УДК 621.785.5, 621.91

УПРОЧНЯЮЩИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ СЛОЁВ

Васильев С. Г.[1], Зубков Н. Н.[2], Симонов В. Н.[3]
[1] Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Аннотация. Разработан способ создания композиционных упрочняющих покрытий большой толщины с вертикальным расположением упрочняющих слоёв, позволяющий управлять структурой и свойствами поверхностного слоя путём использования предварительной механической обработки методом деформирующего резания и последующего диффузионного легирования методами химико-термической обработки.

Ключевые слова: *деформирующее резание, диффузионное легирование, композиционные структуры, износостойкость.*

Введение

Повышение надёжности и эксплуатационных характеристик узлов трения машин и механизмов является важным направлением развития машиностроения. Первостепенное значение для работоспособности деталей узлов трения имеет состояние и качество поверхностного слоя. В первую очередь это относится к деталям пар трения скольжения. Рост эксплуатационных процессов, увеличение скоростей перемещения рабочих узлов, возрастание контактных температур и давлений значительно повышают роль качества и состояния поверхностного слоя узлов трения. Повышение эксплуатационных характеристик узлов трения является комплексной задачей и предполагает привлечение современных прогрессивных методов создания упрочнённого поверхностного слоя на поверхности детали [1]. Основным методом повышения эксплуатационных характеристик поверхности детали является создание различных упрочняющих покрытий. Наиболее существенное упрочнение рабочих поверхностей деталей обеспечивают методы модификации поверхностного слоя путём изменения его химического состава, где методы химико-термической обработки (ХТО) наиболее предпочтительны [2]. Именно методы ХТО нашли наибольшее распростра-

нение в мировой практике поверхностного упрочнения, что доказывает их преимущества по управлению свойствами поверхностного слоя деталей по сравнению с другими методами. В то же время методы химико-термической обработки имеют ряд недостатков: диффузионные покрытия имеют экспоненциальное уменьшение концентрации диффундируемого элемента по толщине покрытия [3], что значительно снижает эксплуатационные характеристики покрытия по мере изнашивания детали, технически сложно или экономически нецелесообразно формирование покрытий толщиной более 1 мм, значительная продолжительность процессов диффузионного легирования [4], практически невозможно создавать композиционные покрытия.

Современной тенденцией развития упрочняющих технологий является создание композиционных покрытий, управляемых по составу структуры и свойствам. Исследования подтверждают, что лучшими эксплуатационными характеристиками обладают поверхности не с большей твёрдостью, а с определённым сочетанием твёрдых и мягких слоёв покрытия, имеющих композиционный характер. Создание таких покрытий с выраженной композиционной структурой и возможностью управления составом и свойствами является перспективным и важным направлением развития упрочняющих технологий.

Предлагается к рассмотрению новая технология создания упрочняющих покрытий большой толщины с управляемой структурой и свойствами поверхностного слоя, при использовании метода механической обработки деформирующего резания (ДР) и последующего диффузионного легирования методами химико-термической обработки (ХТО) [5].

Цель работы: повышение эксплуатационных характеристик поверхностей трения скольжения за счёт создания упрочняющих композиционных покрытий с вертикальным расположением упрочняющих слоёв. Задача работы заключалась в определении способов создания упрочняющих композиционных покрытий при использовании метода ДР и последующей химико-термической обработки.

Материалы и методы решения задачи

Новым способом создания упрочняющих покрытий большой толщины с управляемой структурой и свойствами является метод ДР, совмещённый с химико-термической обработкой. Основой способа является предварительное создание на рабочей поверхности детали управляемой микрощелевой поверхностной матрицы

методом ДР в форме регулярного макрорельефа с малыми шагами, вертикальными или наклонными слоями и узкими зазорами между ними. Характерные размеры макрорельефа составляют: шаг макрорельефа 0,1 ... 0,9 мм, ширина зазора между слоями 15 ... 400 мкм, глубина макрорельефа 0,2 ... 1,5 мм.

