

ИННОВАЦИОННЫЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ (ДДМП)

Ресурсосбережение - важная проблема для промышленности. Одним из направлений ее решения является повышение долговечности сменнозапасных деталей оборудования и инструментов электродуговой наплавкой. Многие наплавочные материалы, применяемые для этого, зачастую содержат дорогие легирующие элементы - никель, кобальт, вольфрам и др. В связи с этим, актуальна задача разработки и внедрения в производство экономнолегированных наплавочных материалов, существенно повышающих эксплуатационную стойкость деталей и инструментов, и за счет этого реализующих энерго- и ресурсосбережение.

В работах [1-3] авторами развивается инновационное научно-прикладное направление по созданию ресурсосберегающих материалов и упрочняющих технологий, обеспечивающих получение многофазной метастабильной, управляемо самотрансформирующейся структуры. Химический состав подбирается так, чтобы в качестве основных использовались сравнительно недорогие легирующие элементы - углерод, марганец, хром, кремний. Дополнительно могут быть введены титан, ванадий, ниобий, азот. Должна быть получена структура, состоящая из мартенсита и/или бейнита, карбидов, карбонитридов, других твердых фаз. При этом обязательно присутствие в структуре метастабильного аустенита, претерпевающего при нагружении ДДМП. В ряде случаев основной структурой является метастабильный аустенит при отсутствии или небольшом количестве других структурных составляющих. Количественное их соотношение и интенсивность ДДМП определяются условиями нагружения и должны регулироваться с их учетом. Метастабильная структура позволяет материалам, подобно биологическим объектам, приспосабливаться в процессе эксплуатации к внешним нагрузкам за счёт различных структурных (диспергирование составляющих, изменение плотности дислокаций, двойникование) и фазовых превращений, прежде всего, образования под их влиянием мартенсита. В ряде зарубежных работ также рассматривается необходимость получения в структуре метастабильного аустенита для повышения их механических свойств [4-6].

Впервые идея создания сталей с метастабильным аустенитом была высказана и реализована еще в середине 50-х годов прошлого века И.Н. Богачевым и Р.И. Минцем [7-8] применительно к деталям, подвергавшимся кавитационному разрушению, а затем и к деталям, работающим в условиях контактно-усталостного нагружения [9]. Ими была разработана хромомарганцевая сталь 30X10Г10. На ее основе в отраслевой лабораторией УПИ им. С.М. Кирова под руководством М.И. Разикова были созданы электроды УПИ 30X10Г10 и порошковая проволока ПП-30X11Г12Т [10]. Наряду с очень высокими эксплуатационными свойствами, обеспечиваемыми ими, имеет место ряд недостатков. К ним относятся: технологические особенности наплавки и трудная обрабатываемость резанием наплавленного металла [11], что существенно ограничило применение ранее разработанных наплавочных материалов. На предприятиях Украины они практически не используются.

Целью работы является обобщение результатов ранее выполненных и новых исследований по созданию и эффективному применению в промышленности технологичных наплавочных материалов на Fe-Cr- Mn-C и Fe-Mn-C основах, обеспечивающих получение в наплавленном металле структуры, в которой наряду с другими составляющими присутствует метастабильный аустенит. Последний должен претерпевать при нагружении в процессе испытаний или эксплуатации ДДМП (эффект самозакалки при нагружении.)

Для проведения исследований изготавливали однозамковые порошковые ленты сечением 3x10 мм или проволоку диаметром 3,8 мм с оболочкой из стали 08кп, имеющей толщину 0,3 мм. Сердечник состоял из смеси порошковых компонентов. В ряде случаев изготавливали проволоку сплошного сечения. Наплавку опытных образцов для испытания свойств и определения фазового состава выполняли в 3 слоя на пластины толщиной 30 мм из стали ВСтЗсп под флюсом АН-26 или «RECORD SK EN-760» Наплавка порошковыми лентами проводилась на режиме: сила тока (I)=450-600 А, напряжение (U)=30-32 В, скорость наплавки (V)=25 м/ч, а проволоками: I=300-350 А, U=28-32, V=35 м/ч.

