

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 08Г2С

Ю.П. Егоров, М.В. Журавлев, Г.Е. Ремнев, М.С. Слободян, И.Л. Стрелкова, Б.Г. Шубин

Томский политехнический университет

E-mail: zhuravlev-misha@mail.ru

Исследован процесс электроискровой очистки поверхности стали 08Г2С. Показано, что в результате обработки окисный слой удаляется и уменьшается контактное сопротивление. Интенсивность кратерообразования, влияющая на величину шероховатости, зависит, главным образом, от степени перегрева металла в результате увеличения плотности кратеров. При многопроходной обработке поверхности происходит ее растрескивание. На основании полученных результатов определены наиболее рациональные параметры режима.

Ключевые слова:*Электроискровая обработка, свойства поверхности, контактное сопротивление.***Key words:***Spark processing, surface properties, contact resistance.*

В настоящее время в промышленности широко распространена механизированная и автоматизированная сварка плавящимся электродом в среде защитных газов или под слоем флюса. При этом способе формирования соединений расходным материалом является сварочная проволока диаметром от 0,3 до 12,0 мм. Основными показателями ее качества являются [1]: стабильность химического состава, равномерность сечения и намотки, а также состояние поверхности.

Ухудшение этих параметров приводит к снижению производительности сварки и качества шва, а также повышенному расходу проволоки и ускоренному износу оборудования [2]. С целью повышения качества проволоки производят ее омеднение (для наиболее широко применяемых диаметров: 0,8...5,0 мм), а также намотку на кассеты и каркасы, что приводит к удорожанию на 10...20 %. Основной целью омеднения является снижение электрического сопротивления скользящего контакта «наконечник мундштука сварочного оборудования — проволока» и защита от коррозии. Однако наличие меди на поверхности имеет ряд недостатков [2, 3]: возрастает разбрызгивание металла при сварке, ухудшается качество шва, увеличивается расход проволоки, ускоряется износ сварочного оборудования, ухудшается здоровье сварщиков и состояние окружающей среды.

Для компенсации перечисленных негативных эффектов от загрязнения поверхности проволоки производят ее перемотку с мотков на кассеты для сварочного оборудования с одновременной очисткой механическим, химическим (электрохимическим) или индукционным способом. Однако у механического и химического основными недостатками являются низкое качество обработанной поверхности и негативное воздействие на окружающую среду, а у индукционного — высокое энергопотребление. Кроме того, недостатком этих методов является то, что изделия вскоре после очистки начинают снова интенсивно корродировать в атмосфере.

В связи с этим необходимы недорогие (как по стоимости, так и в эксплуатации) установки для очистки поверхности, которые бы обеспечивали ее высокую коррозионную стойкость. Этим требованиям отвечает плазменно-дуговой способ обработки поверхности. Однако, несмотря на попытки освоения выпуска установок для плазменной очистки проволоки в России, США, Германии, Украине и ряде других стран, в настоящее время наиболее широко применяют механический и электролитический способы.

Исследования в области модифицирования поверхности металлов концентрированными потоками энергии, в числе которых очистка от окислов и органических загрязнений, ведут различные группы ученых (как отечественных, так и зарубежных) с середины XX в. Однако, несмотря на значительное количество публикаций по данной теме, как российских [4–7 и др.], так и зарубежных [8–13 и др.], в настоящее время отсутствует обобщенная методика выбора оптимальных параметров режима обработки в зависимости от металлопроката и используемого оборудования.

Перспективным, по нашему мнению, представляется электроискровой метод очистки поверхности металла, который во многом схож с электроэрозийным. Обработку производят в углеводородном газе при давлении 10^{-3} ... 10^2 атм, в качестве источника напряжения используют высоковольтный импульсный генератор. Расстояние от электрода до обрабатываемой поверхности (разрядный промежуток) составляет от долей до нескольких миллиметров в зависимости от параметров импульсов, давления и сорта газа.

При подаче генератором импульсов напряжения между электродом и очищаемой поверхностью происходит искровой пробой и формируется проводящий плазменный канал с начальным диаметром порядка 0,1 мм. Энергия, запасенная в генераторе, выделяется в проводящем плазменном канале, за счет чего происходит его расширение, при этом диаметр увеличивается пропорционально то-

ку и длительности импульса. Температура плазмы достигает значений $3,8 \cdot 10^4$ К, плотность энергии – $10^6 \dots 10^9$ Дж/м² [14]. Энергия плазмы, передаваемая очищаемой поверхности, приводит к быстрому (за время порядка 0,1 мкс) разогреву, плавлению и испарению металла, объем которого зависит от параметров импульса и теплофизических характеристик материала.

