



## СТРУКТУРА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА 20Х5М2ФС, ЛЕГИРОВАННОГО СЕРОЙ И ФОСФОРОМ

**И. А. РЯБЦЕВ, Я. П. ЧЕРНЯК, И. И. РЯБЦЕВ**, кандидаты техн. наук,  
**В. А. ЖДАНОВ, И. Л. БОГАЙЧУК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние легирования серой и фосфором на структуру и износостойкость наплавленного металла 20Х5М2ФС. Установлено, что фосфор растворяется и упрочняет мартенситную составляющую структуры наплавленного металла, а сера образует с другими легирующими элементами сульфиды и оксисульфиды. Показано, что наиболее благоприятное сочетание износостойкости деталей пары трения обеспечивает наплавленный металл 20Х5М2ФС, легированный 0,21 мас. % S и 0,56 мас. % P.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, среднелегированный наплавленный металл, микроструктура, фосфор и сера в стали, износостойкость, сульфиды, фосфиды

Фосфор и сера по отдельности могут с успехом использоваться в качестве легирующих элементов в наплавочных материалах различного назначения [1–5]. При этом фосфор положительно влияет на износостойкость наплавленного металла в результате упрочнения матрицы, а также образования включений фосфидов некоторых легирующих элементов [6]. В отличие от фосфора сера не растворяется в железе [7], а образует в наплавленном металле сульфиды и оксисульфиды, которые могут играть роль «твердой смазки» и препятствовать его изнашиванию за счет схватывания поверхностей трения [5].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния совместного легирования серой и фосфором на структуру и износостойкость наплавленного металла 20Х5М2ФС. Для экспериментов изготовлено восемь опытных порошковых проволок ПП-Нп-20Х5М2ФС-оп диаметром 2 мм с различным содержанием серы и фосфора. На одинаковых режимах (ток 250...270 А; напряжение 24...26 В; скорость наплавки 28 м/ч) под флюсом АН-26П наплавляли образцы с целью определения химического состава и твердости наплавленного металла (табл. 1), а также его структуры (рис. 1) и износостойкости. При этом содержание серы и фосфора в наплавленном металле изменялось в пределах соответственно 0,02...1,40 и 0,06...0,97 мас. %.

Структура наплавленного металла 20Х5М2ФС, не легированного серой и фосфором (образец № 1, табл. 1), состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. Имеется также небольшая объемная доля неметаллических включений, идентифицированных как оксиды и сили-

каты (рис. 1, а). Микротвердость мартенсита  $HV_{0,5}$  3860...3620 МПа, остаточного аустенита  $HV_{0,5}$  2320...2460 МПа.

Возрастание массовой доли серы до 0,24 мас. % (образец № 2, табл. 1; рис. 1, б), а затем до 1,40 % (образец № 3, табл. 1; рис. 1, в) на структуру наплавленного металла практически не влияет, однако значительно увеличивает содержание в ней неметаллических включений за счет образования сульфидов и оксисульфидов.

Легирование наплавленного металла 20Х5М2ФС фосфором (0,50 мас. %) в образце № 4 (табл. 1) приводит к возрастанию в структуре наплавленного металла остаточного аустенита (рис. 1, г). Микротвердость мартенсита увеличивается до  $HV_{0,5}$  4120...5490 МПа, по-видимому, за счет растворения в нем фосфора, в то время как микротвердость аустенита остается на том же уровне —  $HV_{0,5}$  2320...2570 МПа. Обнаружены неметаллические включения — оксиды и силикаты.

