

Электронно-лучевая наплавка в черной металлургии

© Белюк С.И., Самарцев В.П., Рау А.Г., Гальченко Н.К.,
Дампилон Б.В., Раскошный С.Ю.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, пр. Академический 2/1, Россия

Введение

Дальнейший прогресс в новейших областях техники и современного машиностроения, в том числе черной металлургии, связан с широким внедрением в практику все более современных методов получения материалов с заданными свойствами и всесторонним изучением их функциональных характеристик. В последние десятилетия возникла и бурно развивается новая область нетрадиционных технологий модификации металлических материалов, основанных на обработке поверхности изделий концентрированными потоками энергии (КПЭ). В качестве КПЭ используются лазерное излучение, мощные (сильноточные) ионные пучки, потоки высокотемпературной импульсной плазмы, электронные пучки. При этом могут быть достигнуты экстремальные условия прохождения теплофизических и микрометаллургических процессов, приводящих к получению структурно-фазового состояния и свойств материалов, недостижимых традиционными способами их получения и обработки [1].

Известно, что в металлургическом производстве значительную часть себестоимости продукции составляют затраты на ремонт агрегатов, сменное оборудование и запасные части. В связи с этим задача повышения износостойкости быстроизнашивающихся деталей металлургических агрегатов, работающих в особо жестких условиях нагрева, напряжений, агрессивных сред и других неблагоприятных факторов в настоящее время является наиболее актуальной.

Так, например, одним из основных узлов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является кристаллизатор с медными стенками. Медь, имеющая высокую теплопроводность, обеспечивает быстрое формирование корочки металла на поверхности образующегося слитка. При движении ме-

талла через кристаллизатор в зоне взаимодействия поверхностей идет значительный абразивный износ меди, приводящий к изменению исходной геометрии кристаллизатора. Пройдя 4-8 циклов использования после механической обработки, медные стенки утилизируются. В связи с дороговизной меди предпринимаются попытки сокращения ее удельного расхода в расчете на тонну выплавленной стали путем использования износостойких марок медных сплавов, упрочнения меди холодной деформацией, никелирования и хромирования поверхности медного кристаллизатора и т.д. Однако, такие способы упрочнения дороги и трудоемки, а значительные температурные градиенты в кристаллизаторах, вызванные охлаждением в потоке воды, и механические нагрузки приводят к отслаиванию осажденных и напыленных покрытий.

Другой важнейшей проблемой в черной металлургии является недостаточная стойкость фурм доменных печей, подвергаемых высоким тепловым нагрузкам при производстве чугуна. Выход фурм из строя происходит преимущественно из-за интенсивного износа и прогара «рыльной» части. Множественные попытки по нанесению упрочняющих покрытий методом плазменной металлизации, газопламенного напыления не привели к положительным результатам, т.к. после непродолжительной эксплуатации фурм покрытия отслаивались.

Особенности технологического процесса электронно-лучевой наплавки в вакууме.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эксплуатационной стойкости стальных изделий (прокатные валки, лопатки эксгаустеров и т.д.) и медных изделий металлургического оборудования (фурмы доменного производства, стенки кристаллизаторов для непрерывной раз-

ливки стали) является применение технологии электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) в вакууме для нанесения упрочняющих покрытий на их поверхности. Благодаря ряду преимуществ данной технологии-простоте, высокой стабильности и надежности электромагнитной системы сканирования электронного луча, возможности гибкого управления за счет изменения его параметров, безотходности и экологической чистоте процесса обеспечивается формирование покрытий с необходимыми структурой и свойствами. С помощью ЭЛН-технологии, в зависимости от режимов наплавки, можно реализовывать процессы как порошковой металлургии, так и микрометаллургии в электронном луче непосредственно на детали. Под действием электронного луча на упрочняемой поверхности возникает жидкометаллическая ванна, в которую порошковым дозатором подается наплавочный материал. Большая скорость кристаллизации способствует формированию однородной мелкодисперсной структуры наплавленного слоя.