Проводили дюрOMETрические, металлографические исследования. Химический анализ наплавленного металла выполнялся оптико-эмиссионным искровым спектрометром «Срестромах».

Фазовый состав наплавленного металла определяли методом рентгеновского анализа с использованием дифрактометра ДРОН-4. Оценивалась износостойкость при сухом трении, абразивном и ударно-абразивном воздействии.

На основе развиваемой концепции ПГТУ совместно с ОАО «Азовмаш» разработаны порошковые ленты ПЛ-Нп-(10-15)X13AG10MFC (ПЛН-4) [12].

Исследования, выполненные в работе [13], показали, что в условиях трения скольжения при относительно невысоких скоростях (0,13 м/с) и отсутствии или небольшом разогреве трущихся поверхностей интенсивное динамическое деформационное мартенситное превращение играет существенную роль в повышении износостойкости. В случае испытаний с повышенной скоростью скольжения (0,98 м/с, давление 320 МПа) интенсивность мартенситного превращения при трении снижается из-за повышения температуры рабочей поверхности. В этих условиях износостойкость наплавленного металла в большей степени определяется способностью к упрочнению самого аустенита и его динамическому старению. Это в основном зависит от содержания углерода в наплавленном металле, что подтверждают данные табл. 1.

Таблица 1
Влияние углерода в наплавленном металле типа X13AG10MFC на количество мартенсита деформации и относительную износостойкость [13]

Массовая доля углерода, %	v = 0,13 м/с		v = 0,98 м/с	
	Количество мартенсита деформации, %	Относительная износостойкость	Количество мартенсита деформации, %	Относительная износостойкость
0,10	28	4,2	10	3,1
0,15	19	3,8	5	4,8
0,20	12	3,3	-	5,5

Температура нагрева наплавленного металла при термообработке (450-650 °С), проводимой для уменьшения внутренних напряжений, неоднозначно влияет на его износостойкость. При испытаниях в условиях трения скольжения (относительно небольшие скорости), а также трения качения установлено, что нагрев на 350 °С (1 ч) снижает износостойкость наплавленного металла приблизительно на 30 %, а нагрев на 650 °С — повышает ее примерно на 40 % по сравнению с закаленным состоянием. Это обусловлено тем, что в первом случае аустенит стабилизируется по отношению к деформационному мартенситному превращению, а во втором — дестабилизируется в связи с выделением карбидов и карбонитридов. В последнем случае положительную роль играют дисперсные частицы фаз выделения.

Установлено, что в условиях трения, не приводящего к значительному разогреву контактирующих поверхностей, предварительная холодная пластическая

деформация повышает износостойкость наплавленного металла за счет активизации ДДМП.

В условиях трения, сопровождающегося значительным повышением температуры (более 450 °С), предварительная холодная деформация снижает износостойкость наплавленного металла. Это обусловлено переходом образовавшегося при деформации мартенсита в аустенит, что снижает сопротивление металла пластической деформации. Наплавка разработанными порошковыми лентами обеспечивает стабильное горение дуги, хорошее формирование наплавленного валика и отделимость шлаковой корки.

В ПГТУ разработаны совместно с «Отраслевой лабораторией наплавки» Минчермета Украины порошковая проволока ПП-Нп-12Х12Г12СФ [14], а с «УкрНИИ Спецсталь» - проволока сплошного сечения Св-14Х14Г12Ф [15], близкие по принципу легирования рассмотренной выше порошковой ленте ПЛН-4

(ПЛ-Нп-15Х13АГ10МФС). Эти материалы позволили в несколько раз повысить долговечность быстроизнашивающихся деталей. Применительно к условиям наплавки крановых колес ПАО «ММК им. Ильича» ПГТУ совместно с ООО

«ТМ. ВЕЛТЕК» разработана новая порошковая проволока. ВЕЛТЕК Н-285-С [16]. Технология наплавки новой порошковой проволокой не отличается от применяемой на предприятиях. Используются флюсы АН-26 или «RECORD SK EN-760». Обеспечивается хорошее формирование и соединение слоев наплавленного металла между собой, а также с основным металлом. Отсутствуют непровар, шлаковые включения и трещины. В случае изготовления деталей из нелегированных сталей, содержащих 0,35-0,45 % С, наплавка может проводиться без предварительного подогрева. Оптимальным режимом её проведения при диаметре \varnothing 3,6 мм является следующий: $I = 350-400$ А, $U = 35-40$ В, $V = 40-45$ м/час. Используются флюсы АН-26 или «RECORD SK EN-760». При этом обеспечивается хорошее формирование и соединение слоев наплавленного металла между собой, а также с основным металлом. Отсутствуют непровар, шлаковые включения и трещины (рис. 1).



