

Омельченко Л.В.

Харьковский национальный
технический университет
сельского хозяйства
имени П. Василенко,
г. Харьков, Украина,
E-mail: lgvv@ukr.net.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ И МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

УДК 621.791.927

Известно, что модифицирование больших масс жидкого металла различными присадками существенно повышает качество изделий и их эксплуатационную стойкость.

Реже такие присадки используют при восстановительных наплавках, компенсирующих износившейся слой деталей в эксплуатации. Это связано с тем, что из-за нанесения малого слоя, компенсирующего износ, широко используемые модификаторы из-за условий быстрой кристаллизации не успевают раствориться в жидкой фазе и, кроме того, концентрируясь в различных зонах покрытия способствует снижению качества и потребительских свойств изделий.

В представленной статье проведен анализ работ применения модифицирования и микролегирования восстановительных покрытий. Он свидетельствует о высокой эффективности влияния модифицирующих присадок на качество восстановленной поверхности деталей из различных материалов и, работающих в отличающихся условиях (износа, повышенных температур, различных нагрузок). Однако многие применяемые композиции являются затратными. Поэтому, особенно важна перспективность исследований, направленных на снижение стоимости покрытий за счет использования вторичного сырья или отходов промышленного производства в качестве добавок-модификаторов.

Одним из таких направлений является применение для модифицирования детонационной шихты (впервые, использовали магнитную её составляющую). Для этого следует решить следующие задачи: определить оптимальный размер вводимой фракции; долю добавки; параметры и способ ввода и оценить особенности структурообразования для получения максимального эффекта обеспечения требуемого качества и свойств покрытия.

Ключевые слова: модифицирование, микролегирование, флюс, структура сварных швов, детонационная шихта, зольные отходы, микротвёрдость.

Актуальность проблемы. В представленной работе обобщена информация об использовании различных модифицирующих и микролегирующих присадок для повышения качества и упрочнения металла покрытий. При различных методах наплавки кристаллическое строение покрытия, связано с условиями перехода сварочной ванны из жидкого состояния в твердое, является одним из факторов, определяющих качество и свойства этого участка покрытия. [1]

Помимо естественных центров самопроизвольной кристаллизации расплавленного металла сварочной ванны, существуют центры несамопроизвольной кристаллизации в виде зерен нового металла на границе сплавления. [2]. На практике это явление используют для модифицирования и микролегирования восстанавливаемых покрытий для измельчения кристаллов при затвердевании, что приводит к изменению их механических свойств.

Изобретение академиком К.К.Хреновым керамического флюса стало первым шагом в легировании металла сварных швов, так в работе [3] было показано, что структура сварных швов деталей из стали 30ХГСА под керамическим флюсом, содержащем титан, имеет мелкозернистую разориентированную структуру, а шов, выполненный под плавленным флюсом крупнозернистую – транскристаллитную. Концерн «Фольксваген» реко-

мендует проводить микролегирование среднеуглеродистых сталей, применяемых для изготовления шатунов, вместо используемого ранее термоупрочнения. Это позволяет снизить стоимость шатуна на 38%, т. к. стоимость термообработки, из-за расхода энергоносителей, составляет до 25% от общей стоимости детали.

Анализ последних публикаций по данной проблеме. В работе [4] показано, что при микролегировании 0,27% ванадием роторной стали 25X2H2MФ наблюдается повышение её прочности и прокаливаемости. Микролегирование титаном (до 0,06) и бромом (до 0,0032%) стали 65Г при изготовлении лап культиваторов представленное в работе [5] привело к повышению прочности, твердости, пластичности и ударной вязкости рабочей поверхности металла, что позволило в 2,1 раза повысить их надежность и долговечность, на 20% износостойкость и на 17% снизить металлоемкость. Фазовый анализ показал, что повышение сопротивления стали износу, объясняется формированием карбонитридов титана и частично бора.

Механизм влияния микродобавок Ti, V, Nb на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей рассмотрен в работе [6]. Повышение прочности стали микродобавками Ti, V и Ni (до 0,1 %) с образованием дисперсных карбонитридов, являющиеся центрами кристаллизации, можно объяснить уменьшением размера зёрен. Повышение ударной вязкости и порога хладноломкости стали, обеспечивается рафинированием феррита при вводе микродобавок воздействием микродобавки 0,04% V. Это оказывает влияние на измельчение зерна феррита и уменьшение в структуре доли цементита и перлита.