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) и твердость  $HRC$  наплавленного металла типа 20Х5М2ФС, легированного серой и фосфором

№ образца	S	P	Остальные элементы	$HRC$
1	0,02	0,06	0,18...0,22 С 4,8...5,2 Сг 1,8...2,2 Мо 0,3...0,5 V	37...38
2	0,24	0,06		34...36
3	1,40	0,06		32...34
4	0,04	0,50		34...36
5	0,21	0,56		32...34
6	0,04	0,97		35...37
7	0,18	0,83		34...36
8	1,30	0,90		34...36

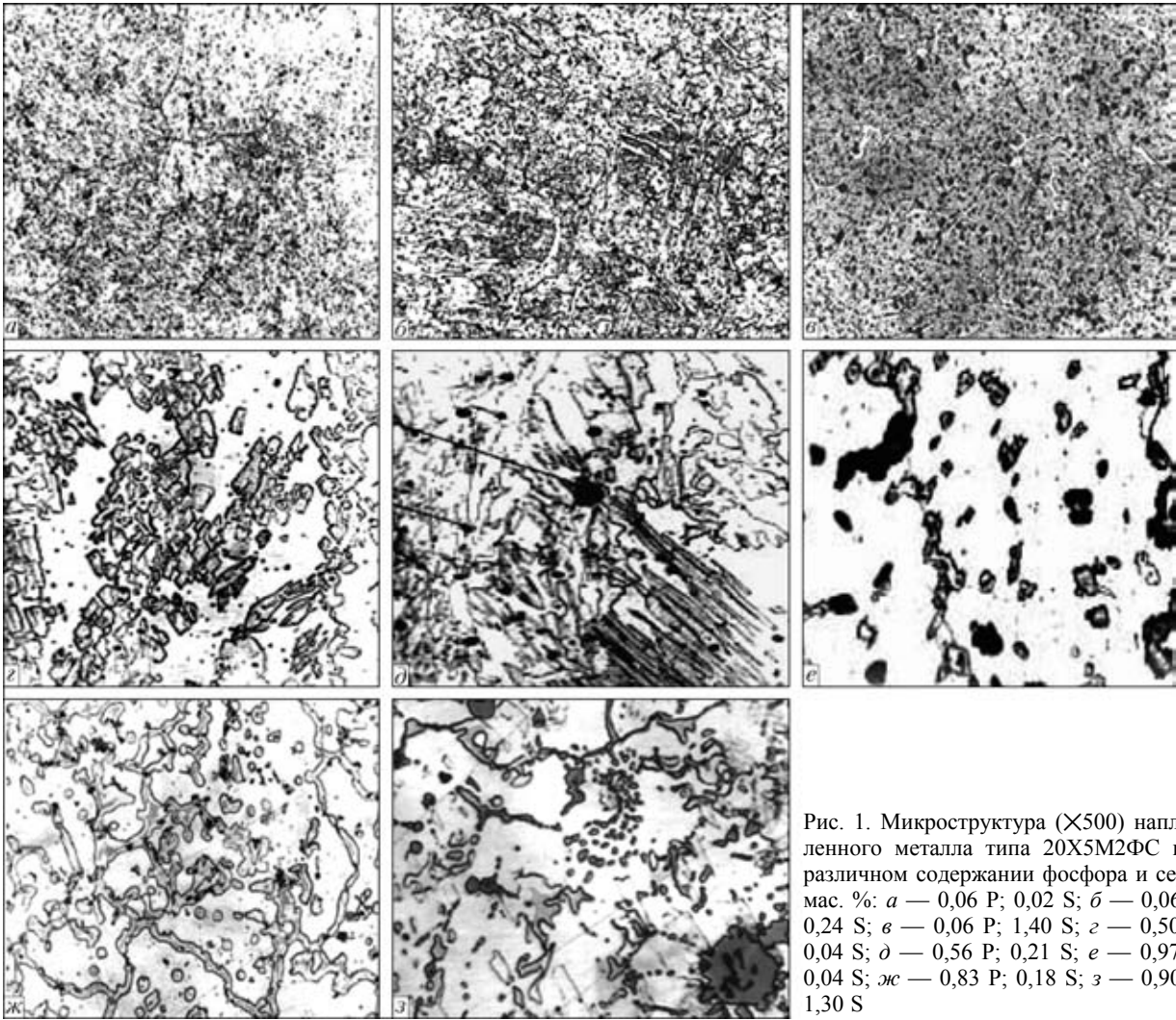


Рис. 1. Микроструктура (X500) наплавленного металла типа 20X5M2FC при различном содержании фосфора и серы, мас. %: *a* — 0,06 P; 0,02 S; *б* — 0,06 P; 0,24 S; *в* — 0,06 P; 1,40 S; *г* — 0,50 P; 0,04 S; *д* — 0,56 P; 0,21 S; *е* — 0,97 P; 0,04 S; *ж* — 0,83 P; 0,18 S; *з* — 0,90 P; 1,30 S

Введение в состав наплавленного металла 20X5M2FC 0,21 мас. % S (образец № 5, табл. 1) при содержании фосфора 0,56 мас. % приводит к увеличению объемной доли неметаллических включений, среди которых есть сульфиды и оксисульфиды. Основные структурные составляющие наплавленного металла — это мартенсит и остаточный аустенит (рис. 1, *д*), микротвердость которых остается на уровне микротвердости образца № 4.

В случае увеличения массовой доли фосфора до 0,97 % при стандартном содержании серы 0,04 мас. % (образец № 6, табл. 1) в структуре наплавленного металла появляется много светлых участков, свидетельствующих о худшей травимости (рис. 1, *е*) что, по-видимому, связано с увеличением коррозионной стойкости наплавленного металла при легировании его значительной массовой долей фосфора [8]. Микротвердость мартенсита составляет  $HV_{0,5}$  4730...5490 МПа, а остаточного аустенита —  $HV_{0,5}$  2570...3050 МПа.