Рис.1. Макроструктура наплавленного и основного металла при использовании новой порошковой проволоки, х 16

Отделимость шлаковой корки хорошая. Слои наплавленного металла имеют аустенитную структуру с дисперсными карбидами, располагающимися внутри зерен. Вблизи линии сплавления в основном металле (сталь 65Г) обнаруживается обезуглероженная зона (рис. 2), что обусловлено диффузией углерода в наплавленный металл, имеющий его значительно меньшее количество, чем сталь, на которую осуществлялась наплавка. Использование разработанной проволоки обеспечивает получение структуры метастабильного сильно упрочняющегося при наклёпе аустенита. В нём после отжига при 600 °С, применяемого для снятия внутренних напряжений, обнаруживается множество дисперсных карбидов. Результатом этого является его обеднение углеродом и легирующими элементами, вследствие чего интенсифицируется ДДМП, что и приводит к существенному повышению износостойкости. Это подтверждают данные рентгеновского анализа, согласно которым количество мартенсита деформации на изнашиваемой поверхности после отжига наплавленного металла в 1,5 раза больше, чем без него, и составляет 30-35 %. Твердость вблизи поверхности наплавленного металла составляет НВ 217-220, в средней части НВ 230-240, а у переходной зоны возрастает до НВ 280-300. По данным лабораторных испытаний износостойкость металла, наплавленного разработанной порошковой проволокой, при трении скольжения по схеме колодка-

ролик и абразивном воздействии значительно превышает таковую при использовании проволок ПП-Нп-18Х1Г1М, Нп-12Х13 и Св-06Х18Н9Т (табл. 2) [17].

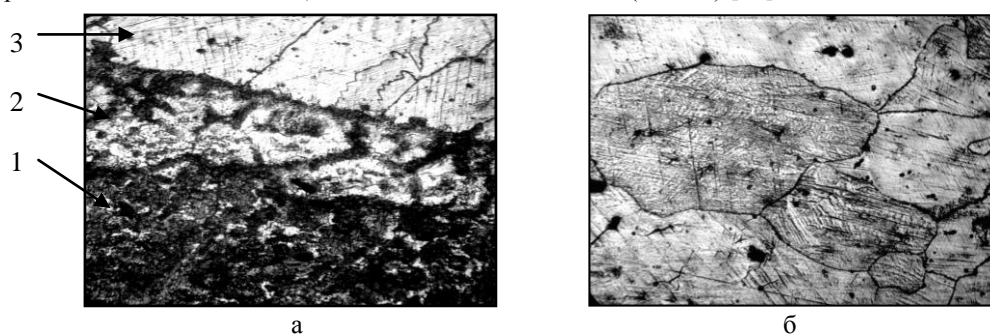


Рис. 2. Микроструктура металла, наплавленного проволокой ВЕЛТЕК 285-С, $\times 550$
 а – структура основного металла и переходного слоя:
 1 – основной металл – троостит;
 2 - переходный слой - аустенит с трооститной сеткой;
 3 - наплавленный аустенитный слой.
 б – аустенитная структура поверхностного слоя

Таблица 2

Относительная износостойкость металла, наплавленного проволоками ПП-Нп 18Х1Г1М (1), Св-12Х13 (2), Св-06Х18Н9Т (3) и разработанной порошковой проволокой ВЕЛТЕК 285-С [16]

№ п/п.	Наплавочный материал	Режим термообработки	Относительная абразивная износостойкость	Относительная износостойкость в условиях сухого трения
1	ПП-Нп-18Х1Г1М	Наплавка + отжиг 550 °С (1 ч)	1,0	1,0
2	Св-12Х13	Наплавка + отжиг 550 °С (1 ч)	1,2	1,3
3	Св-06Х18Н9Т	Наплавка + отжиг 550 °С (1 ч)	0,6	0,7
4	Разработанная порошковая проволока	Наплавка + отжиг 600 °С (1 ч)	2,3	3,2

Длительные промышленные испытания крановых колёс, наплавленных разработанной порошковой проволокой, обеспечивающей эффект самозакалки при эксплуатации, подтвердили результаты лабораторных исследований и показали увеличение долговечности этих деталей более, чем в 5 раз, по сравнению с колёсами, восстановленными применяемой в промышленности проволокой ПП-Нп-18Х1Г1М.

