

УДК 621.891

В.И. Дворук, И.В. Шевеля, А.В. Радченко

**НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ УСЛОВИЙ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ**

*Обоснована целесообразность принципа структурного "подрессорирования" для создания износостойких материалов, предназначенных для применения в условиях абразивного изнашивания, на базе которого разработан новый материал. Экспериментально подтверждена высокая работоспособность нового материала на примере решения задачи повышения абразивной износостойкости цилиндрических втулок для буровых насосов.*

В общей задаче повышения долговечности машин важным направлением является создание покрытий, стойких против абразивного изнашивания. Актуальность этого направления объясняется тем, что на долю указанного вида повреждаемости приходится от 50 до 80 % случаев преждевременного выхода из строя деталей машин, а применяемые на сегодняшний день износостойкие покрытия не всегда обеспечивают удовлетворительную работоспособность деталей, например, в буровых машинах и оборудовании.

Создание износостойких покрытий должно базироваться на принципах, исходящих из механизма абразивного изнашивания. В основе механизма абразивного изнашивания, как известно [1], лежит взаимодействие абразивной частицы с металлом, состоящее из двух этапов: внедрения абразивной частицы в металл и поступательного перемещения ее вдоль поверхности. Поскольку первичным актом является внедрение абразивной частицы в металл, ясно, что для обеспечения износостойкости материал должен обладать способностью противостоять этому внедрению. В покрытиях, которые на сегодняшний день применяются на практике, такое противостояние достигается за счет создания структурно жестких систем посредством различных технологических способов обработки (закалка током высокой частоты (ТВЧ)) химико-термическая обработка, наплавка, электрохимическая обработка, поверхностное легирование и т.д.). Абразивный износ таких покрытий по своему виду, как правило, является хрупким.

При одинаковой твердости более износостойкими оказываются покрытия эвтектического типа, для которых характерен повышенный уровень пластических свойств по сравнению с покрытиями других типов [2]. Этот факт заслуживает внимания в связи с еще одной важной особенностью взаимодействия абразива с металлом, которую необходимо учитывать при создании износостойких покрытий. Речь идет о том, что указанное взаимодействие реализуется при больших деформациях [3]. В соответствии с современными представлениями о природе прочности твердых тел [4, 5, 6 и др.] отличительной особенностью больших деформаций является вихревой характер их протекания, при котором структурные элементы материала, наряду с трансляционными испытывают также поворотные моды деформации. Это способствует формированию в зонах стесненных деформаций сильных концентраторов напряжений, приводящих к зарождению трещин и разрушению. Поэтому для обеспечения работоспособности при больших деформациях в материале покрытия необходимо создать исходную вихревую структуру, предотвращающую возникновение концентраторов напряжений и обеспечивающую эффективную релаксацию последних.

Теоретические предпосылки и экспериментальные факты, приведенные выше, указывают на необходимость наличия высокой несущей способности и вихревой структуры, как обязательных условий для обеспечения абразивной износостойкости покрытия. Одновременное выполнение таких условий в покрытиях, созданных на базе традиционного принципа структурно жестких систем, невозможно. Поэтому представляет интерес принцип структурно "подрессоренных" материалов, теоретически обоснованный В.Е.Паниным [4]. В соответствии с этим принципом высокой износостойкостью должен обладать не предельно жесткий, а более деформируемый материал, в котором несущие элементы структуры (твердые частицы, поверхностный слой и т.д.) способны к значительной автономной и обратимой деформации за счет наличия внутренних демпфирующих элементов (матрица, реологическая подложка и т.д.)

Проверка работоспособности принципа структурного "подрессоривания" материалов осуществлялась нами в процессе решения актуальной практической задачи повышения абразивной износостойкости внутренней поверхности цилиндрических втулок буровых геологоразведочных насосов.

