин эффективных ФПС, описание которых приведено в работах [1 – 3]. При этом составы ФПС различной толщины в зависимости от их назначения по условиям и режимам эксплуатации могут наноситься на поверхности деталей трибосистем в следующем порядке:

*Состав 1* – электрохимико-механическая обработка с введением в рабочую зону гранул минералокерамики на основе  $Al_2O_3$  [1 – 3] + комбинированная отделочно-упрочняющая обработка с созданием металлополимерного слоя на основе полиэтилена + безабразивная комбинированная прецизионная обработка с созданием медного слоя [1, 2, 4];

*Состав 2* – отделочно-упрочняющая обработка с подачей в зону контакта сплава Вуда + комбинированная отделочно-упрочняющая обработка с созданием металлополимерного слоя на основе полиэтилена с добавлением графита и кристаллического йода;

*Состав 3* – комбинированная отделочно-упрочняющая обработка с формированием железоуглеродистой фазы [1, 3] + безабразивная комбинированная прецизионная обработка с созданием медного слоя наноразмерной толщины [3, 4].

Предварительно выполненные исследования рентгено-электронной и оже-электронной спектроскопии различных составов ФПС позволили определить структуру и свойства формирующейся на поверхности детали металлополимерной трибосистемы как сложной функционально связанной системы и дали основание для формулирования гипотезы о том, что при эксплуатации таких трибосистем

внутри ФПС происходят сегрегационные процессы, приводящие к возникновению новой структуры, приспособленной к конкретным условиям эксплуатации деталей [5].

Как показано в работе [5], к важнейшим процессам формирования и последующего поведения ФПС на поверхностях деталей трибосистем относятся различные структурно-фазовые превращения, определяемые принятыми способами и технологическими режимами их создания. К числу наиболее заметных структурных и фазовых изменений в материалах поверхностного слоя деталей с ФПС относятся: увеличение параметра кристаллической решетки, образование аморфных и нанокристаллических фаз, диспергирование микро-структуры, накопление дефектов, возможное расслоение ФПС по составляющим, массоперенос в приповерхностном слое и объеме в целом, образование новых слоистых структур, формирование дислокационно-дисклинационных субструктур, образование новых структурно-фазовых состояний и т.д. При этом в формируемом и постоянно изменяющемся ФПС возможно также изменение дефектной подсистемы, при которой создается структура точечных дефектов и появляются дислокационные структуры с высокой плотностью дислокаций [5, 6].

В связи с этим по аналогии с исследованиями, представленными в работах [5, 7], были выполнены модельные исследования механизмов возможных перемещений компонентов внутри ФПС и образования сегрегаций, выявления степени влияния сегрегируемых элементов на структурирование материала ФПС и определения возможности управляемого воздействия на его состояние при формировании и последующей эксплуатации с целью повышения износоустойчивости поверхностей деталей трибосистем.

Для выявления общих тенденций механизма структурирования материала ФПС в процессе эксплуатации трибосистемы исследования проводились на ФПС, полученном в результате последовательного выполнения следующих технологических операций:

- комбинированная отделочно-упрочняющая обработка с созданием на поверхности детали металлополимерного слоя по технологии, описанной в работах [2, 3];

- введение на последнем проходе упрочняющего инструмента в контактную зону смеси графита с кристаллическим йодом в пропорции 2:1 для создания промежуточного слоя;

– безабразивная комбинированная прецизионная обработка поверхности детали с созданием на ней медного слоя наноразмерной толщины по технологии, описанной в работах [2 – 4].

На рис. 2 приведена модельная система исходного состояния ФПС, из анализа которой следует, что все компоненты слоя занимают строго определенное положение в соответствии с последовательностью их нанесения. В начальный период приработки контактирующих поверхностей деталей трибосистем происходит перестройка ФПС, при которой входящие в него компоненты располагаются по направлению скольжения.

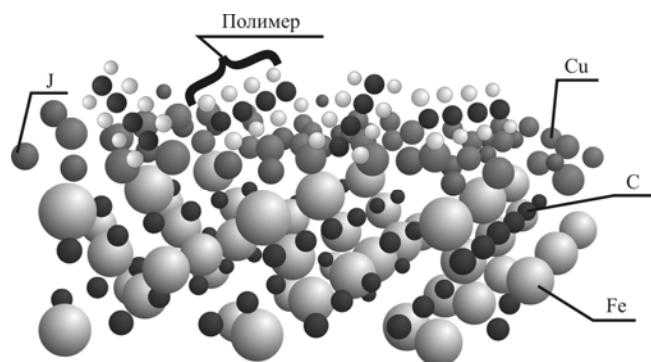


Рис. 2. Модельная система исходного состояния ФПС

В дальнейшем этот процесс усиливается, а углерод сегрегирует в верхнюю часть ФПС (рис. 3).