Определение твёрдости рабочей поверхности колёс, наплавленных новой порошковой проволокой, показало, что она в процессе эксплуатации возросла с 217-220 до 450-470 НВ. Это свидетельствует о реализации эффекта самозакалки в наплавленном металле в процессе работы колёс, что и обеспечивает им повышенную долговечность. При этом важно подчеркнуть, что не происходит повышенный износ рельсов, которого опасаются эксплуатационники при увеличении износостойкости крановых колёс. Проведение механической обработки восстановленных новой порошковой проволокой крановых колёс с использованием инструмента, оснащённого твёрдыми сплавами, не вызывает каких-либо технических трудностей.

Однако наплавленный металл обрабатывается труднее, чем при использовании известной проволоки ПП-Нп-18Х1Г1М. По обрабатываемости он близок к таковому, наплавленному известной проволокой Св-06Х18Н9Т. Разработанный наплавочный материал может иметь широкий спектр применения. Его следует использовать не только для восстановления крановых колёс, но и колёс железнодорожного подвижного состава предприятий, вагонеток, различного рода роликов и других быстроизнашивающихся деталей. При этом значительно снижаются затраты на ремонт оборудования.

Важно подчеркнуть, что при этом не происходит повышенного износа рельсов, которого обычно опасаются при наплавке крановых колёс износостойкими материалами. Такой результат обусловлен образованием на поверхности трения окисной пленки, снижающей коэффициент трения. Разработанная порошковая проволока имеет большой спектр использования и может быть рекомендована для повышения долговечности различных деталей: опорных роликов, шкивов, цапф сталеразливочных ковшей, деталей, подвергающихся кавитационному и коррозионному воздействию среды, износу при сухом трении, в том числе, в условиях температур (650-750 °С). Новая порошковая проволока внедрена в производство и позволила получить значительный ресурсосберегающий эффект.

Применение малоуглеродистого хромомарганцевого наплавочного материала целесообразно и для некоторых деталей, работающих при температурах 600-700 °С, что установлено при использовании порошковой проволоки ПП-35ЖН, обеспечивающей получение наплавленного металла марки 10Х13Г12АФСЮР [17]. В табл. 3 приведены сравнительные данные износо- и термостойкости, а также твердости при 20 и 600 °С для металла, наплавленного ПП-35ЖН и Св-08Х21Н10Г6. Полученные результаты свидетельствуют о том, что последний значительно уступает безникелевому (см. табл. 2). Анализ стойкости валков пилигримовых станков в условиях ОАО «МК им. Ильича», длительное время наплавлявшихся проволокой ПП-35ЖН, показал, что их долговечность возросла в 1,40... 1,65 раза по сравнению с валками, наплавленными проволокой Св-08Х21Н10Г6 [17]. Можно полагать, что применение хромомарганцевых наплавочных материалов эффективно для повышения долговечности и других инструментов горячего деформирования, работающих в условиях, аналогичных таковым для валков пилигримовых станков.