Втулки современных буровых насосов изготавливаются из сталей 15, 20, 45, или 70. Их внутренняя поверхность упрочняется цементацией, борированием или закалкой ТВЧ на глубину  $h=1,5..2$  мм и имеет твердость  $HRC_{э}>54-56$ . При геологоразведочном и структурно-поисковом бурении скважин в твердых, крепких и очень крепких породах происходит интенсивный абразивный износ внутренней поверхности втулок, что свидетельствует о ее неудовлетворительных триботехнических характеристиках. Поскольку втулки работают в коррозионно-агрессивной среде, то в качестве основы будущего покрытия нами был выбран материал ВТН-26 (ТУ14-127-161-80) из порошков сплавов эвтектической системы  $12X18N9T-TiB_2-VC$ . Для покрытий из этого материала характерным является высокий коэффициент трения и низкие теплофизические свойства [6], и так как втулка работает в паре с резиновым поршнем, навулканизированным на стальной шток, указанные свойства покрытия крайне нежелательны из-за негативного влияния на долговечность поршня. В связи с этим было принято решение ввести в покрытие бронзу. Кроме положительного влияния на коэффициент трения и теплофизические характеристики, выбор бронзы в качестве компонента покрытия также связан с более высокой плотностью и низкой температурой плавления бронзы по сравнению со сталью, что открывает новые возможности в формировании покрытий, о которых речь пойдет ниже.

Лучшие свойства эвтектической структуры, как известно [6], обеспечиваются при ее кристаллизации из жидкого состояния. Поэтому для нанесения износостойкого покрытия нами был выбран способ центробежной индукционной наплавки, обладающий высокой технологичностью и производительностью. Технология нанесения покрытия заключалась в следующем. Во внутреннюю закрытую полость вращающейся втулки из стали 20X засыпалась шихта, состоящая из порошка ВТН-26, гранул бронзы БрОЦС5-5-5 и буры. Деталь вращалась с определенной угловой скоростью. Далее с помощью индуктора деталь нагревалась, а после расплавления шихты охлаждалась.

В результате на внутренней поверхности втулки формировалось двухслойное износостойкое покрытие, состоящее из слоя эвтектического сплава, расположенного на бронзовой подложке. Двухслойность покрытия обусловлена гравитационной ликвацией из-за разности между плотностью эвтектического сплава и бронзы при его формировании под

воздействием центробежной силы в процессе наплавки. Результаты рентгеноструктурного и металлографического анализа показали, что в структуре эвтектического сплава наблюдаются эвтектические кристаллы диборида титана, монокарбида ванадия и сферические включения бронзы в твердом растворе. Твердость слоя составляла  $HRC_3=54 \dots 62$ .

Таким образом, полученное покрытие по своей конструкции представляет собой комплексный композит, в котором одновременно реализуются несколько систем композитов. Так, эвтектический слой покрытия представляет собой прямую систему Шарпи (мягкая матрица + твердые изолированные частицы), матрица эвтектического слоя – обратную систему Шарпи (твердая основа + мягкие изолированные частицы), а в целом покрытие – систему слоистого композита.

Триботехнические свойства покрытий аналогичного химического состава при сухом трении по торцевой схеме в паре с цементированной сталью 20Х существенно зависят от концентрации стального и бронзового порошка [6]. В связи с этим можно предположить, что триботехнические свойства исследуемой пары трения "эвтектическое покрытие – резина" также будут зависеть от соотношения металлических ингредиентов в шихте. Для изучения этого вопроса эвтектический порошок смешивали с бронзовыми гранулами в различных соотношениях и наплавляли на втулки. Толщина покрытия после механической обработки составляла  $\delta=2$  мм. Из наплавленных втулок вырезали образцы, которые затем подвергали триботехническим исследованиям по схеме "колодка–диск" на машине трения СМЦ-2. Режим триботехнических исследований был следующий: контактное давление  $p=10$  МПа, скорость относительного скольжения  $V=1,31$  м/с. Рабочей средой служил глинистый раствор на водной основе со следующими параметрами: условная вязкость  $\nu=30$  с, плотность  $\rho=1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, объемное содержание абразива (кварцевый песок)  $C=2,2 \dots 2,6$  %. Замер износа колодки выполнялся через 5000 оборотов диска, что соответствовало пути трения 7850 м. Продолжительность опыта определяли по времени выхода в область стабильных значений момента трения.