При содержании фосфора 0,83 мас. % и серы 0,18 мас. % (образец № 7, табл. 1) наплавленный металл имеет ячеистую структуру (рис. 1, *ж*). Микротвердость мартенсита снижается до  $HV_{0,5}$

3620...4120 МПа, а микротвердость остаточного аустенита остается на прежнем уровне  $HV_{0,5}$  2830...3060 МПа. В структуре наплавленного металла присутствуют также сульфиды и оксисульфиды.

О повышении массовой доли серы до 1,30 % при практически неизменном содержании фосфора (образец № 8, табл. 1) в структуре наплавленного металла образуются крупные включения сульфидов и оксисульфидов (рис. 1, *з*).

Поскольку основное влияние на образование неметаллических включений оказывает сера, исследовали их распределение в наплавленном металле при различном содержании этого элемента. Проводили исследования нетравленных полированных шлифов на анализаторе «Omnimet» (увеличение 600) при просмотре 100 полей зрения (рис. 2, 3).

Как видно из рис. 3, с увеличением содержания серы резко возрастают количество и размер неметаллических включений. Так, при 0,02 мас. % S максимальный размер неметаллических включений составляет 2,0 мкм (рис. 3, *б*), при 0,24 мас. % S — 3,5 мкм (рис. 3, *г*), а при 1,40 мас. % S — 7,0 мкм (рис. 3, *е*). Общая объемная доля неметаллических