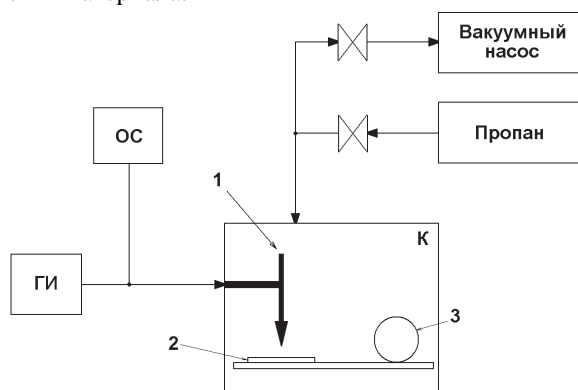


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1) электрод; 2) очищаемая поверхность; 3) протяжный механизм. ГИ – генератор импульсов, К – кювета, ОС – осциллограф

С целью определения оптимальных параметров режима очистки широко применяемой стали 08Г2С были проведены экспериментальные исследования на образцах из листового проката толщиной 4 мм. Электроискровую обработку поверхности проводили на экспериментальной установке (рис. 1). Кювету вакуумировали (1 Па), затем заполняли пропаном (C_3H_8) до атмосферного давления, при котором практически исключена утечка газа. Выбор газа обусловлен возможностью восстановления железа на поверхности металла из оксидов в результате плазмо-химических реакций. Использовали фольфрамовый и медный электроды, межэлектродный промежуток составлял 2 мм, скорость движения обрабатываемого образца – 8 мм/с, напряжение холостого хода – 40 кВ, амплитуда разрядного тока искры – 310 А. Параметры используемых генераторов в трех режимах работы приведены в табл. 1. Осциллограммы напряжения и тока, имеющие аperiodический характер разряда, приведена на рис. 2.

Таблица 1. Параметры высоковольтных генераторов

Номер режима	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, нс	Частота f , кГц	Полярность электрода
1	0,4	80	1,0	+
2				–
3	0,1	150	1,5	+

Измерение контактных сопротивлений проводили на экспериментальной установке [15], состоящей из модернизированной контактной машины МТТ-02, источника питания ИПТКМ-10 [16] и регистратора технологических процессов

Р-3704, который представляет собой специализированный компьютер, снабженный восьмиканальным аналогово-цифровым преобразователем и восемью усилителями с программируемыми коэффициентами усиления. Регистрацию тока проводили с помощью «трансформатора тока» (пояса Роговского), регистрацию напряжения – усилителем с гальванической развязкой. Использовали сферические электроды из бронзы БрХЦр радиусом 4 мм, сила сжатия составляла 200 Н, ток – 150 А. Сопротивление определяли путем обработки измеренных параметров тока и напряжения между электродами после завершения переходных процессов во вторичном контуре (аппроксимация с последующим вычислением по закону Ома).