Повышение предела текучести σ_T , авторы работы [7] объясняют увеличением дисперсности перлита (вклад его в повышение σ_T составляет до 60 – 65 %), σ_B до 30 %.

В работе [8] показано, что отливки из стали 110Г13Л с микродобавками V и Ti отличаются от серийной меньшей склонности к формированию дендритной структуры, отмечаются более высокой прочностью, вязкостью, плотностью и износостойкостью.

Анализ рассмотренных работ позволяет заключить, что легирующие микродобавки, растворимые в металле и не растворимые в нём, оказывают существенное влияние на условия кристаллизации. Они влияют на повышение устойчивости переохлаждённого аустенита прокаливаемости стали, измельчают зерно, повышают дисперсность перлита, замедляют падение твердости при отпуске, формирование мелкодисперсных включений способствует созданию локальных напряжений и увеличению плотности дислокаций, что тормозит их скольжение.

Такие механизмы воздействия микролегирующих и модифицирующих присадок обеспечивают необходимые потребительские свойства изделий.

Актуальность применения микролегирования и модифицирования для повышения качества наплавленного слоя подтверждает ряд новых научных разработок в этой области. Так, в работе [9] представлены исследования по введению 1-3% Ва в электродное покрытие. Авторы отмечают, что такое модифицирование обеспечивает высокую трещиностойкость сварных соединений, такой метод эффективен как для использования в условиях воздушной среды, так и в коррозионно-агрессивных.

Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама по данным [10] способствует перераспределению компонентов между границами и объёмами зёрен. Уменьшение размера зёрен обеспечивает повышение пределов текучести и прочности, пластичности и деформируемости стали, а также снижает коэффициент трения в процессе эксплуатации деталей.

При сварке жаропрочных никелевых сплавов для повышения свойств металла шва в работе [11] приведены результаты применения дисперсного инокулятора – карбонитрида титана. При исследовании микроструктуры модифицированного шва выявлено, что карбиды имеют компактную форму и расположены они в большей мере по границам

зёрен, что и является упрочняемым фактором при эксплуатации в условиях, где требуется повышенная жаропрочность.

В работе [12] рассмотрена технология применения наноматериалов при высокотемпературной обработке никельхромовых сплавов при электрошлаковом литье и электрошлаковой сварке.

Для получения сварочного шва с существенно улучшенными прочностными характеристиками в работе [13] представлена технология лазерной сварки с введением в шов порошка тугоплавкого соединения карбида или нитрида титана, с наноразмерными частицами. Отмечено, что в этом случае уменьшается размер неметаллических включений, повышаются механические свойства (σ_T , σ_B), возрастает в несколько раз относительное удлинение.

Процесс лазерной сварки с применением наномодификаторов в виде смеси нанопорошков тугоплавких соединений TiN, TiC, Y₂O₃ представлена в работе [14]. Композиция наносилась в виде суспензии на поверхность свариваемых пластин. Она позволила повысить скорость сварки при той же мощности луча за счет увеличения коэффициента поглощения интенсивности лазерного излучения.

Лазерная сварка стали с титановым сплавом также рассмотрена в работе [15]. Проведены эксперименты, во время которых использовали коррозионностойкую сталь и титановый сплав с промежуточными вставками, также сварочное соединение с вставкой на основе меди М1, которые обладают достаточно высокой прочностью.

В работе [16] приведены элементы-модификаторы (табл.1.), которые рекомендовано применять в составе функциональных покрытий для улучшения процесса сварки, свойств и структуры наплавленного металла.

В работе [17] отмечается, что к перспективным сварочным материалам относится порошковая проволока, позволяющая микролегировать и модифицировать металл шва в широких пределах.

Получению сварочного соединения с высокой ударной вязкостью посвящена работа [18]. Условием для получения такого соединения, является достижение определенного баланса между титаном, бором, кислородом и азотом, а также активными раскислительными элементами.

Таблица 1.