Технология многопроходной электронно-лучевой наплавки основана на использовании эффекта концентрации энергии электронного луча в микрообъеме жидкометаллической ванны наплаваемого изделия. Сканирование электронного луча по линиям развертки позволяет лучу многократно, с частотой 400 Гц, воздействовать на микрообъем ванны расплава до полного завершения процесса расплавления металлической составляющей порошка, подаваемого в зону оплавления, и усреднения фазового состава микрообъема жидкометаллической ванны.

Для расширения спектра конструктивных применений с энергонапряженными условиями эксплуатации наиболее востребованы дисперсноупрочненные покрытия с металлической матрицей на основе тугоплавких износостойких соединений (карбиды, нитриды, карбонитриды, бориды). В этом случае ванна расплава с тугоплавкой составляющей, выходя из области воздействия электронного луча вследствие перемещения зоны оплавления, кристаллизуется с высокой скоростью из-за значительного отвода тепла из жидкометаллической ванны в

объем наплаваемого изделия, а упрочняющая тугоплавкая составляющая, являясь одновременно центром кристаллизации, не успевает взаимодействовать с расплавом. Таким образом, на поверхности изделия формируются износостойкие композиционные покрытия с высоким уровнем физико-механических характеристик. Необходимая толщина наплаваемого слоя (0,5-5 мм) достигается за счет изменения скорости подачи наплаваемого материала или увеличения числа проходов [2]. Специфика ЭЛН-технологии заключается в том, что между основой и покрытием образуется протяженная (0.5-1.5 мм) переходная зона, тем самым исключается возможность отслаивания покрытия. Определенный интерес представляет также совмещение процесса наплавки с синтезом наплаваемого материала, сопровождающегося экзотермическим эффектом. Всё это делает ЭЛН - технологию уникальной, как в плане многообразия функциональных свойств порошковых покрытий, так и в плане нанесения покрытий на детали из любых сплавов и любой геометрии.

Устройство установки электронно-лучевой наплавки «ЛУНа-10»

В ИФПМ СО РАН была разработана электронно-лучевая технология, а в марте 2006г. смонтирована на ОАО «ЗСМК» новая модификация электронно-лучевой установки «ЛУНа-10» (рис.1), предназначенная для упрочнения поверхности узлов и механизмов металлургического оборудования, в том числе крупногабаритных изделий, таких как медные кристаллизаторы непрерывной разливки стали. Установка позволяет формировать одно- и многослойные покрытия различного назначения (упрочняющие, износостойкие, жаропрочные, жаростойкие и т.д.) на поверхности стальных, чугунных и медных изделий. На установке можно наносить покрытия на плоские поверхности изделий (длиной до 2100 мм, шириной 900 мм, толщиной 200 мм) и тела вращения (диаметром до 600 мм и длиной 2100 мм).

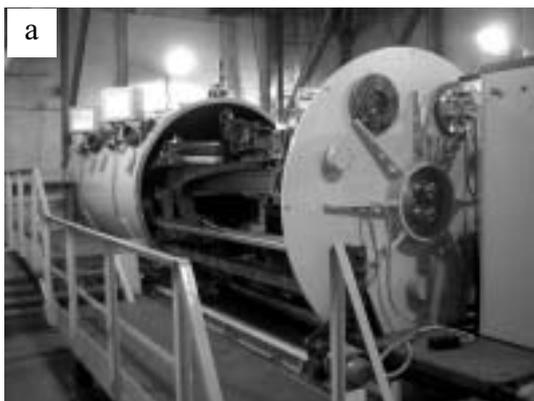


Рис.1 Установка электронно-лучевой наплавки «ЛУНа-10»: а – вид сбоку; б – вид сверху.

