

Е. Б. Сорока, канд. техн. наук, С. А. Клименко, д-р техн. наук,
М. Ю. Копейкина, канд. техн. наук, Киев, Украина

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ

Ideological basic for synthesis of support system for coated goods performance is proposed. As a principle concept about optimal architecture and properties of surface layers, which are purposefully created subject to conditions of operating loading, is taken

Введение. Необходимость защиты и упрочнения поверхности деталей машин, даже в случае, когда в их конструкциях используются материалы с улучшенным комплексом физико-механических свойств, вытекает из двух обстоятельств. Во-первых, именно поверхностные слои являются наиболее уязвимыми при работе режущего, штампового, мелющего и других видов инструментов, а также в парах трения. Так, износ, коррозионная и эрозионная стойкость, трещинообразование определяются свойствами тонкого поверхностного слоя. Во-вторых, в поверхностных слоях нагруженных тел развиваются процессы, являющиеся синергетическим активатором процессов во всем объеме материала. Именно состояние поверхностных слоев и явления в них обуславливают пластическое поведение материалов деталей, а также их усталостные и демпфирующие характеристики [1, 2].

Учитывая сложность и взаимовлияние факторов, имеющих место при создании изделий с упрочненным поверхностным слоем, в частности с покрытиями, для заданных условий эксплуатации, для их рассмотрения целесообразно использовать подходы системного анализа.

Постановка задачи. Основной функцией $\{F\}$ системы является обеспечение работоспособности (прочности и износостойкости) изделия с покрытиями в целом и его отдельных элементов. Обеспечить эту функцию призвана структура системы, представляющая собой множество $S = \{M, P, R\}$, где M – элементы системы, P – свойства элементов системы, R – связи элементов. Связи между системой и ее окружением представляют собой входы $\{X\}$ и выходы $\{Y\}$. Функция системы $\{F\}$ состоит в преобразовании входов $\{X\}$ в выходы $\{Y\}$. Элементы системы (подсистемы) на различных уровнях решают вопросы успешной реализации основной функции $\{F\}$. Выделение таких структурных уровней связано с разными подходами к обеспечению решения задачи. На взгляд авторов такая система представляется трехуровневой.

На третьем уровне $\{M_3\}$ решаются задачи формирования архитектуры покрытий в соответствии с эпюрой эксплуатационного нагружения рабочих поверхностей изделия. Речь идет о формировании покрытий как сплошного, так и дискретного типов с постоянными и переменными геометрическими параметрами участков разной формы. При этом необходимо обеспечить формирование таких параметров покрытия и такое состояние его поверхностного слоя, которые отвечали бы приработанному состоянию для условий конкретного эксплуатационного нагружения, что и решается на втором уровне $\{M_2\}$ системы. Тут рассматриваются вопросы технологического обеспечения практического создания покрытия в соответствии с рекомендациями, полученными с уровня $\{M_3\}$, обеспечения в покрытии и его поверхностном слое состояния, отвечающему равновесному, формируемому при приработке. На уровнях $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ рассматриваются функционально ориентированные покрытия на локальных участках изделия, контактное нагружение и эксплуатационные требования к которым могут быть различными. Первый уровень системы $\{M_1\}$ связан с формированием комплекса функциональных покрытий на всех участках изделия, подвергающихся различному эксплуатационному нагружению.

Предварительная подготовка поверхности под нанесение покрытия должна рассматриваться как отдельная составляющая технологии, оказывающая, за счет технологической наследственности, влияние на всю систему обеспечения работоспособности изделия с покрытиями.