Состав функциональных покрытий, улучшающих процесс сварки

Элемент	Плотность г/см ³	Атомная масса	Температура плавления °С	Температура кипения °С
Магний	1,74	24,3	651	1107
Кальций	1,55	40,1	848	1487
Стронций	2,6	87,6	769	1384
Барий	3,5	137,3	725	1637
Лантан	6,19	138,9	920	3469
Церий	6,7	140,1	795	3424
Прозеодим	6,78	140,9	935	3127

Микролегирование сварочного соединения порошковой проволокой, установленной на одной дуге при многодуговой сварке рассмотрено в работе [19]. Эксперимент проводили с использованием двух марок проволоки сплошного сечения и трех марок металлопорошковой проволоки, представленных в табл 2. При этом порошковую проволоку использовали на второй дуге в многодуговом сварочном процессе.

Использование в многодуговом сварочном процессе таких порошковых проволок позволило снизить в соединениях С-1 – С-5 погонную энергию сварки внутренних и наружных швов на 8-12%.

Сочетание сварочных материалов.

Условный № соединения	Сочетание сварочных проволок	Марка флюса
C-1	S ₂ Mo	ФСА ЧТ А 650-20/80
C-2	S ₂ Mo+S ₃ TiB	
C-3	S ₂ Mo+S ₃ TiB+Fluxocord 35 25 3D	
C-4	S ₂ Mo+S ₃ TiB+Power Pipe 3D-Ni	
C-5	S ₂ Mo+S ₃ TiB+Power Pipe 3D-Ni	

Результаты химического анализа шва, металлографических исследований и механические испытания представлены в табл. 3,4.

Таблица 3.

Химический состав металла швов сварочных соединений

Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	P	S	Ni	V	Mo	Ti	Nb	B
C1	0,075	1,54	0,10	0,013	0,003	0,14	0,01	0,27	0,009	0,03	-
C2	0,07	1,58	0,28	0,015	0,004	0,13	0,02	0,19	0,025	0,04	0,0024
C3	0,06	1,69	0,31	0,010	0,003	0,12	0,02	0,22	0,030	0,03	0,0024
C4	0,07	1,58	0,27	0,011	0,003	0,59	0,02	0,25	0,025	0,03	0,0025
C5	0,07	1,72	0,39	0,011	0,004	0,82	0,018	0,25	0,018	0,03	0,0015

Представленные в табл. 3 результаты свидетельствуют о достаточно близком химическом составе всех сварочных соединений, за исключением соединений C-4 и C-5, у которых несколько повышено содержание никеля.

Таблица 4.

Механические свойства сварных швов

Условный № образца	Предел текучести МПа	Предел прочности МПа	Относительное удлинение, %
C-1	560	640	22,0
C-2	620	690	23,0
C-3	620	710	23,5
C-4	650	720	25,0
C-5	640	710	23,5

Полученные данные показывают, что предел прочности металла шва микролегированного молибденом находится ниже границы нормативных требований для сварочных соединений из сталей требуемого класса прочности, а многокомпонентное, микролегирование молибденом, титаном, бромом и никелем позволяет повысить прочностные свойства металла шва.

Из данных табл.5 видно, что при микролегировании сварочных соединений только молибденом не удается достичь требуемого показателя ударной вязкости (не менее 70 Дж/см²), а дополнительное микролегирование титаном, бромом и никелем позволяет значительно повысить эту характеристику.

Внимания заслуживает работа [20] в которой предложено использовать детонационную шихту, полученную от утилизации боеприпасов, для модифицирования жидкого металла при восстановлении изделий наплавкой.

Такой поход к выбору модифицирующей присадки особенно важен, поскольку она содержит различные компоненты, а также нано- и микроалмазы и не требует больших затрат, так как является побочным продуктом.

Таблица 5.

Пластичность сталей сварного шва

№ образца	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , при температуре испытаний											
	Минус 40°С						Минус 60°С					
	Металл шва			Литейный сплав			Металл шва			Литейный сплав		
С-1	72	49	68	152	139	96	37	22	41	37	37	67
С-2	158	234	146	128	98	63	146	188	141	30	38	30
С-3	174	143	179	215	221	243	83	160	169	81	104	50
С-4	169	144	135	186	244	193	133	132	89	173	61	206
С-5	252	193	191	240	233	241	207	180	165	87	163	134

В работе [21] исследовали специальные методы введения вторичной шихты для модифицирования при восстановлении деталей наплавкой.

Проведенные исследования показали, что шихту, полученную методом детонации можно разделить по составу и фракции. Магнитная фракция, содержит оксиды железа и меди, а также углерод (нано- и микроалмазы, малую долю графита). Не магнитная содержит те же компоненты, но железо в виде порошка. Крупная фракция содержит в большей доле магнитную и в – меньшей не магнитную составляющую.