Результаты исследований, приведенные в табл.1, подтверждают наше предположение о существенной зависимости износостойкости покрытия от содержания в нем бронзы. Минимальный износ при этом обеспечивают покрытия, содержащие 30–50% бронзы по объему. Кроме того, введение бронзы приводит к заметному снижению коэффициента трения по сравнению с покрытием без бронзы.

Таблица 1

Относительная износостойкость и коэффициент трения покрытия в зависимости от содержания бронзы

Содержание бронзы, %	Относительная износостойкость*	Коэффициент трения
0	1	0,15
10	0,62	0,13
30	0,27	0,1
50	0,27	0,08
70	1,2	0,06

\* Имеется в виду массовое отношение износа покрытия, содержащего бронзу, к массовому износу покрытия без бронзы.

На основании полученных результатов для наплавки цилиндрических втулок выбран присадочный материал следующего состава: 70% ВТН-26 + 30% БрОЦС5-5-5 + бура.

С целью сравнительной оценки износостойкости была изготовлена и подвергнута триботехническим испытаниям опытная партия втулок трех типов: наплавленных полученным сплавом, наплавленных сплавом эвтектической системы 12Х18Н9Т-ТiВ<sub>2</sub>-VС без бронзы и закаленных ТВЧ. Втулки первого и второго типа изготавливали из стали 20Х, а третьего – из стали 70. Испытания втулок проводили на специальном стенде [7]. Рабочая среда представляла собой глинистый раствор со следующими параметрами: условная вязкость  $\nu = 27$  с, плотность  $\rho = 1,12 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, концентрация абразива (кварцевый песок)  $C = 5$  %, и прокачивалась по замкнутому циклу под давлением  $p = 4$  МПа. Продолжительность испытаний составляла  $t = 82$  ч. Перед испытаниями производилась приработка втулок под давлением  $p = 1$  МПа в течение  $t = 18$  ч. Одновременно на буровом насосе испытывались две втулки, одна из которых была втулкой первого типа, другая – одной из трех типов указанных выше. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Сравнительная оценка износостойкости втулок бурового насоса

№ п/п	Тип втулки	Твердость внутренней поверхности, HRCэ	Износ, мм
1	Наплавленная полученным сплавом	58	0,021
2	Наплавленная эвтектическим сплавом без бронзы	62	0,035
3	Закаленная ТВЧ	58	0,076

Из табл. 2 видно, что покрытие из полученного сплава обеспечивает 1,5-4-кратное повышение износостойкости втулок по сравнению с втулками других типов. Корреляции между твердостью и износостойкостью внутренней поверхности не наблюдалось. Так, при одинаковой твердости износостойкость втулок, наплавленных полученным сплавом была в 3,6 раза выше износостойкости втулок, закаленных ТВЧ, а при меньшей твердости – в 1,6 раза выше износостойкости втулок, наплавленных эвтектическим сплавом без бронзы. Приведенные результаты могут быть объяснены более благоприятной структурой полученного покрытия для реализации принципа структурного "подрессоривания". Эта точка зрения основывается на следующих соображениях.

В эвтектическом покрытии без бронзы "подрессоривание" упрочняющей фазы осуществляется матрицей аустенитного типа, которая, как известно [8], более пластична и износостойка, чем матрица из неотпущенного мартенсита. Поэтому структурное "подрессоривание" в ней проявляется сильнее. С достаточной степенью уверенности можно утверждать, что наряду с более эффективной упрочняющей фазой этот фактор вносит существенный вклад в повышение износостойкости втулки, наплавленной эвтектическим сплавом без бронзы, по сравнению со втулкой, закаленной ТВЧ.