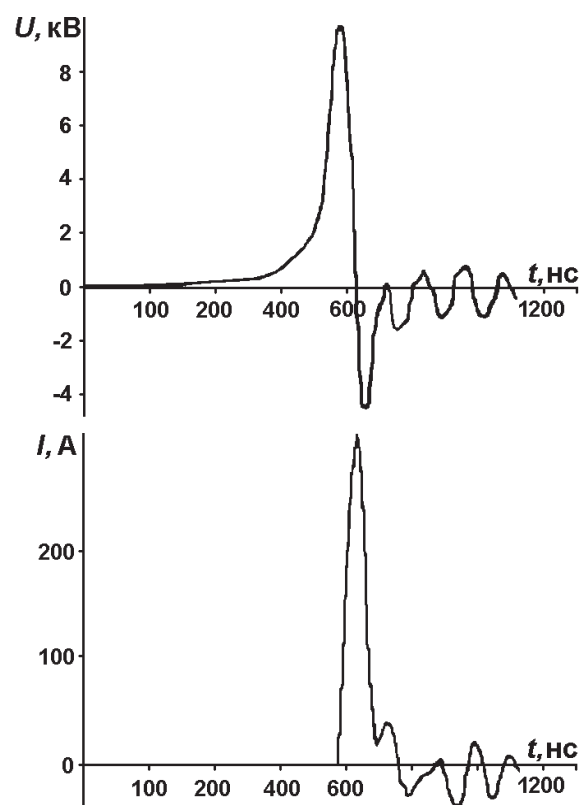


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока разрядного промежутка

Для исследования состояния поверхности использовали металлографический микроскоп высшего класса Observer A-1m. Поверхность образцов после электроискровой обработки изучали с увеличениями от 50 до 500 крат. Количественную аттестацию поверхности в результате различной обработки определяли с помощью программы КОИ (количественной обработки изображений) [17]. Сформированную градиентную структуру изучали на поперечных сечениях образцов, залитых в обойме эпоксидной смолой. Шероховатости сформированной поверхности исследовали с применением бесконтактного оптического 3D-профилометра MICRO MEASURE 3D station, французской фирмы STIL.

Первоначально исследовали зависимость контактного сопротивления от плотности микрократеров на поверхности. Плотность микрократеров определялась количеством проходов N очищаемой поверхности под электродом, режимы № 1 и 2 (табл. 1). Результаты приведены на рис. 3, а и б. Контактные сопротивления стабилизируются при плотности кратеров $208,3 \text{ мм}^{-2}$, что соответствует четырем последовательным обработкам (проходам), табл. 2. Однако их значения и величины разбросов выше, чем при механической очистке. Возможно это связано с увеличением шероховатости поверхности при электроискровой обработке (табл. 3). С целью ее уменьшения была проведена обработка в режиме № 3 (табл. 1). Однако достичь значения контактного сопротивления, получаемого механической обработкой, не удалось (рис. 3, в).

Таблица 2. Соотношения количества проходов к плотности микрократеров

№ п/п	Энергия импульса, Дж	Электрод	Плотность кратеров при количестве проходов (N), мм^{-2}					
			1	2	4	6	10	16
1	0,4	W	56,8	108,6	208,3	283,0	462,0	727,0
2		Cu	56,8	106,3	203,2	272,7	446,4	701,7
3	0,1	W	–	170,4	326,0	468,7	–	–
4		Cu	–	170,4	319,1	457,3	–	–

Таблица 3. Соотношение плотности кратеров и шероховатости поверхности при обработке на режиме № 1, табл. 1

Плотность кратеров, мм^{-2} (Cu)	–	56,8	108,6	208,3	283,0
Шероховатость R_a , мкм	2,05	4,99	3,48	1,60	6,05
Плотность кратеров, мм^{-2} (W)	–	106,3	203,2	272,7	446,4
Шероховатость R_a , мкм	2,05	3,97	3,28	2,30	3,94

На рис. 4 приведена характерная структура поверхности после электроискровой обработки. Светлые зоны представляют собой участки без

окислов, в которых произошло испарение или оплавление поверхности. Электроискровая обработка вольфрамовым анодом (рис. 4, а, б) сопровождается более высоким кратерообразованием в результате перегрева и разбрызгивания металла. Использование медного анода в процессе поверхностной обработки (рис. 4, в, г) приводит к снижению шероховатости, её сглаживанию в результате оплавления поверхности.

Количественные характеристики структуры поверхности исследуемых образцов (соотношение светлых и темных участков, процент промежуточной фазы, уровень яркости светлой фазы, уровень яркости темной фазы), полученные с помощью программы КОИ, приведены в табл. 4.

Из анализа результатов, табл. 4, следует, что с увеличением числа проходов меняются количественные характеристики структуры поверхности. При очистке поверхности в четыре прохода, независимо от материала электрода, образуется достаточное количество светлой фазы (оплавленный поверхностный слой) и шероховатость уменьшается (табл. 3). Уменьшение количества светлой фазы при шести проходах связано с образованием большого числа рассеивающих центров. Таким образом, интенсивность кратерообразования, влияющая на величину шероховатости, зависит, главным образом, от степени перегрева металла в результате увеличения плотности кратеров (количества проходов).