Установка представляет собой вакуумную электронно-лучевую автоматизированную систему с компьютерным управлением, оснащенную двумя электронными пушками, что позволяет одновременно осуществлять процесс нанесения покрытий на двух изделиях и повысить производительность процесса (рис.2). Электронные пушки (поз.1) находятся внутри вакуумной камеры (поз.2) и могут перемещаться с помощью двухкоординатного манипулятора (поз.3) над поверхностью наплавляемой детали (поз.4) по требуемой траектории, задаваемой оператором. Наплавочный материал поступает в зону наплавки посредством дозатора (поз.5), закрепленного на пушке. Установка также оборудована двумя съемными манипуляторами для нанесения покрытий на фурмы (позиция не указана на схеме).

Электронное оборудование установки представляет собой две независимые системы питания электронных пушек, системы управления манипуляторами и вакуумной станцией. Такое построение электронных систем позволяет обеспечить высокую на-

дежность и ремонтпригодность установки без длительных остановок производства.

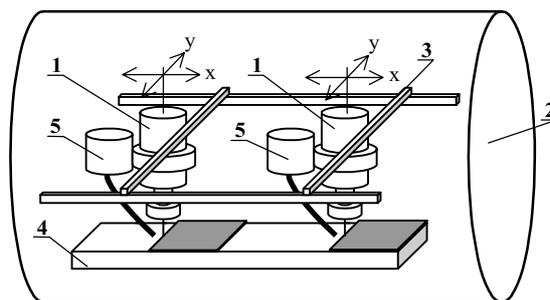


Рис.2 Схема установки электронно-лучевой наплавки «ЛУНа-10».

Управление установкой осуществляется от двух консолей оператора, представляющих собой панельные компьютеры. Программное обеспечение консолей оператора позволяет управлять в автоматическом режиме вакуумной системой, манипуляторами, электронными пушками и осуществлять автоматическую проверку элементов вакуумной системы, обеспечивая контроль аварийных ситуаций, таких как выключение напряжения сети, аварийную остановку насосов. Управление технологическим циклом нанесения покрытий и контроль режимов осуществляется на консоли оператора.

Для формирования электронного пучка на установке использованы источники с плазменным эмиттером разработки ООО «ЭЛИОН» (директор Н.Г. Ремпе). Источники не содержат нагретых электродов и деталей, что делает их менее чувствительным к химически активным и тугоплавким парам обрабатываемых материалов по сравнению с термокатодными источниками. Источники способны работать без применения специальных мер защиты эмиттера в широком диапазоне давлений, и в условиях интенсивных газовых выбросов из зоны расплава. В то же время источники с плазменным эмиттером имеют высокий ресурс работы, а по общетехническим характеристикам и геометрическим параметрам пучка не уступают термокатодным источникам.

Экспериментальные результаты

В работе представлены результаты исследования покрытий, полученных ЭЛН порошковых никельхромовых сплавов, а так-

же композиционных порошков на основе тугоплавких боридов, карбонитридов титана с металлическими связками разных составов.

ЭЛН-покрытия на медных изделиях металлургического оборудования

Для наплавки медных фурм (рис.3) использовали никельхромовые сплавы промышленного производства, а так же композиционные порошки на их основе с карбидами титана и ниобия.

Наплавку композиционных порошков проводили при рабочем давлении $P=10^{-1}$ Па с предварительным подогревом фурмы электронным пучком до $\sim 300^{\circ}\text{C}$. Необходимая толщина покрытия (1,5-2 мм) формировалась за 2 прохода (количество проходов зависит от скорости перемещения подложки и от порций подаваемого порошка). По мере формирования покрытия температура фурмы достигала 500-600 С.

Металлографический и рентгенофазовый анализы покрытий показали, что в процессе наплавки сформировалась дендритообразная структура γ - твердого раствора на основе Ni с равномерным распределением микротвёрдости по глубине наплавленного слоя ($H_{\mu}=3200-3750$ МПа). В структуре покрытий содержится тригональный карбоборид $\text{Me}_7(\text{CB})_3$ в виде скелетообразных дендритов, содержание которого определяет твердость и износостойкость упрочненного слоя покрытия после наплавки.