Химический состав детонационной шихты приведен на рис.1. Показано, большую долю не магнитной шихты составляет углерод. Известно, что алмазная фракция не плавится при температурах плавки электродуговым методом и такие включения изменяют условия кристаллизации, являясь микрохолодильниками.

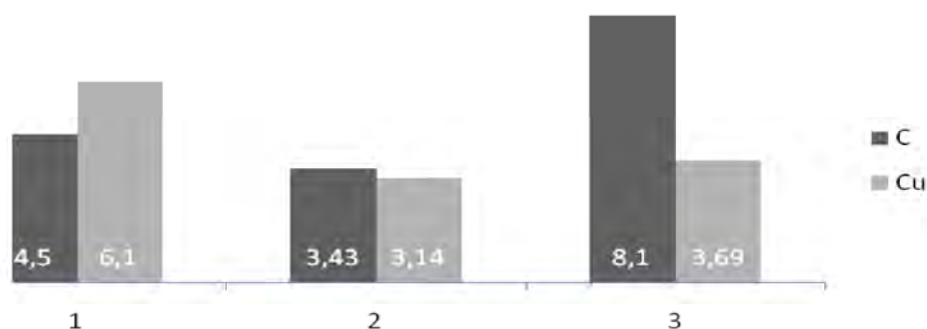


Рис.1 – Химический состав шихты утилизированных боеприпасов по содержанию C и Cu: 1 – магнитная фракция (крупная); 2 – мелкая магнитная фракция; 3 – не магнитная фракция.

Для использования такой шихты предложен новый метод, который заключается в предварительном разделении порошка на фракции, его просушивании, дроблении с последующим введением совместно с электродом или в виде шликерного покрытия с последующим расплавлением. Особый интерес представляет работа [22], в которой исследовались свойства покрытий, нанесённых с различной долей (от 5% до 20%) зольных отходов Змиевкой ГРЭС во флюс. Исследование структуры показало, что при увеличении доли зольных отходов во флюс (до 20%) значительно возросло количество неметаллических включений и пор, также увеличивается неоднородность, как по величине зерна, так и формируемому трооститу. Образец с 5% долей зольных отходов во флюс имеет меньшие размеры зёрен, чем покрытия с 10,15 и 20% добавками. Это наглядно подтверждает и анализ твердости полученных покрытий представленный на рис.2.

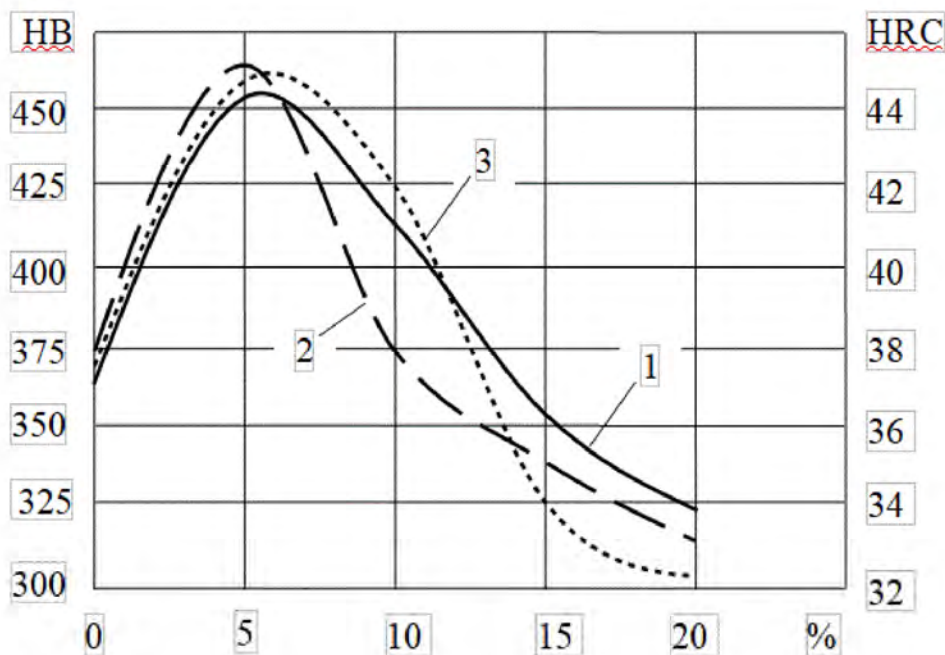


Рис. 2 – Залежність твёрдosti покриття от доли введенной добавки зольных отходов во флюсе:
 1 – HV ($d_{\text{шарика}} = 5 \text{ мм}$, при нагрузке 750 кг), 2 – HV ($d_{\text{шарика}} = 10 \text{ мм}$, при нагрузке 3000 кг), 3 HRC [22]