Подходы к решению задачи. В условиях эксплуатационного нагружения в самой системе формируется равновесный, с точки зрения энергетических затрат, рельеф, который оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики системы. Предоставленная самой себе, система формирует грубый рельеф, как результат схватывания, задира, растрескивания по слабым местам, причем трещина может прорасти из покрытия в основу, отслоения участков покрытия с образованием «лоскутковой» структуры в результате развития магистральной интерфейсной трещины. Поэтому возникает задача формирования устойчивых форм с целью сохранения исходной поверхности, что позволит расширить область установившегося износа и продлить ресурс изделия с покрытием. Следует отметить, что износостойкость покрытия, например, на поверхности режущего инструмента, должна улучшить качество поверхности, обработанной этим инструментом. Как отмечалось, эта задача решается на третьем уровне $\{M_3\}$ при проектном создании покрытий соответствующей архитектуры: одно- и многослойных, разнотолщинных, градиентных покрытий, а также покрытий дискретного типа. А обеспечение требуемых геометрических, химических, физико-механических параметров и структуры покрытия, показателей состояния его поверхностного слоя, возможно более отвечающих приработанному уровню для предъявляемого к отдельным участкам детали с покрытием эксплуатационного свойства решается технологически на втором уровне $\{M_2\}$. Рассматриваются технологические особенности, оборудование и условия формирования покрытий, методы их финишной обработки, а также вопросы технологического обеспечения качества и эксплуатационных свойств изделий с покрытиями. На технологическом уровне обеспечиваются физико-механические характеристики, а также геометрические характеристики, связанные с шероховатостью, волнистостью, структурой поверхностных слоев. Между подсистемами $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ существует сложное взаимодействие – создание определенной архитектуры покрытия (слоистость, градиентность, дискретность и т.д.), разработанной на уровне $\{M_3\}$, требует технологического обеспечения на уровне

$\{M_2\}$ с учетом технологичности метода нанесения и возможностей имеющегося оборудования. Технологическое обеспечение состояния поверхностного слоя, отвечающего приработанному, на уровне $\{M_2\}$ связано, в свою очередь, с архитектурными решениями уровня $\{M_3\}$. Уровень $\{M_1\}$ призван решить вопрос о формировании покрытия на всех участках одного изделия или на различных изделиях в зависимости от условий эксплуатационного нагружения и материала изделия. Реализация разработки на уровне $\{M_1\}$ неразрывно связана с подсистемами $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ – она обусловлена синергетическим объединением в пределах изделия или группы изделий результатов, полученных на уровнях $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$.

Свойства элементов подсистемы на всех уровнях вместе с условиями эксплуатации формируют напряженное состояние (НС) покрытия (рис. 1), основы, интерфейсной зоны и, таким образом, изделия с покрытиями в целом.

Воздействуя через изменение НС на свойства (Р) подсистем $\{M\}$, можно направлено управлять работоспособностью, в частности износостойкостью, изделий с покрытиями. Так, на уровне $\{M_2\}$ формируется структура покрытия, состояние его поверхностного слоя, которые влияют на знак и уровень остаточных напряжений, когезионную и адгезионную прочность композита «основа-покрытие». Характер рельефа в поверхности покрытия определяет размер пятен контакта, нормальные и сдвиговые усилия на них, а, следовательно – время приработки и схватываемость. Химический состав покрытия, определяемый свойствами уровней $\{M_3\}$, $\{M_2\}$, значительно влияет на контактное взаимодействие.

Результаты предварительных оценок напряженного состояния, выполненные при проектировании изделия с покрытиями на уровне $\{M_3\}$, с учетом эксплуатационного нагружения позволяют прогнозировать величину эффективных напряжений, непосредственно влияющих на работоспособность изделия. Окончательная величина эффективных напряжений определяется с учетом результатов, полученных на этапе $\{M_2\}$.

Предварительная подготовка поверхности под нанесение покрытия, включающая в себя, например, механическую обработку поверхности, формирование упрочненных слоев (ионное азотирование в плазме тлеющего разряда, импульс-лазерное воздействие), оказывает влияние на физико-механические характеристики изделия с покрытиями. Это выражается в изменении сопротивления термопластическим деформациям, а также трансформации распределения остаточных напряжений в композиции основа-покрытие после нанесения покрытия на модифицированную поверхность.