Результаты испытания на абразивный износ (ГОСТ 23.208-79) ЭЛН-покрытий на основе Ni-Cr сплава показали, что коэффициент износостойкости составляет $K_n=6,7$.

На основе полученных результатов Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН совместно с ОАО «ЗСМК» были проведены работы по упрочнению горловин доменных фурм методом электронно-лучевой наплавки, что привело к значительному снижению годовой потребности фурм: с 500 до 85 штук.

Принципиальные особенности нанесения покрытий на массивные (200 кг) «холодные» поверхности большой площади ($0,5 \text{ м}^2$) (кристаллизаторы для непрерывной разливки стали) потребовали серьезной доработки оборудования и выполнения до-

полнительных технологических исследований.

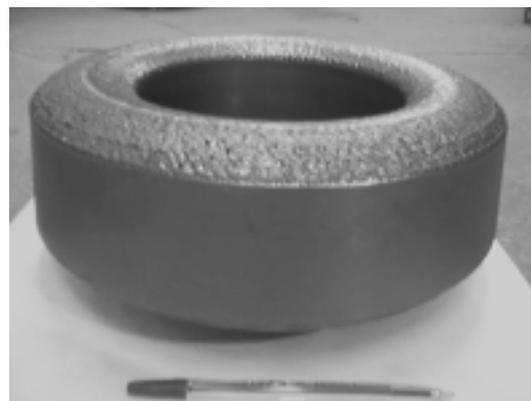


Рис.3. Горловина доменной фурмы, упрочненная электронно-лучевой наплавкой.

При этом необходимо было учитывать, что наплавка ведется практически в условиях «бесконечной теплоемкости», что требует для получения ванны расплава в зоне взаимодействия электронного пучка с кристаллизатором увеличения плотности мощности пучка. Это, в свою очередь, должно приводить к локальному увеличению температуры расплава меди до 3000°C и более.

Вследствие тепловых потерь в расплаве, образующемся при воздействии электронного пучка на массивный кристаллизатор, лишь часть установленной мощности является полезной. Расчеты, приведенные в работе [3], показали, что из тепловых потерь расплава наиболее существенными являются потери мощности на излучение и испарение меди. Максимальные потери мощности на испарение не превышают 100 Вт (в расчете не учитывались q_s – удельная скрытая теплота плавления и q_v – удельная скрытая теплота испарения), а размер жидкометаллической ванны расплава увеличивается с 5 мм^2 (при подогреве образца кристаллизатора до 500 К) до 12 мм^2 (при подогреве образца кристаллизатора до 800 К).

Экспериментальные исследования и теоретические расчеты показали, что при электронно-лучевой наплавке в зоне взаимодействия электронного пучка с поверхностью кристаллизатора образуется область с избыточным давлением порядка 3-5 атм., которое не позволяет использовать класси-

ческую схему наплавки по технологии ЭЛН. В этом случае часть наплавляемого порошка не попадает в ванну расплава и отбрасывается в сторону потоком частиц меди, испаряющихся с поверхности ванны расплава, снижая коэффициент использования наплавляемого материала. Чтобы этого избежать, для нанесения покрытия была разработана комплексная технология, включающая в себя газопламенное напыление покрытия с последующим оплавлением электронным пучком. Газопламенным методом на упрочняемую поверхность напыляли Ni-Cr-покрытия, дисперсноупрочненные карбидами титана и ниобия, толщиной $0,8 \pm 0,2$ мм, после чего проводилось их оплавление электронным лучом. В результате применения комплексной технологии формировались качественные покрытия без дефектов и пор, твердостью $H_{\mu} = 4100-4500$ МПа. При этом не происходило деформирование медной основы и растрескивания самих покрытий, что, вероятно, связано с относительно небольшой толщиной сформированных упрочненных слоев и низкими термическими (структурными) напряжениями в системе подложка – покрытие.