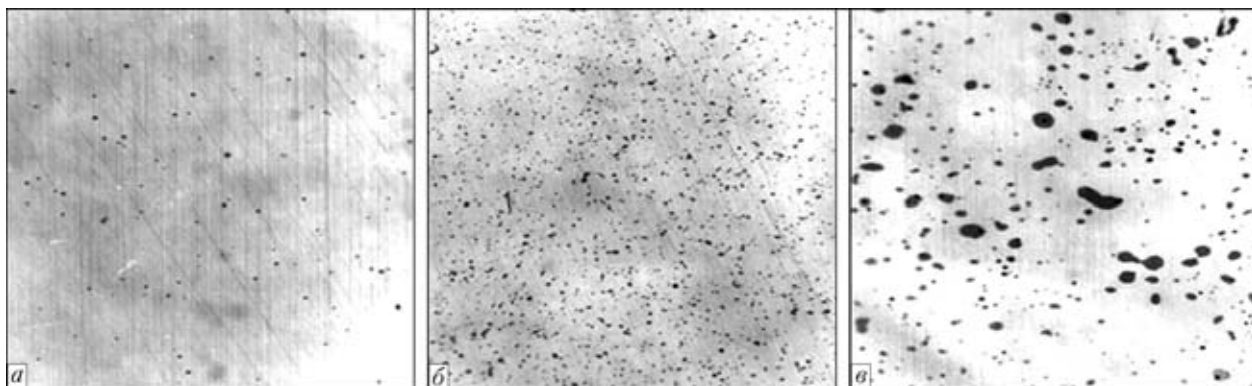


Рис. 2. Микроструктура (X600) наплавленного металла 20X5M2FC с содержанием серы 0,02 (а); 0,24 (б); 1,4 (в) мас. % (шлифы не травлены)

включений всех размеров увеличивается с 0,18 (0,02 мас. % S) до 4,01 % (1,40 мас. % S).

Микрорентгеноспектральный анализ наплавленного металла 20X5M2FC показал, что суль-

фиды имеют сложный состав — содержат повышенную массовую долю хрома, молибдена и марганца (табл. 2).

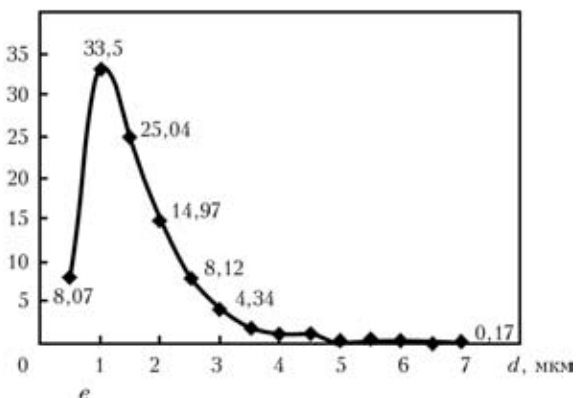
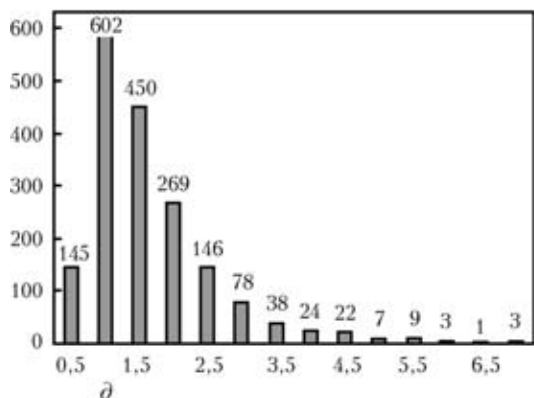
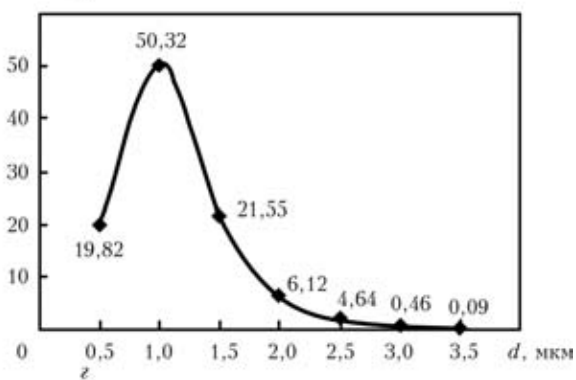
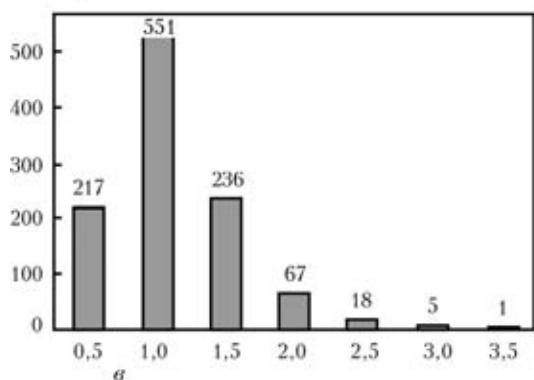
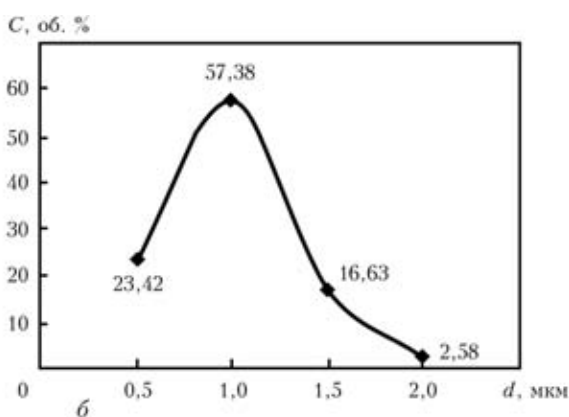
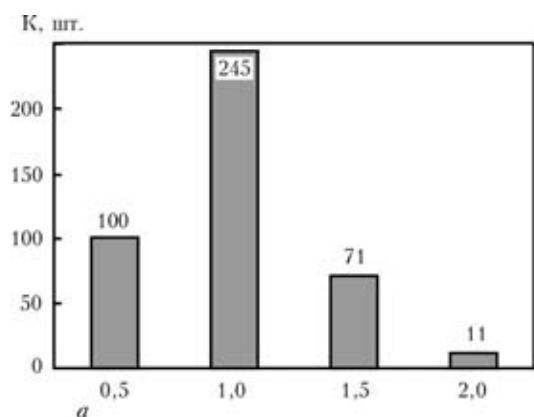