Схема процесса ДР для создания микрощелевой поверхностной матрицы в виде регулярного макрорельефа на поверхности стального образца показана на рис. 1. Формирование регулярного макрорельефа осуществляется на универсальном токарно-винторезном станке. При вращении заготовки инструмент ДР совершает продольное перемещение с подачей D_{Snp} и с назначенной глубиной резания t. По конструкции инструмент ДР является токарным проходным резцом отличающийся геометрией режущей части. В результате отрицательных значений переднего угла на вспомогательной режущей кромке подрезанный слой металла не отделяется в виде стружки, а остаётся на наружной поверхности заготовки прочно связанный с основным материалом заготовки. Совокупность не отделившихся от заготовки подрезанных слоёв образует на её поверхности регулярный макрорельеф в виде рёбер, который в дальнейшем определяет эксплуатационные характеристики обработанной поверхности [6–10]. Формирование регулярного макрорельефа возможно на конструкционных сталях с твёрдостью не более 200 ... 230 НВ и коэффициентом относительного удлинения не менее 18%.

К основным геометрическим параметрам регулярного макрорельефа относятся: шаг структуры S_0, толщина ребра a, высота ребра h, зазор между ребра b. Параметрами структуры можно управлять. Толщина ребра a определяется из выражения

$$a = S_0 \cdot \sin\varphi,$$

зазор между рёбрами b определяется выражением, где φ и φ_1 соответственно главный и вспомогательный угол в плане

$$b = S_0 \cdot (\sin\varphi - \sin\varphi_1),$$

глубины резания t назначается, исходя из получения требуемой высоты макрорельефа h, определяется следующим выражением:

$$t = \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_1} \cdot \left\{ h \cdot 1{,}1 + \frac{S_0}{2} \cdot \left[\frac{(\sin\varphi_1 - 1{,}1 \cdot \sin\varphi)^2}{\sin\beta} - 1{,}1^2 \cdot \sin\beta \right] \right\},$$

где β – угол заострения инструмента в плане, равный $\beta = 180 - (\varphi + \varphi_1)$.

Соотношения углов φ и φ_1 определяет геометрическую форму получаемого макрорельефа. При условии, когда вспомогательный угол в плане φ_1 равен 90° формируется структура с вертикальным расположением чередующихся рёбер с зазорами (рис 1, *б*), при соотношении главного угла в плане φ меньшем угла φ_1 формируется наклонная структура из чередующихся рёбер и зазоров (рис. 1, *б*), *в*. При равенстве углов φ и φ_1 формируется макрорельеф из плотно сжатых рёбер с зазором теоретически равным нулю (рис. 1, *г*).