Композиционные покрытия на основе боридов титана для упрочнения лопаток эксгаустера

Также в ИФПМ СО РАН были освоены технологические процессы восстановления изношенных и упрочнения новых стальных деталей машин и механизмов широкой номенклатуры (лопатки эксгаустеров, торцевые уплотнения, прокатные валки). Химический и фазовый состав покрытия выбирался с учетом условий работы конкретной детали.

Так, упрочнение лопаток эксгаустера (рис.4), подвергающихся интенсивному воздействию эрозионного, абразивного и ударного характера, могло быть реализовано путем создания на их поверхности композиционных покрытий на основе диборидов (боридов) титана, синтезируемых в процессе электронно-лучевой наплавки из термореагирующих порошков. При этом дополнительное количество тепла, выделяемое в зоне оплавления за счет экзотермиче-

ской реакции между компонентами смеси, способствовало формированию покрытий с более однородной структурой по глубине слоя без увеличения мощности электронного луча [4].

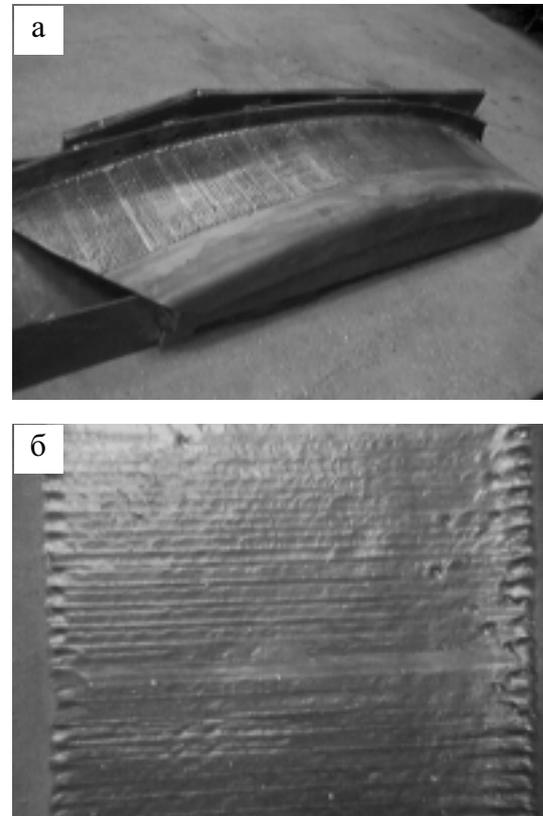


Рис.4. Внешний вид (а) и фрагмент (б) лопатки эксгаустера после электронно-лучевой наплавки.

Ниже приведены результаты исследования структуры и свойств композиционных покрытий, полученных на подложке из стали 30ХГСА (материал эксгаустера) из ферробора марки ФБО (21,3 %вес.В) и ферротитана марки ТиВ (60 %вес.Тi), взятых в равных весовых соотношениях: FeB(200-315 мкм)+ FeTi(50-200 мкм).

Наплавку покрытий осуществляли электроннолучевым методом в 2-4 прохода при ускоряющем напряжении 28 кВ. Диаметр луча –1,0 мм, длина развертки- 12 мм., скорость перемещения подложки-2 мм/с. Толщина наплавляемого слоя-2-3 мм.