Рис. 3. Распределение по количеству К (а, в, д) и объемной доле С (б, г, е) неметаллических включений d в наплавленном металле 20X5M2FC при содержании серы 0,02 (а, б); 0,24 (в, г); 1,40 мас. % (д, е)



**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) структурных составляющих наплавленного металла 20X5M2ФС (по результатам микрорентгеноспектрального анализа)

№ образца по табл. 1	Место анализа	Fe	Cr	Mo	V	Mn	Si	S
2	Матрица	89,09	6,38	3,98	0,44	0,04	0,87	—
	Сульфид	22,78	18,69	10,25	1,72	20,96	5,28	20,14
3	Матрица	91,07	6,72	2,01	0,45	0,20	0,68	0,08
	Сульфид	5,58	21,02	14,58	1,58	23,12	4,38	29,47
	» »	5,60	25,36	10,76	2,08	20,85	0,49	34,15

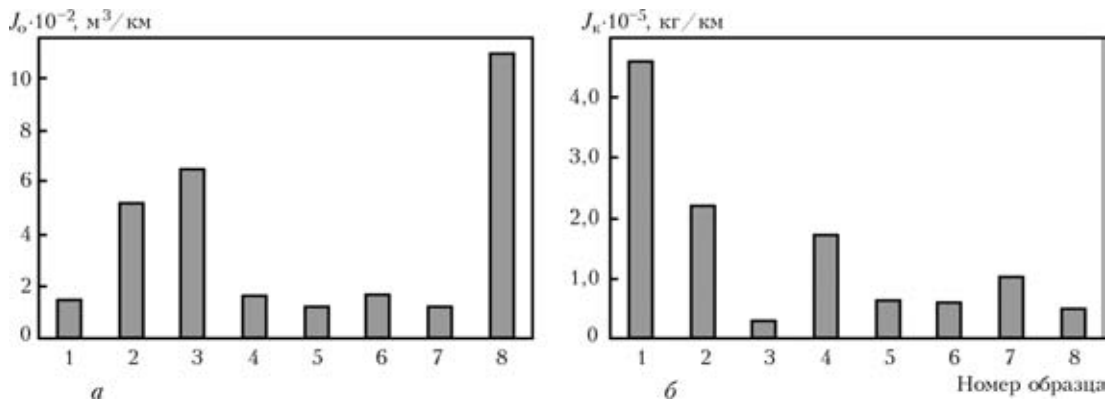


Рис. 4. Износостойкость образцов  $J_0$  наплавленного металла 20X5M2ФС с различным содержанием серы, фосфора (а) и контртел  $J_k$  из стали 45, испытанных в паре с этими образцами, (б): 1–8 — номера образцов по табл. 1