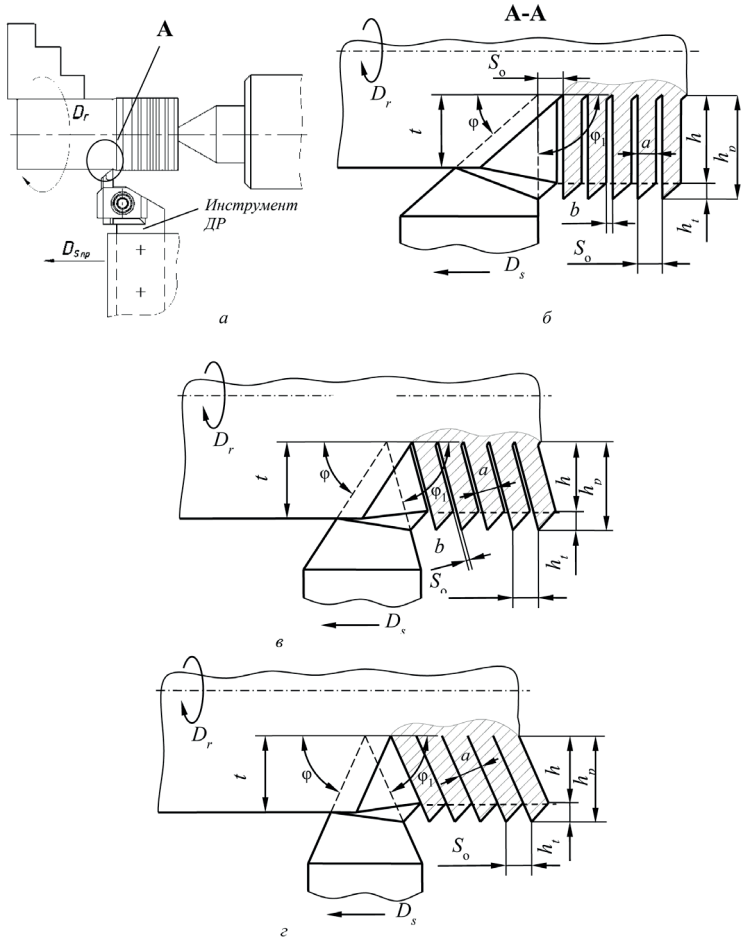

Рис. 1. Получение различных форм макрорельефа методом ДР

В результате на поверхности заготовки возможно получение следующих основных структур, вертикальных с зазором, наклонных с зазором и наклонных без зазора (рис 1).

Узкие и глубокие межрёберные зазоры в виде каналов позволяют ускорить поток диффундирующего элемента вглубь поверхности материала заготовки, поскольку насыщающая среда легко проникает на всю толщину будущего покрытия по канавкам между рёбрами, после чего происходит диффузионное легирование боковых сторон рёбер. Становится возможным получать диффузионные покрытия большой толщины, поскольку толщина покрытия определяется глубиной канавок, формируемых методом ДР. Длительность диффузионного легирования назначается в зависимости от толщины ребра и зазора между ними. На рис. 2 представлена схема формирования диффузионного покрытия методом ДР: *1* – исходный контур микрощелевой матрицы до ХТО, *2* – основной материал детали, *3* – диффузионный слой, полученный после ХТО, *4* – приращение толщины ребра после ХТО, *5* – открытая пористость.

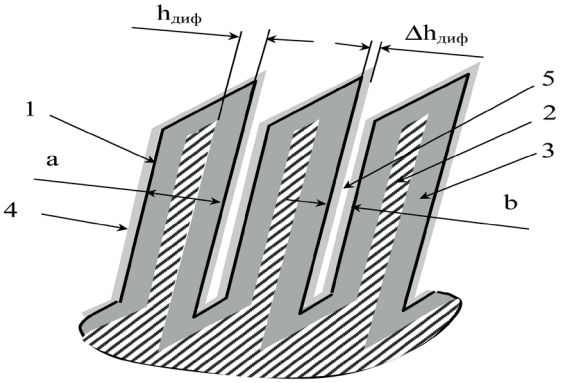

Рис. 2. Схема формирования диффузионного покрытия на поверхности методом ДР

При традиционных методах ХТО процесс диффузионного насыщения поверхности часто сопровождается увеличением размеров детали на величину прироста диффузионного слоя $\Delta h_{диф}$. Это явление считается нежелательным, поскольку требует введения операции последующей механической обработки, шлифования, притирки и т.п. В случае проведения ХТО макрорельефа после ДР размер прироста диффузионного слоя $\Delta h_{диф}$ участвует в увеличении толщины

рёбер с одновременным уменьшением ширины каналов *5* (рис. 2). Этот фактор является положительным, поскольку позволяет при необходимости зарастить исходные каналы и таким образом устранить пористость в данной структуре. В общем факторами управления структурой покрытия является толщина ребра *a*, ширина канавки *b*, высота ребра *h*. Уменьшая толщину рёбер, можно обеспечить диффузионное легирование всего объёма ребра при минимальном времени ХТО. При рёбрах большей толщины или при меньшей продолжительности ХТО возможно оставить без изменения свойства материала центральной части ребра *2* (рис. 2). Уменьшая зазор между рёбрами, возможно получить беспористую структуру.

Результаты

Наличие каналов на поверхности детали созданных ДР – толщина покрытия задаётся глубиной каналов. На рис. 3 показан пример получения покрытия на гладкой поверхности стального образца и на поверхности, подготовленной методом ДР. Условия проведения, время выдержки и режимы ХТО для образцов были одинаковы.