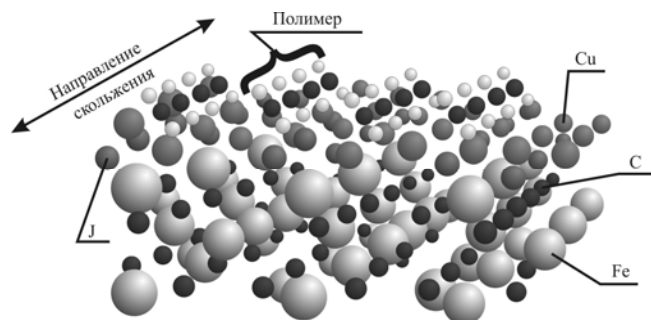


Рис. 3. Сформированная в процессе приработки модельная система структурированного состояния ФПС

При этом молекулы полимера под действием температурно-динамического фактора начинают разрушаться, выделяя водород и пополняя материал ФПС углеродом, который также сегрегирует в верхнюю часть ФПС. В результате в ФПС создаются благоприятные условия для возникновения в них сегрегационных кластеров, модель которых приведена

на рис. 4.

Выделение водорода, согласно исследованиям, приведенным в работах [5, 7, 8], может вызвать наводороживание материала сопряженных поверхностей деталей трибосистем, которое включает в себя адсорбцию молекул водорода на поверхности металла, его диссоциацию, разложение на атомы и ионы, а также диффузию водорода внутрь основного материала поверхностного слоя контактируемой детали трибосистемы. Попадая в области максимальной локальной температуры, выделившийся водород концентрируется в них, создавая огромные внутренние давления, приводящие к зарождению и развитию микротрещин с последующим разрушением материала поверхностного слоя детали [7, 8].

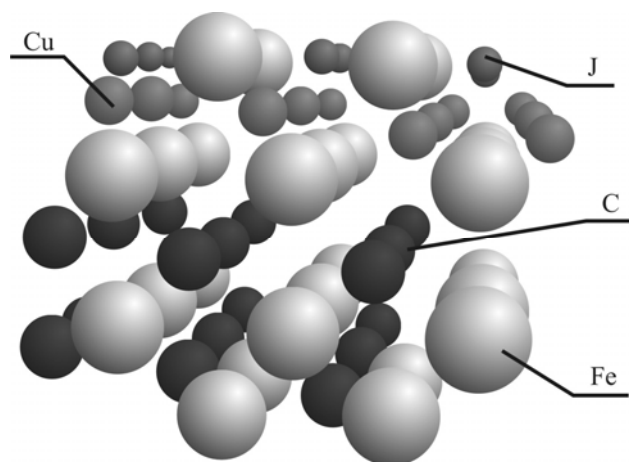


Рис. 4. Сегрегационный кластер после разрушения полимера

При дальнейшей эксплуатации деталей трибосистемы, вероятно, происходит распад нижележащего сегрегационного кластера, состоящего из железа, углерода и меди, на более мелкие сегрегационные кластеры с ограниченным количеством атомов углерода и меди (рис. 5).

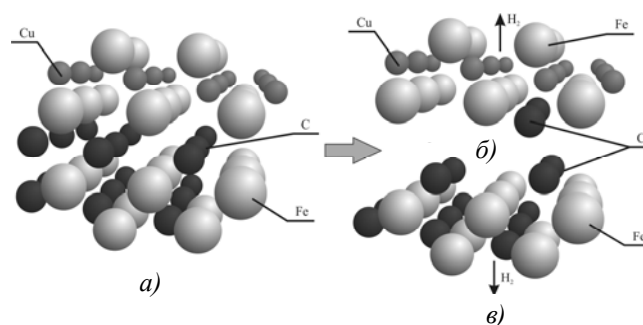


Рис. 5. Вероятностная схема распада сегрегационного кластера с выделением водорода: а – начальное состояние сегрегационного кластера ФПС; б, в – мелкие сегрегационные кластеры с ограниченным количеством углерода и меди

Допустимость и обоснованность такого модельного представления ФПС на поверхностях деталей трибосистем косвенно подтверждается металлографическими исследованиями поверхностного слоя, выполненными в разные периоды эксплуатации пары трения «сталь 30ХГСА – сталь 30ХГСА» с нанесенными на сопряженные поверхности деталей ФПС вышеописанного состава.

На рис. 6 приведены фотографии характерного состояния поверхности детали после нанесения на нее ФПС рассматриваемого состава (рис. 6, а) и через 10 мин эксплуатации (рис. 6, б), соответствующего периоду приработки. Анализ представленных фотографий свидетельствует о том, что в процессе приработки контактирующих поверхностей произошло структурирование материала ФПС, совпадающее с модельной структурой состояния, представленной на рис. 3.