Таблица 4. Количественные характеристики структуры поверхности

Характеристики КОИ	2 прохода		4 прохода		6 проходов	
	W	Cu	W	Cu	W	Cu
% светлой фазы	14,51	35,33	24,51	24,96	14,90	7,07
% темной фазы	84,56	63,88	75,16	74,35	84,23	92,54
% промежуточной фазы	0,93	0,79	0,33	0,69	0,87	0,39

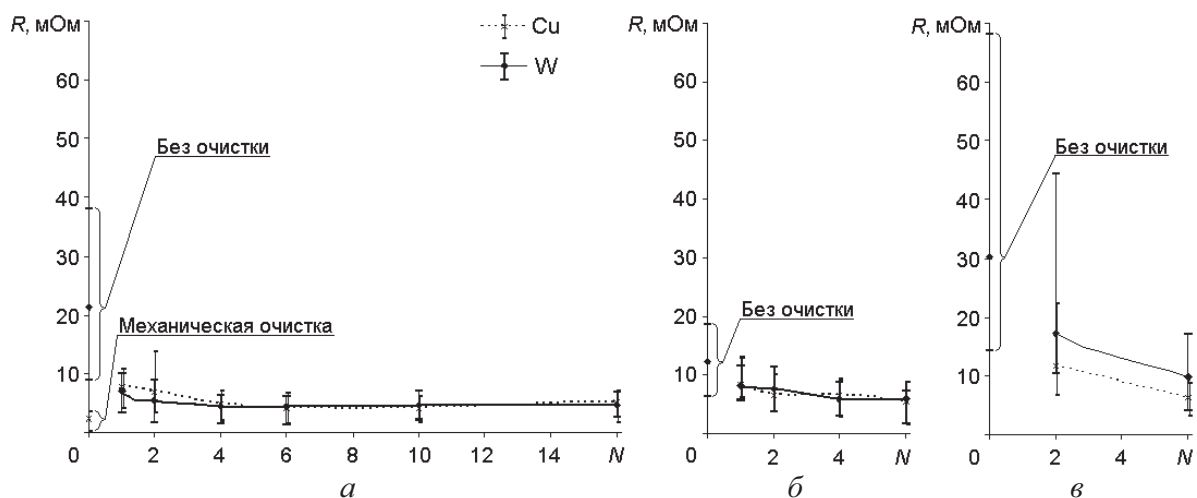


Рис. 3. Зависимость сопротивления пластины толщиной 4 мм из стали 08Г2С от количества проходов при обработке с использованием режима (табл. 1): а) 1; б) 2; в) 3

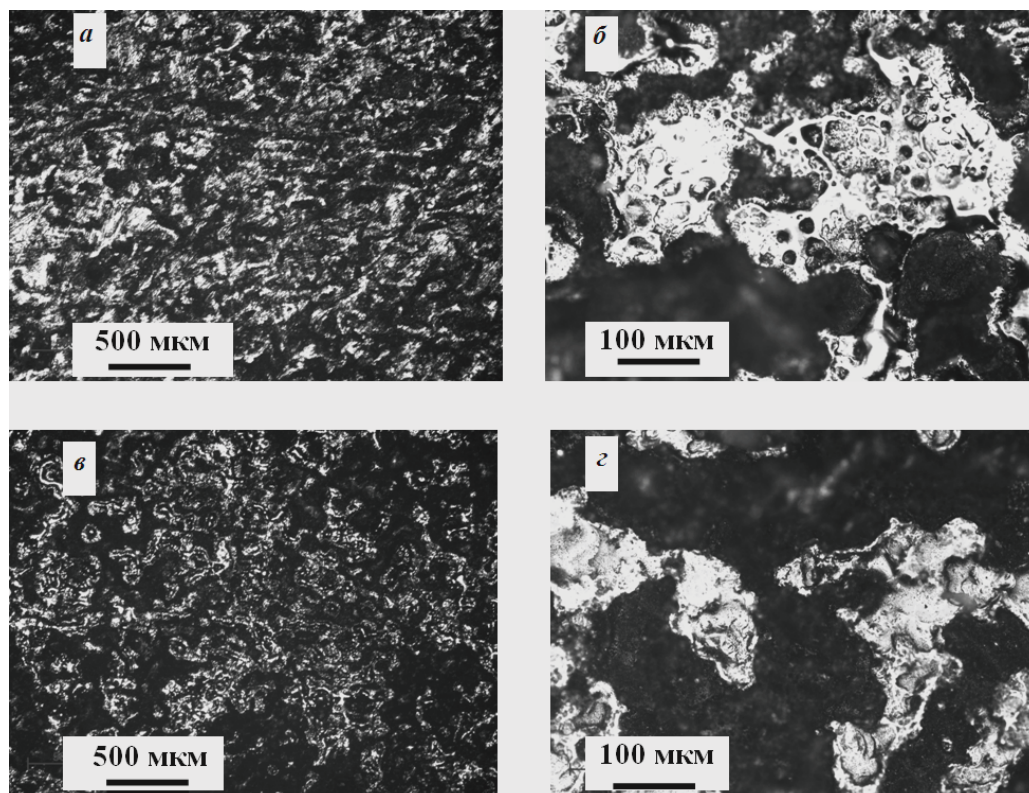


Рис. 4. Структура поверхности стали после электрошлаковой обработки с использованием электродов: а, б) из вольфрама; в, г) из меди