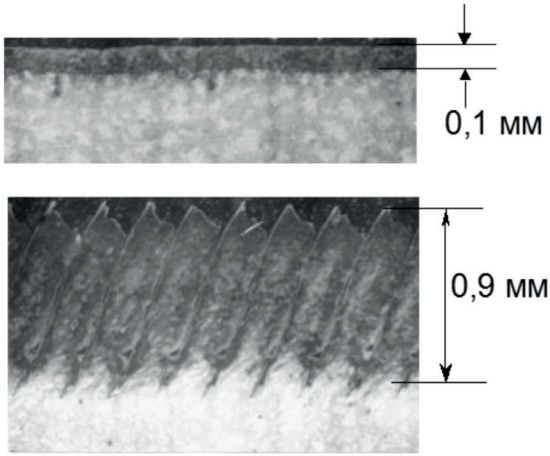

Рис. 3. Сталь 20Х13, низкотемпературная нитроцементация, Увеличение ×30.
а – покрытие без предварительной подготовки поверхности,
б – покрытие, полученное на детали с микрощелевой поверхностной матрицей

Видно, что при прочих равных условиях предварительное формирование микрощелевой структуры позволило увеличить толщи-

ну покрытия в 9 раз с уменьшением экспоненциального снижения концентрации легирующего элемента по толщине покрытия.

Экспериментально получены основные четыре типа композиционных покрытий при использовании ДР с последующей ХТО (рис. 4).

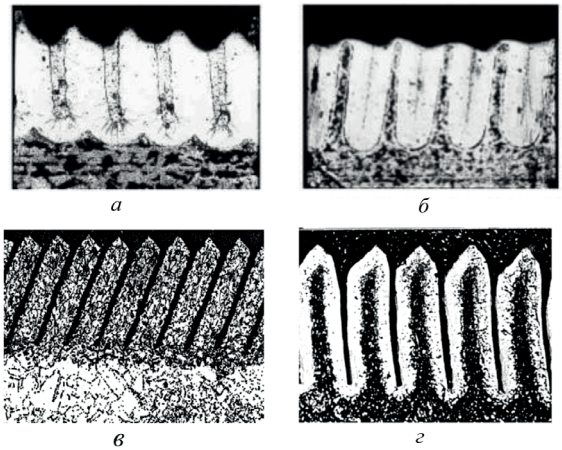

Рис. 4. Типы упрочняющих композиционных покрытий
а - беспористые полностью упрочнённые покрытия с чередованием слоёв различной твёрдости, б - беспористые частично упрочнённые покрытия с сохранением пластичных прослоек исходного материала, в - пористые полностью упрочнённые покрытия с регулярной открытой пористостью в виде узких щелевых канавок, г - пористые частично упрочнённые покрытия с сохранением прослоек исходного материала

Последовательность создания упрочнённых композиционных покрытий на поверхности детали состоит в создании регулярного макрорельефа методом ДР, последующей ХТО, окончательной размерной механической обработке. Пористые покрытия при необходимости возможно заполнить твёрдыми смазками. Треугольные заострения вершин рёбер h_t устраняются до ХТО либо после её проведения методами механической обработки.

Оценка работоспособности композиционных покрытий, полученных по новой технологии, заключалась в проведении испытаний на относительную износостойкость и определении количества циклов до появления задира колебательного-вращательного движения пары трения вал – втулка.

Относительная износостойкость образцов из сталей Ст. 3, Стали 45, Стали 40Х исследовалась на машине трения «Шкода-Саввин». Испытания проводились в одних условиях для гладких образцов и образцов с макрорельефом, созданным ДР. На всех образцах проведена ХТО низкотемпературная нитроцементация. Эталоном являлась сталь ШХ15 твёрдостью 64 HRC. Результаты испытаний относительной износостойкости приведены на рис. 5.