При этом происходит нивелирование поверхности [9], а в момент распада сегрегационных кластеров ФПС (см. рис. 5) резко меняется характер шероховатости поверхности де-

тали (рис. 7) и на ней образуются ступеньки из выделившихся сегрегационных кластеров, что подтверждается фотографиями поверхности, выполненными с помощью микроскопа НЕОФОТ-21 при различных увеличениях (рис. 8). Вследствие этого на поверхности образуются многочисленные глубокие микротрещины (см. рис. 7).

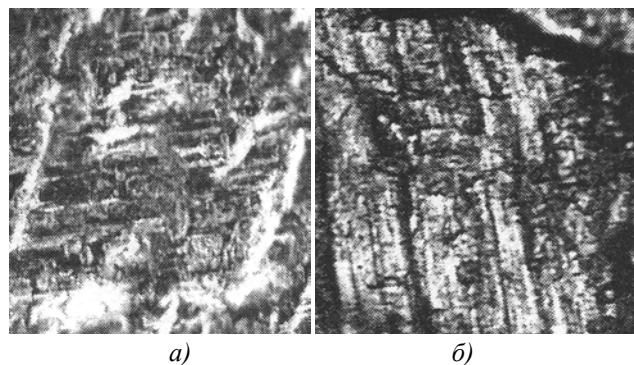


Рис. 6. Фотографии ( $\times 100$ ) поверхностей деталей трибосистем в начальном состоянии (а) и после приработки в течение 10 мин (б) при скорости скольжения  $v_{ск} = 0,5$  м/с и давлении  $p = 1,2$  МПа

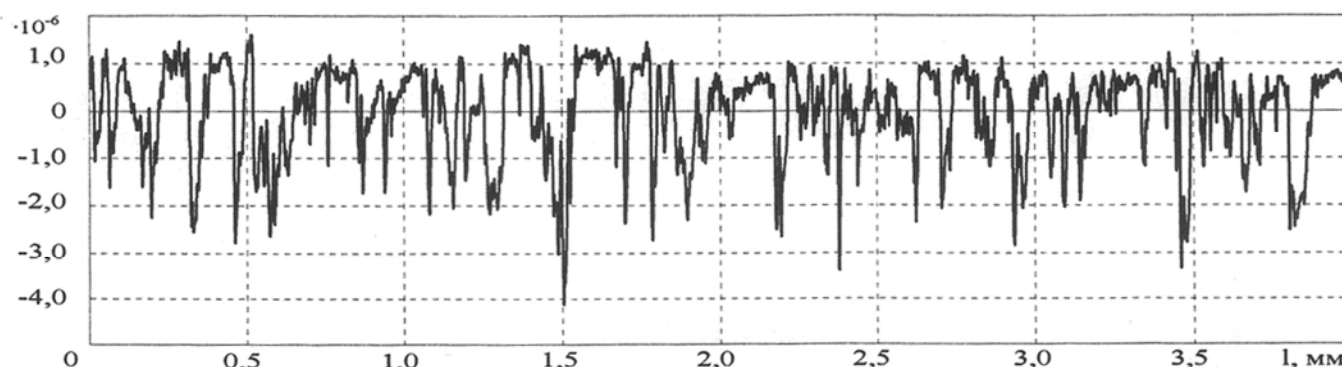


Рис. 7. Профилограмма поверхности детали с ФПС в момент распада сегрегационных кластеров

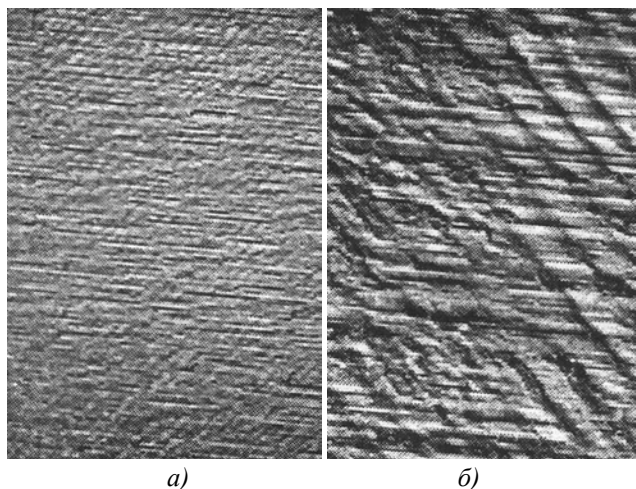


Рис. 8. Фотографии поверхности детали с ФПС в момент распада сегрегационных кластеров: а –  $\times 50$ ; б –  $\times 250$

О таком поведении сегрегационных кластеров также свидетельствуют рентгеноэлектронные исследования ФПС, с использованием рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии в системе анализа поверхности «Specs» (Германия), результаты которых приведены в работах [2, 3, 5, 7 – 9].