Значение твердости до 32 HRC, при доле зольных отходов во флюсе порядка 20%, что ниже уровня исходного покрытия (твердость покрытия без добавки 35 – 38 HRC), авторы связывают с формированием повышенной пористости в покрытии.

Результаты измерений микротвердости покрытия по глубине (табл.6) показывают, что характер изменений микротвердости между образцами аналогичен изменениям твердости, оцененной по HRC. Характер распределения микротвердости покрытия по глубине, в зависимости от доли золы во флюсе представлен на рис.3. Максимальное значение микротвердости имеет кривая 2, характеризующая покрытие с 5% зольной добавкой, а минимальное кривая 5 – с 20%.

Таблица 7

Распределение микротвёрдosti покриття по глубине наплавляемого слоя в зависимости от доли золы во флюсе [22].

№ п/п	% шлака	Расстояние от поверхности к середине, мм				
		0,05	1,0	2,0	3,0	4,0
1	Без шлака	322	298	337	440	238
2	5	433	402	456	518	240
3	10	375	326	378	472	243
4	15	304	262	283	374	236
5	20	280	256	262	357	237

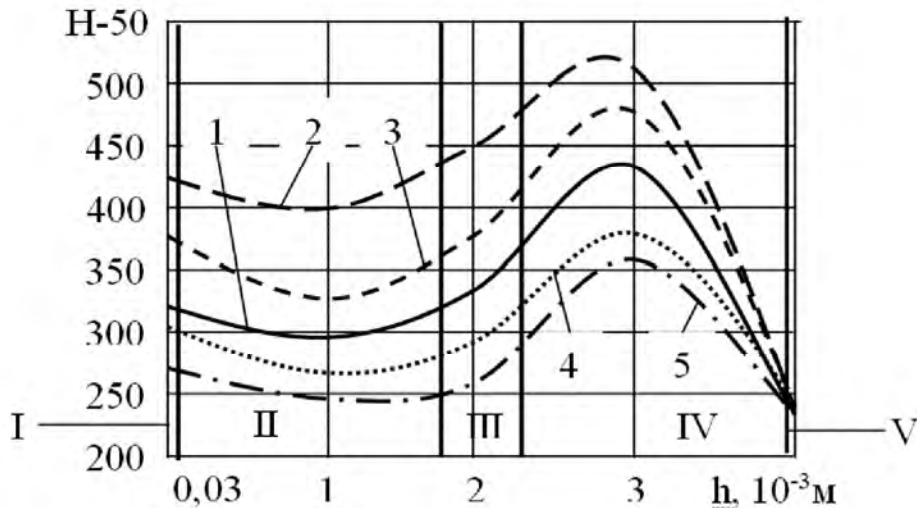


Рис.3 – Распределение микротвёрдости покрытия по глубине в зависимости от доли золи во флюсе: I – поверхность; II – рабочий слой; III – переходная зона; IV – зона термического влияния; V – основной металл. 1 – без добавки зольных отходов, 2 – 5% добавки, 3 – 10% добавки, 4 – 15% добавки, 5 – 20% добавки [22].

Проведенные исследования указывают на целесообразность введения 5-7% зольных отходов Змиевкой ГРЭС во флюс для покрытий, наносимых автоматической дуговой наплавкой, с целью уменьшения зерна, повышения твердости и прочности.

В работе [23] представлены технологии разработанные в институте электросварки им. Е.О. Патона по электрошлаковой переработке металлоотходов различных металлургических производств, которые могут использоваться в наплавочном производстве. Так, дополнительное легирование покрытия ванадием (0,1 — 0,15%) за счет восстановления его из зольных отходов ТЭС, подаваемых в шлак при электрошлаковой наплавке штампов стружкой стали 5ХНМ приводит к повышению их стойкости на 30%.