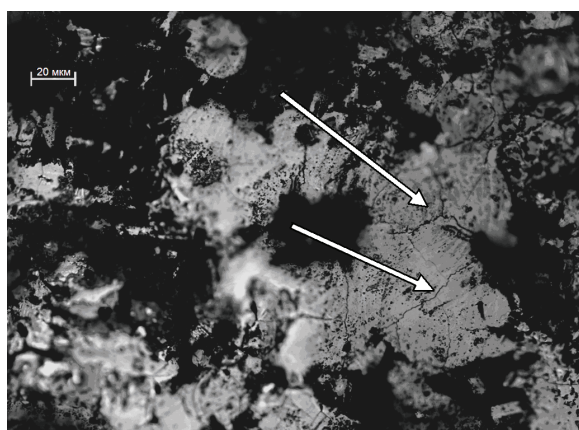


Рис. 5. Структура поверхности, обработанной на режиме № 1, табл. 1, с использованием медного электрода (стрелками указаны микротрещины)

Кроме того, экспериментально установлено, что электрошлаковая обработка с количеством проходов шесть и более (плотность кратеров 283 мм^{-2} и более) приводит к образованию в оплавленном слое микротрещин (рис. 5). Их распространение начинается от твердых включений, расположенных на оплавленной поверхности и возникших в результате взрывного разбрызгивания и быстрого затвердевания расплавленного металла, обогащенного элементами материала электрода (W и Cu). Также появление трещин объясняется возникновением больших термических напряжений из-за

многократного разогрева поверхности (при числе проходов больше двух). Очевидно, что для получения требуемой чистоты поверхности необходимо провести оптимизацию технологических режимов электрошлакового способа очистки поверхности.

На рис. 6 приведены фотографии поперечного сечения исследуемых образцов. Окисный слой имеет рыхлую слоистую структуру различной толщины. При электрошлаковом воздействии происходит постепенное его растрескивание (рис. 6, а), что, возможно, является одним из механизмов удаления этого слоя с поверхности. В результате локального воздействия искры происходит полное удаление окисного слоя с образованием оплавленной поверхности (рис. 6, б). Структура оплавленного слоя имеет некоторую пористость и явно выраженную границу раздела с основным материалом подложки.

Заключение

Исследован процесс электрошлаковой обработки поверхности стали 08Г2С с целью удаления окисной пленки и окалины. Использование высоковольтных генераторов с энергией в импульсе $0,1...0,4 \text{ Дж}$ (длительность — $0,1 \text{ мкс}$, частота следования $1,0...1,5 \text{ кГц}$) обеспечивает очистку поверхности металла с окисным слоем толщиной до 100 мкм , что позволяет снизить значения и разброс контактного сопротивления. Определено, что плотность кратеров 208 мм^{-2} для исследованных режимов можно считать наиболее рациональной