Исследовали износостойкость образцов наплавленного металла 20X5M2ФС с различным содержанием серы и фосфора при сухом трении металла по металлу при комнатной температуре по схеме вал–плоскость (рис. 4). Образцы размером  $3 \times 15 \times 25$  мм вырезали из наплавленного металла так, чтобы испытываемая плоскость попадала в верхние слои наплавленного металла. Вал-контртел диаметром 40 мм изготавливали из стали 45 и закачивали до твердости *HRC* 42. В процессе испытаний образец прижимался с определенным усилием к контртелу плоскостью, которая имела в плане размер  $3 \times 25$  мм. В результате на испытываемой плоскости образуется лунка определенной глубины, а на контртеле — дорожка. Выбран следующий режим испытаний: скорость скольжения 1 м/с; нагрузка 30 Н; частота вращения контртела 30 об/мин. Этот режим обеспечивает стабилизацию триботехнических характеристик всех исследуемых образцов. Использование системы позиционирования позволяло повторять испытания каждого наплавленного образца не менее трех раз на новом участке поверхности трения образца и на новой дорожке трения контртела.

Как видно из приведенных данных, легирование только серой приводит к увеличению износа образцов наплавленного металла с одновременным резким уменьшением износа контртела (рис. 4, образцы № 1–3). Однако суммарный износ пары трения остается достаточно высоким. По-видимому, повышенный износ наплавленного

металла 20X5M2ФС, легированного серой, объясняется тем, что многочисленные сульфиды относительно крупных размеров в процессе изнашивания легко выкрашиваются из матрицы наплавленного металла. Эти сульфиды являются «твердой смазкой», а также препятствуют схватыванию поверхностей образца и контртела, в результате чего его износ уменьшается.

При легировании наплавленного металла фосфором (0,50 мас. %) (рис. 4, образец № 4) износ образца и контртела понижается. Наиболее благоприятное сочетание свойств имеет наплавленный металл 20X5M2ФС, легированный серой (0,21 мас. %) и фосфором (0,56 мас. %) (рис. 4, образец № 5). При таком содержании серы и фосфора износостойкость наплавленного металла на 10...15 % выше, чем наплавленного металла базового состава (рис. 4, а, образец № 1), одновременно существенно (в 8...10 раз) снижается износ контртела. Увеличение износостойкости наплавленного металла, по-видимому, объясняется тем, что фосфор упрочняет его матрицу. В то же время легирование наплавленного металла относительно небольшой массовой долей серы способствует образованию сульфидов, имеющих оптимальную форму, количество и размер. В результате проявления эффекта «твердой смазки» изнашивание контртела существенно снижается.

Таким образом, подтверждено, что сера в отличие от фосфора не растворяется в матрице наплавленного металла, а образует в ней сульфиды



и оксисульфиды, размеры и количество которых увеличиваются по мере роста содержания серы. Легирование наплавленного металла 20Х5М2ФС 0,56 мас. % Р и 0,21 мас. % S обеспечивает высокую износостойкость наплавленного образца, в то время как относительно небольшое содержание серы способствует образованию сульфидов, оптимальных по форме, количеству и размерам. В результате проявления эффекта «твердой смазки» изнашивание контртела, контактирующего с наплавленным образцом, также существенно снижается.