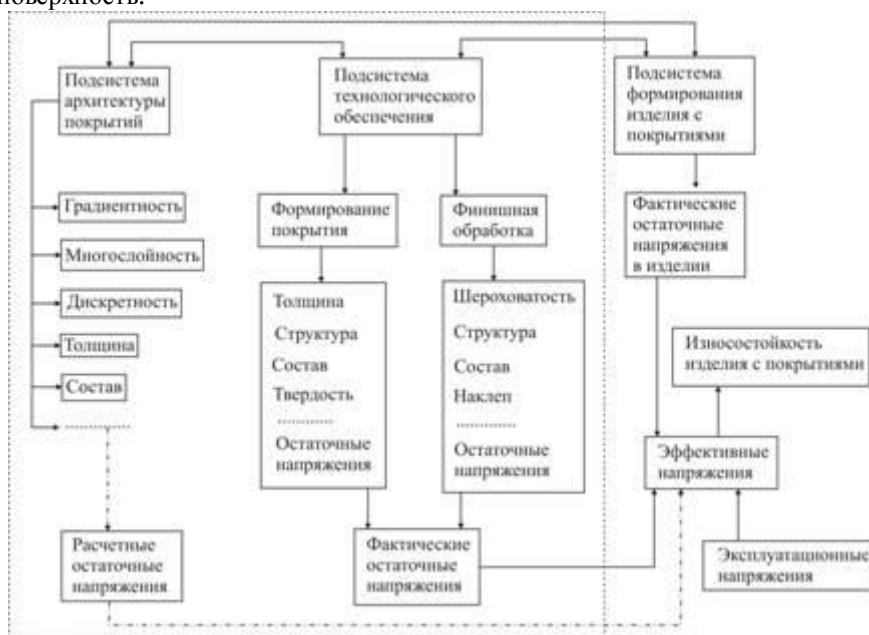


Рис. 1 – Создание НС в изделии с покрытиями на трех уровнях системы

Геометрические параметры элементов архитектуры покрытия такие как: количество и толщина слоев, подслоев и буферных слоев, форма и размеры дискретных участков покрытия, их сплошность оказывают влияние на характеристики когезионной прочности покрытия, адгезионную прочность, величину и распределение в покрытии как остаточных, так и эксплуатационных напряжений. И наоборот, напряжения, являющиеся результатом нанесения покрытия и (или) возникающие в эксплуатационных условиях, влияют на геометрические параметры участков изделия с покрытиями.

Как следует из вышеизложенного, свойства элементов каждой из подсистем $\{M_3\}$, $\{M_2\}$ и $\{M_1\}$ и их взаимодействия оказывают непосредственное влияние на напряженное состояние изделия с покрытиями. В результате сложного взаимодействия подсистем архитектуры покрытий $\{M_3\}$, технологического обеспечения $\{M_2\}$ и формирования изделия с покрытиями, в зависимости от условий эксплуатационного нагружения, преобразование входов системы $\{X\}$ в ее выходы $\{Y\}$ обусловлено НС изделия с покрытиями.

Это дает основание рассматривать вопросы о формировании устойчивой естественной архитектуры поверхностного слоя, повышающей самоорганизацию системы при эксплуатационном нагружении. В этом свете представляется справедливым подход, когда создание «рационального» НС рассматривается комплексно, как результат вклада эффектов на трех уровнях системы. Под «рациональным» НС понимается сочетание «полезного» уровня остаточных напряжений сжатия в покрытии и минимального вклада от эксплуатационных напряжений, связанных с условиями применения изделия. При этом, рациональным НС в изделии формируется за счет эффектов во всей системе – в подсистемах архитектура покрытий $\{M_3\}$, технологического обеспечения $\{M_2\}$, формирования изделия с покрытиями $\{M_1\}$ с учетом эксплуатационного нагружения.

Для покрытий дискретного типа, например, предполагается, что уменьшение поверхности контактных участков изделия в зоне трения приводит к снижению касательной составляющей нагружения, а значит, к уменьшению схватывания. Следует также отметить, что междискретные промежутки (основной материал), при этом, не испытывают воздействия касательной составляющей нагружения: на них касательные напряжения равны нулю, а нормальные напряжения за пределами соседних дискретных участков взаимокompенсируются (рис. 2).

Уменьшение площадки контакта, приводя, с одной стороны, к снижению касательной составляющей нагружения, и вызывает, с другой стороны, увеличение удельной нормальной распределенной нагрузки. Вместе с тем, показано [3], что величина удельной нормальной распределенной нагрузки возрастает меньше, чем уменьшается касательная нагрузка. Этим объясняется, например, уменьшение силы резания при работе лезвийного режущего инструмента с покрытием дискретного типа

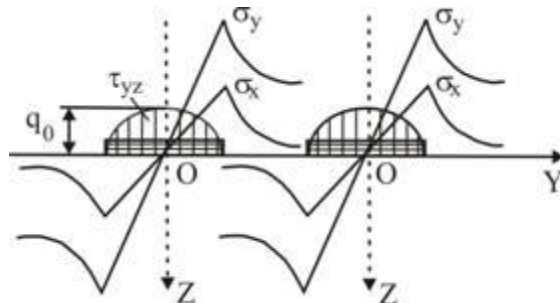


Рис. 2 – Эпюры напряжений вдоль оси Y под действием касательной составляющей нагружения

