

Таким образом, получены экспериментальные данные, демонстрирующие влияние упругого растяжения на эффективность ЭМАП в модельных образцах поликристаллических ферромагнетиков с различным знаком магнитострикции насыщения в зависимости от их магнитного состояния при наличии и отсутствии внутренних напряжений и дано качественное описание полученных зависимостей на основе феноменологической модели ЭМАП.

Работа проведена при поддержке РФФИ-Урал (грант 07-08-96042).

Список литературы

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: ИЛ, 1956. 784 с.
2. Thompson R.B. Strain Dependence of Electromagnetic Generation Ultrasonic Surface Waves in Ferrous Metals // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 28. №9. P. 483-485.
3. Кулеев В.Г., Кононов П.С., Телегина И.А. Влияние растягивающих нагрузок на электромагнитно-акустическое преобразование в никеле // Дефектоскопия. 1980. № 4. С. 39-49.
4. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 235 с.
5. Комаров В.А., Ильясов Р.С., Шакшин Н.И. Исследование закономерностей возбуждения объемных акустических волн в ферромагнетиках квазистационарным электромагнитным полем // Дефектоскопия. 1983. № 4. С. 83-92.
6. Комаров В.А., Ильясов Р.С., Шакшин Н.И. Преобразование волн Лэмба нулевых мод в электромагнитное поле в ферромагнитных металлах // Дефектоскопия. 1982. №12. С. 38-45.
7. Ильясов Р.С., Комаров В.А. Электромагнитно-акустическое преоб-

зование объемных волн в ферромагнетиках накладными преобразователями. I. Экспериментальное изучение основных закономерностей // Дефектоскопия. 1983. № 11. С. 53-60.

8. Ильясов Р.С., Величко В.В., Бабкин С.Э. Особенности электромагнитно-акустического преобразования в стали 30ХГСА, подвергнутой термической обработке // Дефектоскопия. 2001. № 9. С. 34-45.
9. Белов К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах. М.: Наука, 1957. 256 с.

Bibliography

1. Bozorth R. Ferromagnetism. M.: 1956. 784 p.
2. Thompson R.B. Strain Dependence of Electromagnetic Generation Ultrasonic Surface Waves in Ferrous Metals // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 28. №9. p. 483-485.
3. Kuleev V.G., Kononov P.S., Telegina I.A. The influence of tensile stress on the electromagnetic-acoustic transformation in nickel // Defektoskopia 1980. №4. p. 39-49.
4. Komarov V.A. Quasi-stationary electromagnetic-acoustic transformation in metals // Sverdlovsk: USC AS USSR, 1986. 235 p.
5. Komarov V.A., Ilyasov R.S., Shakshin N.I. Investigation of the laws of the excitation of bulk acoustic waves in ferromagnetic quasi-stationary electromagnetic field // Defektoskopia 1983. № 4. p. 83-92.
6. Komarov V.A., Ilyasov R.S., Shakshin N.I. The transformation of zero modes of Lamb waves in the electromagnetic field in ferromagnetic metals // Defektoskopia 1982. № 12. p. 38-45.
7. Ilyasov R.S., Komarov V.A. Electromagnetic-acoustic transformation of body waves in ferromagnets patch transducers. Experimental study of the basic laws // Defektoskopia 1983. № 11. z. 53-60.
8. Ilyasov R.S., Velichko V.V., Babkin S.E. Peculiarities of electromagnetic-acoustic transformation in the steel 30XGCA subjected to heat treatment // Defektoskopia 2001. № 9. p. 34-45.
9. Belov K.P. Elastic, thermal and electrical phenomena in ferromagnetic metals. Moscow: Nauka, 1957. 256 p.

УДК 669.58:621.198

Стеблянко В.Л., Пономарев А.П.