Положительное влияние структурного "подрессоривания" наиболее наглядно проявляется в эвтектическом покрытии с бронзой, где кроме аустенитной матрицы высоко демпфирующими элементами являются также включения меди в матрице и бронзовая подложка для несущего слоя. Нельзя не учитывать и комплексную конструкцию покрытия. Присутствие медных включений в матрице, во-первых, способствует повышению пластичности покрытия за счет образования зон релаксации напряжений и снижения объемной концентрации упрочняющей фазы [9, 10], во-вторых – устойчивости эффекта структурного "подрессоривания во времени за счет снижения склонности аустенита к упрочнению и стабилизации его по отношению к мартенситообразованию при деформировании [11]. Демпфирующая подложка также способствует повышению пластических свойств покрытия, поскольку представляет собой макрозону релаксации напряжений. И наконец, комплексная конструкция покрытия сама по себе является мощным источником релаксации напряжений.

Наличие указанных источников дополнительного демпфирования по всей видимости и обеспечивает более благоприятные условия для реализации эффекта структурного "подрессоривания", а следовательно, лучшие триботехнические свойства полученного покрытия по сравнению с эвтектическим покрытием без бронзы и слоем, упрочненным ТВЧ.

Таким образом, результаты данной работы подтверждают работоспособность принципа структурного "подрессоривания" для создания материалов с повышенной абразивной износостойкостью.

#### Список литературы

1. *Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г.* Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
2. *Голубец В.М., Пашечко М.И.* Износостойкие покрытия из эвтектики Fe–Mn–C–P–K.: Наук. думка, 1989. – 160 с.
3. *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
4. *Панин В.Е.* Современные проблемы физики прочности твердых тел // Изв.Сиб.отд. АН СССР. – 1987.– Вып.3. – № 11. – С.87–97.
5. *Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А.* Физические основы прочности тугоплавких металлов. – К.: Наук. думка, 1975. – 315 с.
6. *Лабунец В.Ф., Ворошнин Л.Г., Киндрачук М.В.* Износостойкие боридные покрытия. – К.: Техніка, 1989. – 158 с.
7. *Бевзюк Ф.Г., Дворук В.И., Корякина Т.Ф., Панченко П.Т.* О влиянии профиля рабочей поверхности втулок на работоспособность цилиндропоршневой пары бурового насоса // Прогрессивные технологии освоения нефтяных месторождений Украины и Белоруссии. – К.: Укрпипроиннефть, 1990.–С.169–172.
8. *Брыков М.Н.* Сопrotивляемость абразивному изнашиванию железоуглеродистых сплавов со структурой остаточного аустенита в условиях стандартных испытаний // Тр. международной конф. "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки". – Ч. 3. – Запорожье: Запорожский гос.техн.ун–т. 1995. – С.82.

9. Лоскутов В.Ф., Семенченко О.В., Гриненко Е.М. Упрочнение деталей машин боромеднением // Защитные покрытия на металлах. – К.: Наук. думка, 1991. – Вып.25. – С.80–82.
10. Кіндрачук М.В., Дудка О.І., Сухенко Ю.Г., Черненко В.С. Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії. – К.: ІЗМН, 1997. – 119 с.
11. Тихонович В.И. Основы повышения износостойкости литых сплавов // Литые износостойкие материалы. – К.: ИПЛ АН УССР, 1978. – С.3–18.

Стаття надійшла до редакції 30 червня 1998 року.

**Володимир Іванович Дворук** (1953) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації у 1976 році. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник за спеціальністю "Тертя та зношування в машинах". Автор більше 50 наукових праць у галузі триботехніки.

**Volodymir I. Dvoruk** (b.1953) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1976). PhD (Eng) senior scientific researcher in "Friction and wearing property in machines". Author of more than 50 publications in the field of tribotechnics.

**Ігор Валерійович Шевеля** (1964) закінчив Київський політехнічний інститут в 1987 році. Кандидат технічних наук. Автор більш 30 наукових праць в галузі триботехніки.

**Igor B. Shevelya** (b. 1964) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1987). PhD (Eng), author of more than 30 publications in the field of tribotechnics

**Олександра Володимирівна Радченко** (1975) закінчила Київський міжнародний університет цивільної авіації у 1997 році, інженер.

**Alexandra B. Radtchenko** (b. 1975) graduated from Kyiv International University of Civil Aviation (1997). Engineer.