Приведенный анализ работ свидетельствует о высокой эффективности применения модифицирования и микролегирования восстановительных покрытий. Особенно важна перспективность исследований, направленных на снижение стоимости покрытий за счет использования вторичного сырья или отходов промышленного производства в качестве добавок-модификаторов.

Выводы.

1. Выполнен анализ влияния модифицированных присадок, которые обеспечивают повышение качества восстановленной поверхности деталей из различных материалов и, работающих в отличающихся условиях (износа, повышенных температур, различных нагрузок).

2. Многие применяемые композиции являются затратными. Вместе с тем показано, что эффективным для модифицирования может быть и не затратное вторичное сырьё. Это шлаки, зола и детонационная шихта. Впервые последняя была использована для заварки дефектов в чугунных изделиях и при восстановлении и упрочнении стальных изделий.

3. Учитывая, перспективность применения для модифицирования детонационной шихты планируется впервые в работе использовать магнитную её составляющую. Для этого следует решить следующие задачи: определить оптимальный размер вводимой фракции; долю добавки; параметры и способ ввода и оценить особенности структурообразования для получения максимального эффекта обеспечения требуемого качества и свойств покрытия.

Литература:

1. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков. – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с.
2. Соколов Г.Н., Лысак И.В., Трошков А.С., Зорин И.В., Горемыкина С.С., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама. // Физика и химия обработки материалов. 2009. №6. – С. 41-47.
3. Россошинский А.А. Металлография сварных швов / Россошинский А.А. –М.: «Машгиз», 1961. – 205 с.
4. Повышение качества стали 65Г путём микролегирования / [Быковских С.В., Ярошевская Е.С., Скороход Н.М., Еронец С.П.] // Сталь. – 1996. – № 5. – С. 12 – 14.
5. Борисов И.А. Влияние ванадия и других карбидообразующих элементов на свойства роторных сталей / И.А. Борисов // МИТОМ. – 1994. – № 10. – С. 33 – 35.
6. Матросов Ю.И. Механизм влияния микродобавок ванадия, ниобия и титана на структуру и свойства малоperlитных сталей / Ю.И. Матросов // МИТОМ – 1984. – № 11. – С. 13 – 21.
7. Рудюк С.И. Влияние микролегирования на структуру и механические свойства рельсовой стали / С.И. Рудюк, А.И. Савон, И.В Михайлова // МИТОМ – 1989. – № 6. – С49 – 52.
8. Влияние добавки Ti и V на свойства стали 110Г13Л / М.И. Курбатов, А.С. Носенко, Я.П. Проценко, Э.Г. Земка // МИТОМ. – 1990. – № 9. – С. 53 – 54.
9. Дерябин А.А., Цепелев В.С., Конашков В.В., Берестов В.Ю., Могильный В.В. Кинетическая вязкость рельсовой стали, модифицированной сплавами Fe-Si-Ca и Fe-Si-Ca-Va. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2008. - №4. с.3-6.
10. Соколов Г.Н., Лысак И.В., Трошков А.С., Зорин И.В., Горемыкина С.С., Самохин А.В., Алексеев А.Н., Цветков Ю.В. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама. // Физика и химия обработки материалов. – 2009. - №6 – с. 41-47.
11. Еремин Е.Н. Применение наночастиц тугоплавких соединений для повышения качества сварных соединений из жаропрочных сплавов. //Омский научный вестник. – 2009. - №3. – с.63-67.
12. Жеребцов С.А. Применение наноматериалов и высокотемпературной обработки никельхромовых сплавов при электрошлаковом литье: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новокузнецк, 2006. - 22с.
13. Наночастицы в каждый самолет // Наука и жизнь. – 2008. - №4. – с.8.
14. Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Маликов А.Г., Оришич А.М. О применении нанопорошков тугоплавких соединений при лазерной сварке и обработке металлов и сплавов // Тяжелое машиностроение. – 2008. - №4. – с.25-26.
15. Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Оришич А.М. Лазерная сварка стали с титановым сплавом с применением промежуточных вставок и нанопорошковых иногуляторов //Тяжелое машиностроение. – 2009. - № 8 – с.24-26.
16. Зубенко Л.Н. Применение модификаторов в составе функциональных покрытий. // Технологии и материалы. – 2015. - №2. – с.20-23.
17. Яковлев Д.С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой. / Д.С. Яковлев //Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2014. Вып.14. - №2. – с.92-95.
18. Файенберг Л.И. Микролегирование швов титаном и бромом при многодуговой сварке газонепроводных труб большого диаметра. / Л.И. Фаенберг, А.А. Рыбаков, А.Н. Алимов, Р. Розерт // Автоматическая сварка. – 2007. - №5. – с.20-25.
19. Яковлев Д.С., Шахматов М.В. Микролегирование сварочных соединений порошковой проволокой. // Технологии и материалы – 2015. - №2. – с.23-28.