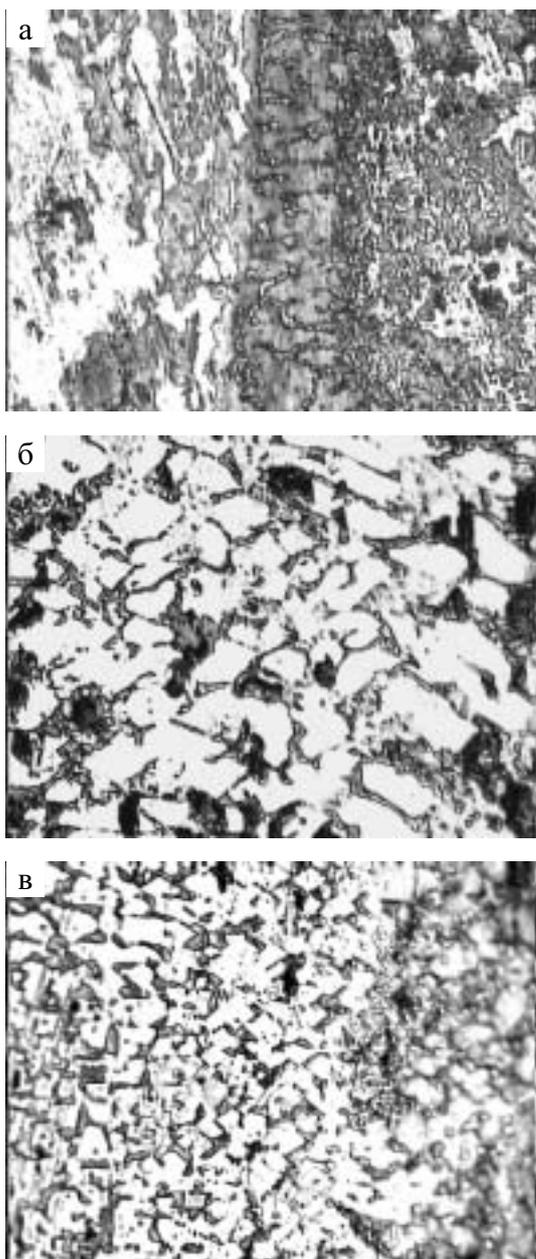


Рис 5. Микроструктура покрытия, полученного наплавкой смеси терморреагирующих порошков FeB (200-315 мкм)+ FeTi (50-200 мкм) (×200).

На рис.5 приведена микроструктура покрытия с тремя характерными зонами: а - граница раздела с подложкой; б - структура в середине наплавленного слоя; в - приповерхностная зона покрытий.

Исследования показали, что в процессе наплавки сформировалась слоистая структура с преимущественным содержанием фазовых составляющих по глубине слоя. Так, в центре слоя (рис.5б) структура, состоит, в основном, из кристаллов Fe₂B твердостью Н=14,4 ГПа, размером 20-38 мкм, и мелких (4-6 мкм) кристаллов диборида титана, расположенных в эвтектической связке Fe₂B-

Fe. Приповерхностная зона покрытия состоит из частиц, имеющих ярко выраженную кристаллографическую огранку, окаймленных тонкими прослойками эвтектики. По результатам РФА и измерениям нанотвердости данные частицы представляют собой бориды титана TiB, Ti₃B₄; TiB₂ с твердостью Н=22-34 ГПа и размером 10-17 мкм.

С целью оценки использования боридов титана в качестве твердой фазы, изучалась ее абразивная износостойкость. Трибологические свойства покрытия исследовали в парах трения по методу «неподвижный индентор из твердого сплава ВК-6 - вращающийся диск». Твердость индентора составляла Н_ц=29,3 ГПа. Испытания проводили при комнатной температуре со смазкой (N20+SMT) и без подачи смазки в зону контакта на машине трения PC- Controlled High Temperature Tribometer ТНТ-S-АХ0000 при нагрузке 10 Н и скоростях скольжения V=5;11 см/сек.

Исследования показали, что как при абразивном изнашивании, так и при износе в парах трения износостойкость коррелирует с агрегатной твердостью структурных составляющих и зависит от объемной доли тугоплавких соединений в поверхностной зоне покрытия, их морфологии и свойств металлической матрицы. При этом коэффициент износостойкости составил K_н=6, а интенсивность изнашивания находилась в пределах 1,61-3,3 мкм/км (табл.1).

Таблица 1. Коэффициент трения (f) и интенсивность изнашивания (I, мкм/км) покрытия, полученного электронно-лучевой наплавкой из терморреагирующих порошков.

V, см/сек	FeB (200-315 мкм)+ FeTi(50-200 мкм)		WC-6 %Co	
	f	I	f	I
5	0,510/0,026	1,610/-	0,488/0,129	13,9/0,161
11	0,510/0,0127	3,300/-	0,426/0,113	11,7/0,160

в числителе – значения f и I при трении без смазки
в знаменателе – при трении со смазкой.