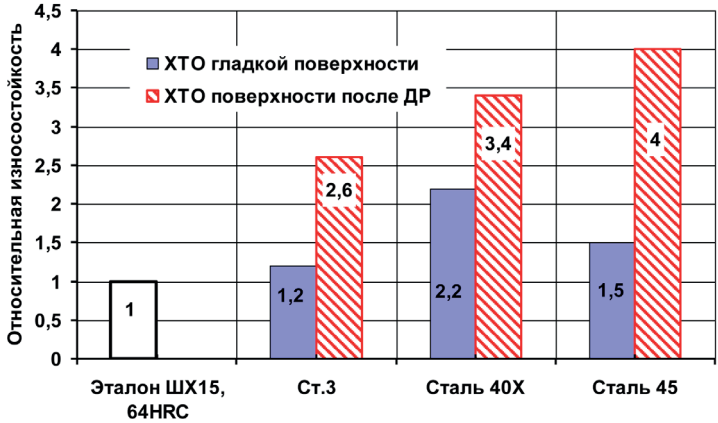

Рис. 5. Относительная износостойкость образцов после низкотемпературной нитроцементации

Испытания по определению количества циклов колебательного-вращательного движения пары трения вал – втулка до появления задира имитировали работу тяжелонагруженного подшипника скольжения. Испытания проводились на стенде качательного движения по методике, разработанной ИМАШРАН. Критерием работоспособности узла трения было количество циклов до появления задира при ступенчатом повышении нагрузки на узел трения. Образец под номером пять, выполненный по новой технологии с формированием макрорельефа методом ДР и последующей ХТО с добавлением твёрдой смазки, показал лучшие результаты максимального контактного давления 150 Мпа, при котором задир не достигнут. Результаты испытаний представлены на рис. 6.

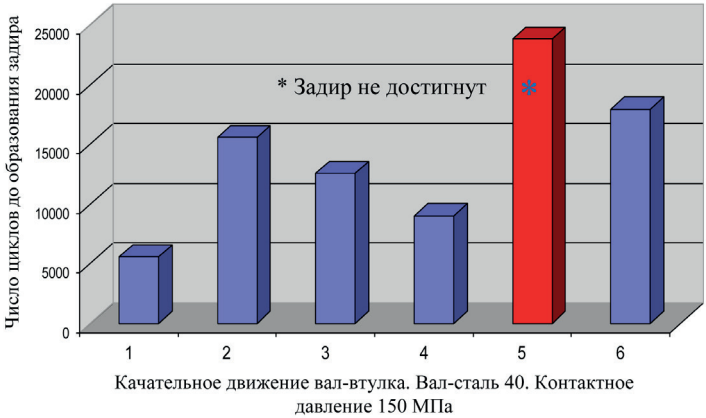

Рис. 6. Количество циклов до образования задира для различных вариантов испытуемых покрытий, 1 – базовый, закалка ТВЧ, 2 – карбонитрация, 3 – твердосплавное плазменнонапылённое покрытие, 4 – твёрдое хромирование, 5 – ДР + низкотемпературная нитроцементация + твёрдая смазка, 6 – электроискровое легирование

Обсуждение полученных результатов

Параметрами управления структурой композиционного покрытия являются: толщина a, и высота h ребра, ширина межрёберного зазора b, глубина проникновения легирующего элемента в боковую сторону ребра $h_{диф}$, марка стали, величина прироста толщины ребра $\Delta h_{диф}$ при ХТО. Толщина и тип покрытия задаётся не временем проведения ХТО, а глубиной каналов h и толщиной a ребра, полученных на поверхности детали методом ДР.

Испытания на относительную износостойкость показали, что покрытия, полученные на образцах с макрорельефом и последующей карбонитрацией, превосходят традиционные диффузионные покрытия на гладкой поверхности в 1,5 ... 3,0 раза. Это объясняется тем, что при высоком уровне контактных нагрузок происходит разрушение тонкого (20 ... 30 мкм) карбонитридного слоя, обладающего высокой твёрдостью (до 1200 HV). Продукты разрушения, попадая в зону контакта, играют роль абразивных частиц, усиливая процесс износа. В карбонитридном слое, полученном на оребренной поверхности, прослойки твёрдого карбонитрида зажаты в пластичной матрице, что предотвращает их интенсивное разрушение.