20. Марков А.В. Утилизация боеприпасов для вторичного использования при производстве и восстановлении деталей / А.В. Марков // Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе». - Харьков, 2013. - №8. - С. 52-55.
21. Марков А.В. Использование вторичного сырья для модифицирования при восстановлении деталей наплавкой / А.В.Марков, Т.В. Мальцев // Матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів зварювання та споріднені технології 20-22 травня 2015 р. – Київ, 2015. - С. 112.
22. Т.С.Скобло, А.И. Сидашенко, А.Д. Мартыненко, Р.В. Ридный, Н.С. Пасько, А.К. Автухов Применение шлакообразующих примесей при производстве и реновации изделий. Харьков 2016 - 284с.
23. Разработка и внедрение технологии переработки ванадийсодержащих зольных остатков тепловых электростанций / Т.Ф. Жуковский, Н.П. Слотвинский-Сидак, Г.Г. Гаврилюк, Ю.А. Леконцев // Сталь. – 1991. – № 1. – С. 85 – 87.

Summary

Omelchenko L.V. Modification and micro-alloying restorative coatings

It is known that retrofitting of the large masses of liquid metal substantially improves quality of different additives and their operating firmness wares.

The presented article is devoted to the analysis of works on applying of modification and microalloying of reductive coatings. It speaks about high efficiency of influence of the modified additives on quality of the recovered details' surfaces from different materials and working in different terms (wear, enhanceable temperatures, different loading). However, a lot of used compositions are expensive. That is why potential of the researches directed to the cost coverages' decline, at the expense of using secondary raw material or wastes of industrial production as additions-modifiers is very important.

One of such directions is using of detonation charge (first, to use her magnetic constituent) for retrofitting. To be able to achieve the goal it is necessary to decide the next tasks: to define the optimal size of the entered faction; stake of addition; parameters and method of input and to estimate the features of gelation to get maximal effect of providing of the required quality and properties of coverage.

Keywords: *modification, micro-alloying, flux, structure of welded seams, detonation charge, ash waste, micro-hardness.*

References

1. Livshits L.S. Metallovedeniye dlya svarshchikov. - M.: Mashinostroyeniye, 1979. - 253 s.
2. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V., Goremykina S.S., Samokhin A.V., Alekseyev N.V., Tsvetkov YU.V. Modifitsirovaniye struktury naplavlennogo metalla nanodispersnymi karbidami vol'frama. // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2009. №6. - S. 41-47.
3. Rossoshinskiy A.A. Metallografiya svarnykh shvov / Rossoshinskiy A.A. -M.: «Mashgiz», 1961. - 205 s.
4. Povysheniye kachestva stali 65G putom mikrolegirovaniya // Stal'. - 1996. - № 5. - S. 12-14.
5. Borisov I.A. Vliyaniye vanadiya i drugikh karbidoobrazuyushchikh elementov na svoystva rotornykh staley / I.A. Borisov // MITOM. - 1994. - № 10. - S. 33 - 35.
6. Matrosov YU.I. Mekhanizm vliyaniya mikroobavok vanadiya, niobiya i titana na strukturu i svoystva maloperlitnykh staley / YU.I. Matrosov // MITOM - 1984. - № 11. - S. 13-21.