1. Особенности плавления и кристаллизации наплавленного металла типа стали 20ХГС, легированного фосфором / Ю. М. Кусков, И. И. Рябцев, Л. К. Дорошенко, В. Г. Васильев // Автомат. сварка. — 2002. — № 8. — С. 24–27.
2. Рябцев И. И., Кусков Ю. М., Новикова Д. П. Влияние фосфора на трещиностойкость низкоуглеродистого наплавленного металла системы легирования Fe–Mn–Si–Cr // Там же. — 2006. — № 5. — С. 15–19.

The effect of alloying with sulphur and phosphorus on structure and wear resistance of deposited metal 20Kh5M2FS has been investigated. It has been proved that phosphorus dissolves to harden the martensitic component of structure of the deposited metal, whereas sulphur forms sulphides and oxy-sulphides with other alloying elements. It is shown that the most favourable combination of wear resistance of friction pair components is provided by deposited metal 20Kh5M2FS alloyed with 0.21 wt. % S and 0.56 wt. % P.

3. Рябцев И. И. Расчетно-экспериментальная оценка эффективности легирования фосфором высоколегированного наплавленного металла // Там же. — 2008. — № 5. — С. 18–22.
4. Осин В. В., Рябцев И. А. Влияние серы на свойства сплавов на основе железа и перспективы ее использования в наплавочных материалах // Там же. — 2004. — № 10. — С. 22–26.
5. Осин В. В., Рябцев И. А., Кондратьев И. А. Исследование влияния серы на свойства наплавленного металла Х5М3ФС // Там же. — 2006. — № 12. — С. 14–18.
6. Триботехнические характеристики наплавленного металла системы легирования Fe–Cr–Si–Mn–P / И. И. Рябцев, Ю. М. Кусков, В. Ф. Грабин и др. // Там же. — 2003. — № 6. — С. 20–24.
7. Лунев В. В., Аверин В. В. Сера и фосфор в стали. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
8. Гуляев А. П., Цулкова В. М. Влияние фосфора на коррозионные свойства нержавеющей сталей // Коррозионностойкие металлические конструкционные материалы и их применение. — М.: Машиностроение, 1974. — С. 49–52.

Поступила в редакцию 25.02.2009

	<p>4-я международная специализированная выставка-конференция</p> <h2>Контроль и Диагностика</h2> <p>При поддержке:          Комитета промышленной политики и развития          предпринимательства Администрации Екатеринбурга          Национального Агентства контроля и сварки          Уральского государственного технического университета – УПИ          Уральского института сварки</p>	
<p>Организатор:</p> <p><b>УРАЛЬСКИЕ ВЫСТАВКИ</b>          Выставочное Общество</p>	<p>1 – 3 декабря 2009 года,          Екатеринбург</p>	<p>Место проведения:</p>  <p>ЦЕНТР МЕЖДУНАРОДНОЙ ТОРГОВЛИ          ЕКАТЕРИНБУРГ</p>
<p><b>Основные направления выставки:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li style="width: 50%;">• Акустический контроль</li> <li style="width: 50%;">• Радиационный контроль</li> <li style="width: 50%;">• Акустико-эмиссионный контроль</li> <li style="width: 50%;">• Электрический контроль</li> <li style="width: 50%;">• Ультразвуковой контроль</li> <li style="width: 50%;">• Тепловой контроль</li> <li style="width: 50%;">• Вибрационный контроль</li> <li style="width: 50%;">• Капиллярный контроль</li> <li style="width: 50%;">• Вихретоковый контроль</li> <li style="width: 50%;">• Магнитопорошковый контроль</li> <li style="width: 50%;">• Оптический и визуальный контроль</li> <li style="width: 50%;">• Электромагнитный контроль</li> </ul> <p><b>Одновременно пройдет 9-я международная специализированная выставка-конференция «Сварка»</b>          Россия, 620027, Екатеринбург, ул. Свердлова, 11, а, оф. 507          тел./факс: +7(343) 355-51-95, 310-03-30          E-mail: kirillova@uv66.ru</p>		