Триботехнические испытания образцов, имитирующих работу тяжелонагруженного подшипника скольжения, показали, что поверхности

трения с наличием оребренной структуры с шагом 0,4 мм, глубина канавки 0,5 ... 0,6 мм, ширина зазора 20 ... 30 мкм упрочнённой методом низкотемпературной нитроцементации с добавленеим твёрдой смазки не достигли задира при максимальном количестве циклов и максимальном удельном давлении для испытуемых образцов равном 150 МПа.

Выводы

1. Формирование оребренной структуры на поверхности деталей трения методом деформирующего резания и последующей химико-термической обработкой даёт возможность получения композиционных покрытий с управляемой структурой и свойствами.

2. Экспериментально подтверждена возможность получения на сталях четырёх различных типов композиционных покрытий.

3. Создание на поверхности стальной детали микрощелевой матрицы методом ДР обеспечивает большую толщину диффузионного покрытия по сравнению с традиционными методами ХТО. Толщина покрытия определяется глубиной предварительно сформированной микрощелевой матрицы.

4. Триботехнические испытания композиционных покрытий показали, что по относительной и абсолютной износостойкости предлагаемые покрытия превосходят традиционные диффузионные в 1,5 ... 3,0 раза, а склонность к задирам уменьшается в 2,2 ... 3,2 раза.

5. Технология формирования покрытий по предлагаемому методу перспективна для использования в узлах трения скольжения при больших допустимых износах, удельных нагрузках и ограниченных условиях смазки. Покрытия способны работать при удельных давлениях до 150 МПа.

Литература

1. Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Филонов И. П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учёб. пособие для вузов /Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Филонов И. П. – Минск : УП «Технопринт», 2000. – 266 с. : ил. – Библиогр. Библиогр.: с. 263–264. – ISBN 985–6373–74–3.
2. Восстановление и упрочнение деталей машин: Межвуз. науч. сб. / Саратовский гос.техн.ун-т. – Саратов. – 2000. – 130 с.
3. Технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Под ред. М.И.Юдина, В.П.Лялякина. – Краснодар. – 2000. – 345 с.
4. Афанасьев А. А. Технология восстановления и упрочнения изношенных поверхностей стальных деталей / Афанасьев А. А. // Технология машиностроения. – 2008. – № 2. – С. 41–44.

5. Пат. 2015202 (РФ). Способ упрочнения поверхности детали / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, С.Г. Васильев и др. // Изобретения.– 1994. – №12.
6. Зубков Н.Н. Метод деформирующего резания и его возможности. Оборудование и инструмент для профессионалов. №12(47), 2003. – С. 24–25.
7. Зубков Н.Н. Основы формообразования функциональных поверхностей методом деформирующего резания. Вестник машиностроения. 1994, N10, – С.13–20.
8. Зубков Н.Н. Особенности реализации метода деформирующего резания. // Технология машиностроения.– 2001. – №1. – С. 19–26.
9. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием. Вестник МГТУ.-М., МГТУ, 1993, N4., 1995.
10. Токарная обработка без снятия стружки. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Якушев А.А. Технологическое оборудование и материалы. Том 6(24) 1997 г.

Информация об авторах

Васильев Сергей Геннадьевич – к.т.н., доцент, кафедра МТ2, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, 105005, г. Москва, Россия, ORCID.org/0000–0002–8882–4893.

E-mail: sergv@bmstu.ru

Зубков Николай Николаевич – д.т.н., профессор, кафедра МТ2, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, 105005, г. Москва, Россия, ORCID.org/0000–0003–3757–1299.

E-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Симонов Виктор Николаевич – д.т.н., профессор, кафедра МТ8, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, 105005, г. Москва, Россия, Doi:10.1088/1757–899X/347/1/012007.

E-mail: simonov@bmstu.ru