Таким образом, выполненные модельные и металлографические исследования особенностей формирования и поведения ФПС на деталях трибосистем показали, что в них, с одной стороны, происходят необратимые преобразования, приводящие к изменению энергии механической системы, имеющей сложную структуру и включающую механическую, физико-химическую, трибодинамическую и сегрегационно-диффузионную эволюционно связанные подсистемы. С другой стороны, анализ

выполненных исследований дает основание считать, что созданные на поверхностях деталей трибосистем ФПС представляют собой сложные физические системы, в которых активно протекают процессы динамической самоорганизации, проявляющиеся в непрерывной структурной перестройке. При этом сегрегированные атомы в образуемых кластерах существенно влияют на все эксплуатационные характеристики ФПС, прежде всего, на интенсивность изнашивания материала поверхностного слоя детали и величину коэффициента трения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бутенко, В.И.** Научно-технические технологии создания высоконагруженных деталей машин / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Р.Г. Шаповалов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с.
2. **Бутенко, В.И.** Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты. – Ростов н/Д: Издат. центр ДГТУ, 2016. – 219 с.
3. **Бутенко, В.И.** Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях деталей машин. – Ростов н/Д: Издат. центр ДГТУ, 2016. – 235 с.
4. **Клименченков, А.А., Смоленцев, Е.В.** Формирование микро- и нанопрофиля сопрягаемых поверхностей при комбинированной обработке // *Наноинженерия*. – 2013. – №7. – С. 8 – 15.
5. **Колесников, В.И., Кравченко, В.Н., Колесников, И.В.** Кинетика фрикционного переноса в металлополимерной трибосистеме // *Трение и износ*. – 2014. – Т. 35. – № 6. – С. 735 – 738.
6. **Курзина, И.А.** Градиентные поверхностные слои на основе интерметаллидных частиц: синтез, структура, свойства / И.А. Курзина, Э.В. Козлов, Ю.П. Шаркеев. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013. – 260 с.
7. **Колесников, В.И.** Исследование процессов трения и износа с помощью методов рентгеноэлектронной, оже-электронной спектроскопии и квантовой химии / В.И. Ко-

лесников, А.Т. Козаков, И.В. Колесников [и др.] // *Вестник Южного научного центра РАН*. – 2013. Т.9. – С. 29–36.

8. **Колесников, И.В.** Теплофизические, диффузионные и сегрегационные процессы в зоне фрикционного контакта // *Вестник ДГТУ*. – 2015. – Т. 15. – № 4. – С. 54 – 62.

9. **Бутенко, В.И.** Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. – Ростов н/Д: Издат. центр ДГТУ, 2017. – 481 с.

### REFERENCES

1. Butenko, V.I. *Science Intensive Technologies of Long-life Machinery Formation* / V.I. Butenko, D.S. Durov, R.G. Shapovalov. – Taganrog: Publishing House of SFU, 2014. – pp. 404.
2. Butenko, V.I. *Parts Surfaces Finishing: Methods, Devices, Tools*. – Rostov-upon-Don: Publishing Center of DSTU, 2016. – pp. 219.
3. Butenko, V.I. *Modified and Multi-component Functional Layers on Machinery Surfaces*. – Rostov-upon-Don: Publishing center of DSTU, 2016. – pp. 235.
4. Klimchenkov, A.A., Smolentsev, E.V. Formation of micro- and nano-profile mating on surfaces at combined machining // *Nano-engineering*. – 2013. – No.7. – pp. 8 – 15.
5. Kolesnikov, V.I., Kravchenko, V.N., Kolesnikov, I.V. Friction transfer kinetics in metal-polymeric tribosystem // *Friction and Wear*. – 2014. - Vol. 35. – No.6. pp. – 735-738.
6. Kurzina, I.A. *Gradient Surface Layers Based on Intermetallide Particles: Synthesis, Structure, Properties* / I.A. Kurzina, E.V. Kozlov, Yu.P. Sharkeyev. – Tomsk: Publishing House of NTL, 2013. – pp. 260.
7. Kolesnikov, V.I. Friction and wear investigation through methods of X-ray-electronic, Auger-electronic spectroscopy and quantum chemistry / V.I. Kolesnikov, A.T. Kozakov, I.V. Kolesnikov [et al.] // *Bulletin of Southern Scientific Center of RAS*. – 2013. Vol.9. – pp. 29-36.
8. Kolesnikov, I.V. Thermo-physical, diffusion and segregation processes in friction contact area // *Bulletin of DSTU*. – 2015. Vol.15. – No.4. – pp. 54-62.
9. Butenko, V.I. *Scientific Fundamentals of Functional Engineering of Machinery Surface Layer*. – Rostov-upon-Don: Publishing Center of DSTU, 2017. – pp. 481.

Рецензент д.т.н. И.И. Артемов