7. Rudyuk S.I. Vliyaniye mikrolegirovaniya na strukturu i mekhanicheskiye svoystva rel'sovoy stali / S.I. Rudyuk, A.I. Savon, I.V. Mikhaylova // MITOM - 1989. - № 6. - S49 - 52.
8. Vliyaniye dobavki Ti i V na svoystva stali 110G13L / M.I. Kurbatov, A.S. Nosenko, YA.P. Protsenko, E.G. Zemka // MITOM. - 1990. - № 9. - S. 53 - 54.
9. Deryabin A.A., Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Berestov V.YU., Mogil'nyy V.V. Kinetichesкая vyazkost' rel'sovoy stali, modifitsirovannoy splavami Fe-Si-Ca i Fe-Si-Ca-Ba. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya. - 2008. - №4. s.3-6.
10. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V., Goremykina S.S., Samokhin A.V., Alekseyev A.N., Tsvetkov YU.V. Modifitsirovaniye struktury naplavlennogo metalla nanodispersnymi karbidami vol'frama. // Fizika i khimiya obrabotki materialov. - 2009. - №6 - s. 41-47.
11. Yeremin Ye.N. Primeneniye nanochastits tugoplavkikh soyedineniy dlya povysheniya kachestva svarnykh soyedineniy iz zharoprochnykh splavov. // Omskiy nauchnyy vestnik. - 2009. - №3. - s.63-67
12. Zherebtsov S.A. Primeneniye nanomaterialov i vysokotemperaturnoy obrabotki nikel'khromovykh splavov pri elektroshlakovom lit'ye: avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. - Novokuznetsk, 2006.- 22s.
13. Nanochastitsy v kazhdom samolete // Nauka i zhizn'. - 2008. - №4. - s.8.
14. Cherepanov A.N., Afonin YU.V., Malikov A.G., Orishich A.M. O primenenii nanoporoshkov tugoplavkikh soyedineniy pri lazernoy svarke i obrabotke metallov i splavov // Tya-zheloye mashinostroyeniye. - 2008. - №4. - s.25-26.
15. Cherepanov A.N., Afonin YU.V., Orishich A.M. Lazernaya svarka s titanovym splavom s primeneniyem promezhutochnykh vstavok i nanoporoshkovykh inogulyatorov // Tya-zheloye mashinostroyeniye. - 2009. - № 8 - s.24-26.
16. Zubenko L.N. Primeneniye modifikatorov v sostave funktsional'nykh pokrytiy. // Tekhnologii i materialy. - 2015. - №2. - s.20-23.
17. Yakovlev D.S. Analiz tekhnologicheskikh osobennostey svarki poroshkovoy provolokoy. / D.S. Yakovlev // Vestnik YUUrGU. Seriya «Metallurgiya». - 2014. Vyp.14. - №2. - s.92-95
18. Fayenberg L.I. Mikrolegirovaniye shvov titanom i bromom pri mnogodugovoy svarke gazonefteprovodnykh trub bol'shogo diametra. / L.I. Fayenberg, A.A. Rybakov, A.N. Alimov, R. Rozert // Avtomaticheskaya svarka. - 2007. - №5. - s.20-25.
19. Yakovlev D.S., Shakhmatov M.V. Mikrolegirovaniye svarochnykh soyedineniy poroshkovoy provolokoy. // Tekhnologii i materialy - 2015. - №2. - s.23-28
20. Markov A.V. Utilizatsiya boyepripasov dlya vtorichnogo ispol'zovaniya pri proizvodstve i vosstanovlenii detaley / A.V. Markov // Informatsionno-analiticheskiy mezhdunarodnyy tekhnicheskij zhurnal «Promyshlennost' v fokuse». - Khar'kov, 2013. - №8. - S. 52-55
21. Markov A.V. Ispol'zovaniye vtorichnogo syr'ya dlya modifitsirovaniya pri vosstanovlenii detaley naplavlkooy / A.V. Markov, T.V. Mal'tsev // Materiali VIII Mízhnarodnoí konferentsii molodikh uchenik i spetsialistiv zvaryuvannya ta sporidneni tekhnologii 20-22 travnya 2015 r. - Kiiv, 2015g. - S. 112.
22. T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.D. Martynenko, R.V. Ridnyy, N.S. Pas'ko, A.K. Avtukhov Primeneniye shlakoobrazuyushchikh primesey pri proizvodstve i renovatsii izdeliy. Khar'kov 2016 - 284s
23. Razrabotka i vnedreniye tekhnologii pererabotki vanadiysoderzhashchikh zol'nykh ostatkov teplovykh elektrostantsiy / T.F. Zhukovskiy, N.P. Slotvinskiy-Sidak, G.G. Gavrilyuk, YU.A. Lekontsev // Stal'. - 1991. - № 1. - S. 85 - 87.