Как известно, площадь контакта в условиях эксплуатационного нагружения изделия не является постоянной: она изменяется с изменением контактного давления, а также зависит от размеров и материала контртела, например, обрабатываемого материала при резании или штамповке детали. Можно показать, что при несовпадении зоны нагружения и участка со сплошным покрытием (нагруженная зона меньше, чем поверхность с покрытием) максимальные напряжения в покрытии выше, чем в случае совпадения зоны нагружения и зоны изделия с покрытием. При использовании покрытия дискретного типа в силу несвязанности между собой дискретных участков, зона занимаемая покрытием и зона нагружения совпадают [4]. Кроме того, изолированный участок покрытия является более жестким, чем сплошное покрытие.

Учитывая отмеченное, ниже представлено обоснование целесообразности применения покрытий с дискретной топографией поверхности с точки зрения минимизации НС в композиции «основа-покрытие» при эксплуатационном нагружении (уровень $\{M_3\}$).

Как известно, наличие эксплуатационных напряжений растяжения в поверхностных слоях основного материала, приводит к растрескиванию цельных покрытия с созданием регулярной сетки трещин. Определение размера дискретных участков с учетом напряжений растяжения, передающихся в покрытие через поверхность адгезионного контакта, а также остаточных напряжений в покрытии дает возможность спроектировать устойчивую естественную дискретную архитектуру покрытия [5]. Априори создание покрытия с топографией поверхности, аналогичной той, которая возникла бы в результате растрескивания покрытия, обуславливает существенное повышение самоорганизации системы. Тем самым, на уровне проектирования покрытия $\{M_3\}$ в подсистеме архитектуры покрытий, обеспечивается минимизация эксплуатационного изменения формы (износа) упрочняемой поверхности.

Обеспечение износостойкости поверхностного слоя покрытия зависит также от уровня остаточных напряжений, которые, наряду с эксплуатационными, вносят свой вклад в уровень эффективных напряжений. Как показывает анализ литературных данных, остаточные напряжения сжатия повышают износостойкость изделия с покрытием, а также обеспечивают улучшение механических характеристик всего упрочненного изделия [6, 7]. Вместе с тем, слишком высокий уровень таких напряжений в покрытии приводит к отслоению покрытия от основы, охрупчиванию и выкрашиванию его поверхностного слоя [8]. Представляется, что дискретизация покрытия ограничит величину остаточных напряжений, а выбор геометрических параметров (толщины и размеров отдельных участков) покрытия позволит сформировать рациональное НС при сохранении остаточных напряжений сжатия на полезном уровне. В решении этой задачи задействованы уровни $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ системы, выходы которых $\{Y_3\}$, $\{Y_2\}$, способствуя формированию рационального НС системы, позволяют реализовать основную функцию системы $\{F\}$ – высокую работоспособность изделия с покрытиями.

Помимо изделия с покрытиями в целом, а также основы и покрытия как отдельных элементов, после принятия, исходя из анализа НС, решения о дискретизации поверхности, рассмотрению подлежат отдельные участки покрытия (рис. 3). Так, снижение остаточных напряжений сжатия в отдельном участке дискретного покрытия по сравнению со сплошным покрытием, а также выбор толщины и протяженности отдельных дискретов даст возможность сохранить целостность поверхностного слоя участка изделия с покрытием, исключив его разрушение выпучиванием [9].