Данные, приведенные в таблице, показывают, что наплавленное покрытие и твердый сплав WC-6 %Co, взятый для сравнения в качестве эталона, при данных нагрузочно-скоростных параметрах износа имеют со-

поставимые значения коэффициентов трения и более низкую интенсивность изнашивания, особенно при сухом трении.

Композиционные покрытия на основе карбонитридов титана для упрочнения прокатных валков, торцевых уплотнений и коронок ковшей экскаваторов

В последнее время особое внимание исследователей привлекают дисперсно-упрочненные композиционные материалы, включающие в себя материал связки, обладающий демпфирующими свойствами для эффективной релаксации концентраторов напряжения, и армирующие твердые частицы из металлокерамики. Такие материалы являются перспективными для использования в качестве упрочняющих покрытий для повышения эксплуатационной стойкости прокатного оборудования в металлургии, а также для рабочих органов горнодобывающей техники. С этой целью в ИФПМ СО РАН были разработаны новые наплавочные композиционные материалы на основе карбонитридов титана ($TiC_{0.5}N_{0.5}$) с матрицами из азотсодержащей хромомарганцевой стали аустенитного класса X20AG20 и быстрорежущей стали P6M5 [6]. Композиционные порошки были получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Исследование покрытий с карбонитридами титана показало, что в процессе электронно-лучевой наплавки формируются градиентные структуры композиционных покрытий с переменным химическим составом по глубине слоя. С ростом содержания карбонитридов титана в композитах твердость покрытий увеличивается, достигая максимальных значений при 40вес% TiCN (в системе X20AG20-TiCN - 52HRC, в системе P6M5-TiCN - 60HRC). Следует отметить, что микроструктура нетравленных шлифов композиционных покрытий с одинаковой объемной долей карбонитридов титана, отличающихся только химическим составом связки, практически одинакова.

Ниже рассматриваются структура и свойства композиционных покрытий системы X20AG20-TiCN, формируемые в процессе электронно-лучевой наплавки. Согласно

микрорентгеноспектральному анализу, в наплавленных покрытиях присутствуют частицы твердой фазы, представляющие собой соединения TiC_xN_y и сложные фазы $(Ti-Fe-Cr-Mn)C_xN_y$ [5]. Данное обстоятельство, возможно, обусловлено локальным высокоэнергетическим воздействием электронного луча, в результате, чего происходит частичный распад нестехиометрических карбонитридов с образованием сложных соединений, содержащих Ti, Fe, Mn, Cr, N, C. Микродюрометрический анализ показал (рис.6), что с повышением содержания карбонитридов титана увеличивается микротвердость (H μ) материала связки, что вызвано дополнительным легированием твердого раствора легирующими элементами неустойчивых карбидов и нитридов, растворившихся при наплавке. Чем больше карбонитридов титана в композиционном покрытии, тем выше степень легированности расплава. Твердость упрочняющей фазы в покрытиях (заштрихованная область) находится в диапазоне 10000 - 28000 МПа. Такой разброс значений твердости упрочняющей фазы связан с образованием в процессе наплавки ряда твердых растворов карбонитридов титана различной стехиометрии и других сложных соединений на основе титана, что подтверждается проведенными рентгеновскими исследованиями фазового состава покрытий. В табл.2 показаны твердость и относительная износостойкость наплавленных покрытий в зависимости от содержания твердой фазы. Из таблицы видно, что с ростом содержания карбонитридов титана (до 40%вес.) увеличивается как твердость, так и абразивная износостойкость покрытий.