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЕГО СТРУКТУРЫ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ

В работе представлены результаты сравнительного анализа основных эксплуатационных свойств металлоизделий с защитными цинковыми покрытиями, полученными различными способами. Показано преимущество плазменно-электролитного цинкования перед традиционными способами по качеству формируемого покрытия и обеспечиваемым им свойствам металлопродукции (коррозионным, пластическим и др.). Приведены результаты исследования структур покрытий.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, электроразрядная плазма, горячее цинкование, гальваническое цинкование, поверхностная плотность, адгезия покрытия, временное сопротивление, относительное удлинение после разрыва, скорость коррозии, дифференциальная сканирующая калориметрия.

The paper presents the results of comparative analysis of the basic metal goods service properties with protective zinc coatings formed by different methods. It is shown the advantage of plasma-electrolytic zinking over traditional methods in quality of the formed coating and metal products properties provided by it (corrosive, plastic, etc). It is given the results of coatings structures research.

Keywords: plasma-electrolytic treatment, electric discharge plasma, hot-dip galvanizing, electrolytic zinking, surface density, adhesion of coating, ultimate strength, percent elongation after rupture, corrosion rate, differential scanning calorimetry.

Повышение срока службы металлопродукции и сокращение потерь металла от коррозии является одной из ключевых задач современной промышленности. Значительную роль в решении этой задачи играют защитные покрытия, применение которых позволяет повысить долговечность металлических изделий. По объёму и номенклатуре защищаемой продукции ведущее место среди металлических покрытий занимают цинковые. Причинами их широкого использо-

вания являются надёжность и эффективность защиты, невысокая стоимость, относительная простота нанесения. В последние годы в России отмечается устойчивый рост производства и потребления металлоизделий с цинковым покрытием (рис. 1) [1]. В 2009 году наблюдался некоторый спад, вызванный мировым финансовым кризисом. Но уже в следующем году докризисный уровень потребления был превышен, и рост продолжился.

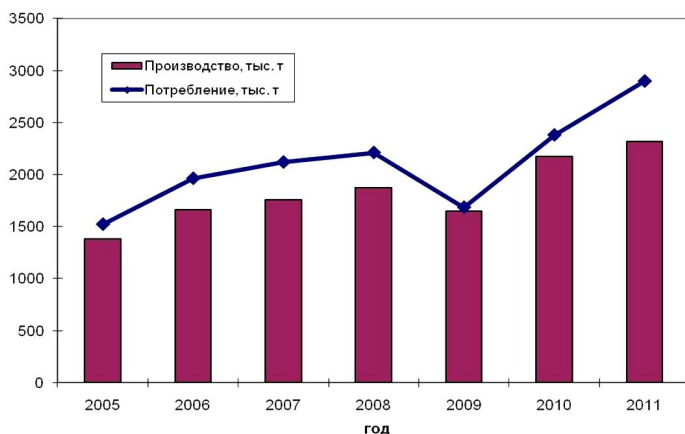


Рис. 1. Производство и потребление оцинкованного металлопроката в России

Существуют различные виды цинкования: гальваническое, из расплава цинка (горячее), термодиффузионное, газотермическое, холодное. У каждого из этих видов есть свои преимущества и недостатки.

Для получения цинковых покрытий высокого качества важной является подготовка и активация поверхности металла перед нанесением покрытия. Использование электроразрядной плазмы для получения металлических покрытий позволяет совместить процессы высококачественной подготовки поверхности и непосредственно нанесения покрытия. В МГТУ им. Г.И. Носова под руководством профессора Стебляно В.Л. на протяжении ряда лет осуществляются теоретические и экспериментальные исследования по применению электроразрядной плазмы для модифицирования поверхности металлических изделий с целью создания принципиально новых технологий, совмещающих в единый процесс очистку поверхности, формирование покрытий и получение требуемых структурно-механических свойств материалов [2-7]. В Лаборатории слоистых композиционных материалов и покрытий был создан ряд устройств для решения таких задач. В частности, была создана установка по нанесению металлических покрытий, в том числе и цинковых, на металлическую ленту из раствора соответствующего электролита с помощью электроразрядной плазмы. На этой установке были получены образцы ленты с цинковым покрытием, которые подверглись испытаниям для сопоставления полученных свойств с наиболее распространёнными способами цинкования: горячим и гальваническим.