Таблица 3

Свойства металла, наплавленного проволоками ПП-Нп 10Х13Г12АФСЮР и Св-08Х21Н10Г6 [17]

Тип наплавленного металла	Износ при 600 °С и давлении 15 МПа (время испытания 1ч), мг	Термостойкость (количество циклов «нагрев-охлаждение» до появления трещин)	Твердость HRB при температурах 20 и 600 °С	
			20	600
1013Г12АФСЮ	4,2 - 7,4	930 - 1080	100-110	80-89
08Х21Н10Г6	23,9 - 29,7	440 - 620	82-88	66-73

Для восстановления деталей, работающих в условиях сухого трения и отсутствия заметного влияния коррозионной среды, разработана порошковая лента ПЛ-Нп-20Г14АФ [18]. Износостойкость наплавленного ею металла находится примерно на том же уровне, что и у металла, наплавленного более дорогой лентой ПЛН-4. Необходимо отметить, что наряду с высокой износостойкостью, наплавленный металл марки 20Г14АФ обеспечивает низкий износ контртела, изготовленного из рельсовой стали, что очень важно в условиях эксплуатации крановых колёс. Порошковая лента ПЛ-Нп-20Г14АФ применялась в ОАО «Азовмаш» для наплавки ходовых колёс мостовых кранов вместо проволоки Св-30ХГСА и показала высокую эффективность.

Представляет большой интерес группа новых малоуглеродистых (0,12-0,18 % C) наплавочных материалов на хромомарганцевой основе, создающих в наплавленном металле бейнитную структуру с небольшим количеством метастабильного аустанита. Такой наплавленный металл при экономном легировании (суммарное содержание хрома и марганца не превышает 4 %) имеет более высокую износостойкость, чем получаемый при наплавке широко применяемой порошковой проволокой ПП-Нп-18Х1Г1М, содержащей дорогой молибден.

Перспективна разработка экономнолегированных технологичных наплавочных материалов, обеспечивающих получение в наплавленном металле структуры малоуглеродистого марганцевого (7-8 % Mn) мартенсита (эффект самозакалки при охлаждении). Они могут быть дополнительно легированы Cr (3-4 %) и небольшим количеством Ti, Nb, V для получения мелкозернистой структуры и повышения износостойкости за счет образования карбидов высокой твердости [19]. Особенностью малоуглеродистых марганцевых наплавочных материалов является то, что после проведения отпуска при 600-650 °С, обычно применяемого для снятия внутренних напряжений, в наплавленном металле образуется метастабильный аустенит, что является следствием перераспределения углерода и марганца между α - и γ -фазами, и обогащения последней этими элементами. Важно подчеркнуть, что, несмотря на снижение твердости наплавленного металла после отпуска, абразивная износостойкость возрастает. Это является следствием реализации ДДМП в процессе изнашивания. Рассматриваемые материалы являются примером того, как благодаря определенному подбору химического состава, традиционно проводимая для снятия внутренних напряжений термообработка не снижает, как это обычно бывает, а, напротив, повышает износостойкость наплавленного металла.

Новыми являются малоуглеродистые хромомарганцевые наплавочные материалы, создающие в наплавленном металле мартенситно-аустенитную структуру. По разгаро-, коррозионной и износостойкости он не уступает таковому при использовании хромоникелевых аналогов. Получение в наплавленном металле метастабильного аустенита наряду с мартенситом повышает сопротивление образованию трещин при наплавке, а также износостойкость [20].

ВЫВОДЫ

1. На основании обобщения большого количества экспериментальных данных и результатов эксплуатационной проверки показана большая перспективность создания и промышленного применения наплавочных материалов различных структурных классов на Fe-Cr-Mn-C и Fe-Mn-C основах.

2. Необходимо получение в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита (в ряде случаев наряду с бейнитом и мартенситом), армированного упрочняющими фазами. Это позволяет реализовать эффект самозакалки при нагружении за счет протекания ДДМП и использовать внутренний ресурс самого материала. При этом в зависимости от условий нагружения необходимо регулировать количество аустенита и его стабильность.

3. Широкое применение в промышленности разработанных наплавочных материалов, позволяющих получить в экономнолегированном наплавленном металле многофазную структуру с метастабильным аустенитом, позволит получить большой ресурсосберегающий эффект.

Перечень ссылок

1. *Малинов Л. С.* Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки: монография / *Л. С. Малинов, В. Л. Малинов.* – Мариуполь: Рената, 2009. – 568 с.