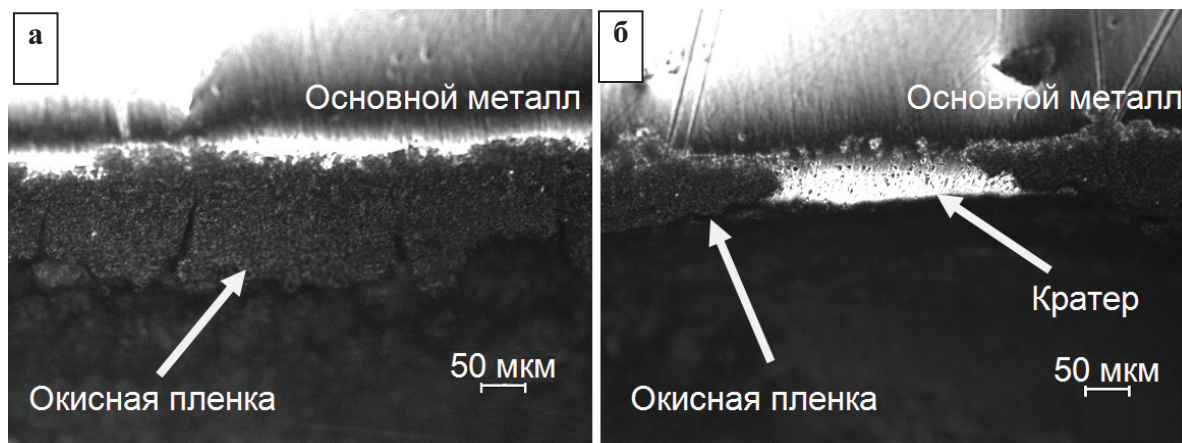


Рис. 6. Поперечное сечение образцов: а) до обработки; б) после обработки

(плотность энергии при этом составляет 83 Дж/мм^2), т. к. при достижении этого значения очистка поверхности максимальна, а его превышение (количество проходов более четырех) приводит к увеличению шероховатости, в обработанном слое возникают микротрещины, а контактное сопро-

тивление изменяется незначительно. Выявление рационального диапазона режимов процесса электроискровой очистки поверхности необходимо проводить в направлении снижения энергии импульса с одновременной корректировкой его длительности и частоты следования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия.
- Конonenko В.Я. Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом. — Киев: ТОВ «Ника-Принт», 2007. — 266 с.
- Бингам Ф.Т., Коста М., Эйхснбергер Э. и др. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов: Пер. с англ. / под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. — М.: Мир, 1993. — 368 с.
- Терехов В.П. Очистка поверхности проволоки дуговым разрядом // Бюлл. ин-та «Черметинформация». — 1976. — № 7. — С. 49–50.
- Сенокосов Е.С., Сенокосов А.Е. Плазма, рожденная Марсом // Металлоснабжение и сбыт. — 2001. — № 4. — С. 50–51.
- Сенокосов Е.С., Сенокосов А.Е. Плазменная электродуговая очистка поверхности металлических изделий // Металлург. — 2005. — № 4. — С. 44.
- Филиппов А.А., Гушин А.Н., Пачурин Г.В. Электронно-плазменная очистка от окалины поверхности металлопроката под калибровку // Технология металлов. — 2007. — № 1. — С. 7–10.
- Жадкевич М.Л., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В. Изменение структуры поверхностного слоя на изделиях из стали // Сварка и родственные процессы в промышленности: Докл. II научно-техн. семин. — г. Киев, 17 апреля 2007 г. — Киев: Экотехнология, 2007. — С. 60–64.
- Тутык В.А., Балакин В.Ф., Сафьян П.П., Федорович О.А., Чигиринец Е.Э., Полозов Б.П. Модификация поверхности нержавеющей труб плазмохимическим травлением для энергетического машиностроения // Теория и практика металлургии. — 2009. — № 5–6. — С. 50–53.

- Тутык В.А., Сафьян П.П., Динник Ю.А. Очистка поверхности нержавеющей труб для энергетического машиностроения пароплазменным разрядом // Теория и практика металлургии. — 2009. — № 5–6. — С. 71–74.
- Кайдалов А.А. Современные технологии очистки поверхностей конструкционных материалов. — Киев: Изд-во ун-та «Украина», 2009. — 540 с.
- Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O., Ryabkov D., Calliham B. Next Generation Cleaning & Surface Modification Technology // Wire & Cable Technology International. — 2003. — V. 31. — P. 52.
- Andrews E.H., Daigle E.O., Popov C.C. Benefits of the Electro Plasma Processing // Wire & Cable Technology International. — 2001. — № 7. — P. 54–56.
- Физика быстропотекающих процессов / Пер. под ред. Н.А. Златина. — М.: Мир, 1971. — Т. 1. — 519 с.
- Слободян М.С. Управление свойствами соединений сплавов циркония. — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 108 с.
- Способ контактной сварки и источник питания для его реализации: пат. 2236333 Рос. Федерация. № 2003103870/02; заяв. 10.02.03; опубл. 20.09.04, Бюл. № 26.
- Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610217. Система компьютерной обработки изображений (Система КОИ) / Ю.П. Егоров, Н.В. Мартюшев. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.01.2004.

Поступила 28.04.2011 г.