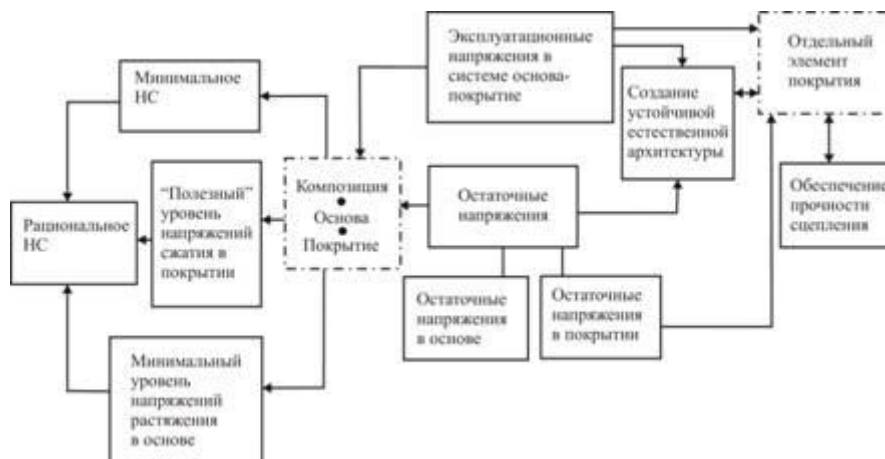


Рис. 3 – Идеология создания дискретной архитектуры на основе анализа НС

Исходя из условий нагружения понятно, что в процессе деформирования твердый участок покрытия на упругом основании при воздействии нормальной сосредоточенной нагрузки будет стремиться отслоиться от основы в краевых зонах. Избежать этого можно исходя из анализа формы изогнутой оси элемента покрытия, что позволяет найти такое сочетание геометрических размеров дискретного участка, которое обеспечит покрытию способность не отслаиваться по краям, а вдавливаясь в основу без разрушения [9].

Применительно к дискретным покрытиям реализация основной функции системы {F} связана с выбором геометрических параметров упрочняющего или модифицированного слоев: толщины, размера дискретных участков, величины междискретных промежутков для конкретных условий эксплуатационного нагружения с учетом физико-механических характеристик основного материала.

Практическое формирование покрытия с дискретной архитектуры осуществляться в подсистеме технологического обеспечения {M₂}.

Как отмечалось выше, для практической реализации технологий напыления важным являются вопросы предварительной подготовки поверхностей изделия под упрочнение, в том числе и дискретными покрытиями. В этой связи представляется интересным рассмотреть влияние предварительной механической обработки основы и предварительной операции по упрочнению поверхностного слоя основного материала (азотирование) как на НС, так и на состояние поверхностного слоя покрытия.

Этапы методологии повышения работоспособности на этапе проектирования изделия с покрытием дискретного типа можно представить следующим образом:

- обоснование дискретной топографии покрытия с точки зрения минимизации эксплуатационных напряжений в изделии и обеспечения «полезного» уровня остаточных напряжений сжатия в покрытии;
- выбор параметров отдельных участков покрытия, гарантирующих отсутствие когезионного растрескивания покрытия и адгезионного отслоения в области интерфейса;
- выбор параметров дискретной архитектуры для минимизации эффективных напряжений в изделии – в покрытии, в основном материале, в интерфейсной зоне.

Выводы. Предложенный системный подход предопределяет необходимость проведения комплекса взаимосвязанных исследований по изучению и моделированию НС покрытий и всего изделия с покрытиями при различных видах эксплуатационного нагружения. Его можно рассматривать как идеологическую основу для синтеза системы обеспечения работоспособности изделий с покрытиями, исходя из представлений об архитектуре и свойствах поверхностного слоя, направленно формируемых в зависимости от условий эксплуатационного нагружения с целью повышения самоорганизации системы.

Список литературы: 1. *Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах.* Под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: СО РАН, 2006. – 519 с.; 2. *Иванова В. С.* Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 383 с.; 3. *Антонюк В. С.* Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу / В. С. Антонюк // Автореф. дис. ... докт. техн. наук, НТУ України «КПІ» – Київ, 2006. – 35 с.; 4. *Сорока Е. Б.* Упрочнение разделительных штампов покрытиями дискретной структуры / Е. Б. Сорока, В. А. Титов, Б. А. Ляшенко, О. В. Герасимова // Вісник національного технічного університету України «Київський Політехнічний інститут»: Машинобудування. – К.: НТУ України «КПІ», 2008. – Вип. 52. – С. 341–351.; 5. *Ляшенко Б. А.* Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений / Б. А. Ляшенко, Е. Б. Сорока, А. В. Рутковский, Н. В. Липинская // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 119–125.; 6. *Klocke F.* Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications / F. Klocke, T. Krig // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1999. – 48, № 2. – С. 515–525.; 7. *Табаков В. П.* Механизм разрушения износостойких покрытий режущего инструмента в процессе резания / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 6. – С. 41–45.; 8. *Rickerby D.S.* Structure, properties and applications of TiN coatings produced by sputter ion plating / D. S. Rickerby, R. B. Newbery // Vacuum. – 1988. – 38, № 3. – С. 161–166.; 9. *Антонюк В. С.* Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей / В. С. Антонюк, Е. Б. Сорока // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 8. – С. 8–13.

Поступила в редколлегию 15.06.2009