2. Малинов Л. С. Основные положения концепции создания экономнолегированных сплавов и упрочняющих технологий, в которых реализуется принцип получения многофазной, управляемо самотрансформирующейся структуры / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]: матеріали XII Всеукраїнської наук.-практ. конф. – К., 2014. – С. 626–638.
3. Малинов Л. С. Износостойкие марганцовистые стали с метастабильным аустенитом / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – № 2. – С. 19–25.
4. Vasilakos A. N. Low-alloy TRIP-steels: A correlation mechanical properties and the retained austenite stability / A. N. Vasilakos, J. Ohleri, G. Katerina // Steels. – 2002. – № 6-7. – P. 249–252.
5. Streicher A. M. Forming response of retained austenite in a C-Si-Mn high strength TRIP sheet steels / A. M. Streicher, J. G. Speer, D. K. Matlock // Steels. – 2002. – № 6-7. – P. 287–293.
6. Microstructure and wear property of Fe-Mn-Cr-Mo-V alloy cladding by submerged arc welding / Lu Shan-Ping [et al.] // J. Mater. Process. Technol. – 2004. – 147. – № 2. – С. 191–196.
7. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. – Свердловск: ГНТИ машиностр. лит., 1959. – 110 с.
8. Богачев И. Н. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. – М.: Машиностроение, 1964. – 142 с.
9. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы / И. Н. Богачев. – М.: Металлургия, 1972. – 189 с.
10. Разиков М. И. Сварка и наплавка кавитационной стали марки 30Х10Г10 / М. И. Разиков, В. П. Ильин. – М.: НИИМАШ, 1964. – 35 с.
11. Опыт совместных работ ОАО «Запорожсталь» и ОП «Реммаш» в разработке и внедрении новых наплавочных материалов / В. В. Тарасенко [и др.] // Сб. работ 2-ой научно-практической конференции «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей». Международный промышленный форум «УкрИндустрия-2006». - Днепропетровск, 2006. – С. 39-43.
12. А. с. 545436 СССР, кл.² В 23 к 35/368. Порошковая проволока, содержащая стальную оболочку и порошкообразную шихту / Л. С. Малинов [и др.]; заявитель и патентообладатель Жданов. металлург. ин-т, Жданов з-д тяжелого машиностроения. – № 2161880/27; заявл. 11.08.75; опубл. 05.02.77, Бюл. № 5.
13. Износостойкость дисперсионнотвердеющих сталей с нестабильным аустенитом / Л. С. Малинов [и др.] // Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в чер. металлургии : тез. докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. – Жданов, 1977. – С. 22–25.
14. Малинов Л. С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений : дис. ... докт. техн. наук : 05.16.01 : защищена 20.02.92 утв. 08.05.92 / Малинов Леонид Соломонович. – Екатеринбург, 1992. – 381 с.
15. Пат. 23408 А Україна, МПК⁵ С22С 38/38 (2006.01), С22С 38/12 (2006.01), С22С 38/02 (2006.01). Склад дроту для зносостійкої нашівки / Малинов Л. С. [та ін.]; заявитель и патентообладатель ПДТУ; Укр. держ. науково-дослідний ін-т спеціальних сталей, сплавів і феросплавів. – № 96072795; заявл. 12.07.96; опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5.
16. Новая порошковая проволока, обеспечивающая эффект деформационного упрочнения наплавленного металла при эксплуатации / Л. С. Малинов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2009. – № 5. – С. 46–48.
17. Повышение работоспособности валков пилигримовых станов наплавленных новой порошковой проволокой ПП-35ЖН / А. В. Ковальчук [и др.] // Сварочное пр-во. – 1984. – № 7. – С. 12–13.
18. Новый наплавочный материал системы С-Fe-Mn-V для повышения долговечности ходовых колес мостовых кранов / Л. С. Малинов [и др.] // Сварочное пр-во. – 1988. – № 9. – С. 18–20.

19. *Малинов В. Л.* Влияние марганца на структуру и износостойкость наплавленного металла типа низкоуглеродистой стали / *В. Л. Малинов* // Автоматическая сварка. – 2011. – № 8. – С. 15–19.

20. *Малинов В. Л.* Структура и износостойкость хромомарганцевого наплавленного металла / *В. Л. Малинов, Л. С. Малинов* // Автоматическая сварка. – 2012. – № 7. – С. 13–18.

Статья поступила 15.11.2014

Рецензент д.т.н. проф. А.Д.Размышляев