Таблица 2. Абразивная износостойкость покрытий

Состав покрытия	Твердость, HRC	Относительная износостойкость
эталон Сталь 45	130 HV	1,0
X20AG20	30	1,2
X20AG20+20%TiCN	41	3,2
X20AG20+40%TiCN	50	10,5

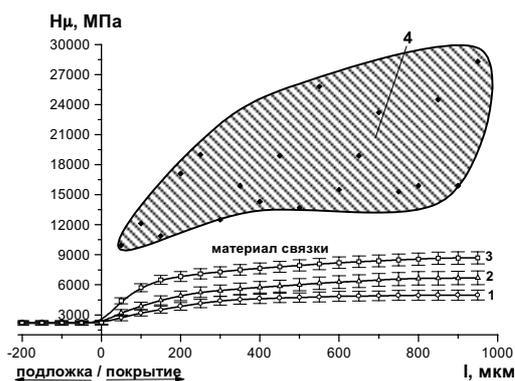


Рис.6

Рис.6. Распределение микротвердости H_n в переходной зоне малоуглеродистой стали – ЭЛН-покрытие: 1 – X20AG20; 2 – X20AG20+20%TiCN; 3 – X20AG20+40%TiCN; 4 – область твердой фазы.

Полученные результаты исследования были использованы при упрочнении прокатных валков (рис.7) и торцевых уплотнений композиционными покрытиями P6M5-TiCN, срок службы которых увеличился в 3-6 раз.

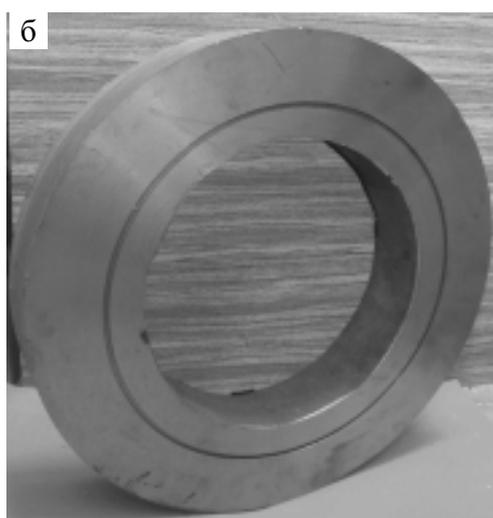


Рис.7. Прокатные валки (а) и торцевые уплотнения на барабанных ножницах для резки металла (б) с ЭЛН –покрытиями P6M5-TiCN.

Институтом физики прочности и материаловедения также был выполнен контракт

с японской фирмой «КАМАЦУ» по упрочнению зубьев ковшей землеройной техники. В качестве наплавочного материала использовали состав X20AG20-TiCN. Результаты натуральных испытаний показали, что износостойкость зубьев, упрочненных электронно-лучевой наплавкой, при работе в среде «глина-скальный грунт» в 3,7 раза, а при работе в песке – в 1.9 раза выше относительно неупрочненного состояния.

Литература

1. Якушин В.Л., Калинин Б.А. Модификация материалов при воздействии концентрированных потоков энергии и ионной имплантации (Часть 1. Физико-химические основы и аппаратура).- М.:МИФИ,1998.-88с.
2. Панин В.Е., Белюк С.И., Дураков В.Г., Прибытков Г.А., Ремпе Н.Г. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование технология, свойства покрытий// Сварочное производство,2000.№2.-С34-38.
3. Н.К. Гальченко, С.И. Белюк, С.Ю Раскошный, Н.А. Наркевич, С.В. Скворцов. Повышение износостойкости медных стенок кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок. // 6-й Научно-практический симпозиум «Функциональные покрытия для повышения качества поверхностей изделий машиностроения». Украина, Харьков. 24-28 апреля,2006.
4. Н.К. Гальченко, С.И. Белюк, К.А. Колесникова, В.Е. Панин, Лепанова О.К. Структура и триботехнические свойства боридных покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой.//Физическая мезомеханика.-8.- Спец выпуск.-2005.-С.133-136.
5. Гальченко Н.К., Дампилов Б.В., Самарцев В.П., Белюк С.И. Формирование структуры и свойств композиционных литых покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой в вакууме. //Литейщик России.- 2002. -№2.- С.38-41.