Для исследований использовались образцы со следующими значениями поверхностной плотности покрытия (массы покрытия, отнесённой к площади покрываемой поверхности) (табл. 1).

Таблица 1

Поверхностная плотность покрытия исследуемых образцов

Вид покрытия	Поверхностная плотность покрытия М, г/м ²
Горячее	235
Гальваническое	112
Плазменно-электролитное	117

Качество цинкового покрытия, оцениваемое по ГОСТ 792-67 [8], определялось как показатель стойкости покрытия к стравливанию его в растворе медного купороса. Образцы с гальваническим покрытием выдержали 3 погружения, с горячим покрытием – 6 погружений, с плазменно-электролитным покрытием – 12 погружений. Это говорит о том, что благодаря использованию электроразрядной плазмы было получено покрытие более высокого качества, чем при применении традиционных способов. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что требуемое высокое качество цинкового покрытия может быть обеспечено покрытием нового вида с существенно меньшей поверхностной плотностью. Это следует рассматривать как эффективное направление экономии дефицитного цветного металла. Улучшение качества

образцов с плазменно-электролитным покрытием объясняется образованием в его структуре различных цинковых соединений, в частности оксида цинка, которые препятствуют стравливанию покрытия раствором медного купороса, о чём свидетельствуют проведённые металлографические исследования и спектральный анализ состава образцов с покрытием. Спектральный анализ (рис. 2) показал, что в покрытии, полученном плазменно-электролитным способом, содержится большое количество кислорода (13,22% по массе) (табл. 2). Учитывая условия образования этого покрытия (высокая температура), можно утверждать, что в нём присутствуют мощные оксидные плёнки, повышающие стойкость покрытия к химическим воздействиям.

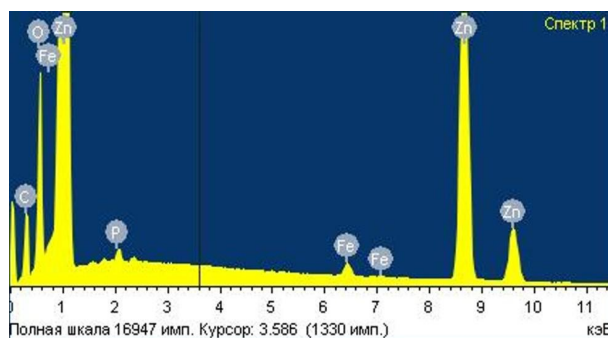


Рис. 2. Спектрограмма плазменно-электролитного покрытия

Таблица 2

Содержание элементов в плазменно-электролитном покрытии

Элемент	Содержание элемента, % (по массе)	Содержание элемента, % (ат)
C	15.17	39.55
O	13.22	25.89
P	0.33	0.34
Fe	0.83	0.46
Zn	70.45	33.76
Итого	100.00	

Для определения адгезии металлического покрытия к основе было проведено испытание образцов на изгиб на 180° по ГОСТ 14019-2003 «Материалы металлические. Метод испытания на изгиб» [9]. Лента с гальваническим покрытием испытания не выдержала. Образцы с покрытиями, полученными горячим и плазменно-электролитным способами, испытание выдержали [10].

Механические испытания образцов на растяжение по ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент» [11] показали, что после плазменно-электролитного цинкования относительное удлинение после разрыва выросло с 19% для необработанной ленты до 26%, при этом временное сопротивление осталось на уровне до нанесения покрытия. Механические свойства ленты после нанесения гальванического покрытия практически не изменились. В случае горячего покрытия наблюдается некоторое снижение относительного удлинения после разрыва по сравнению с лентой без покрытия. Полученные результаты отражают объективные данные об использовании, в частности бронекабельной ленты с цинковым покрытием, сформированным из расплава цинка, так как у потребителей такой ленты часто возникают проблемы с её применением из-за обрывов при укладывании на кабели. Рост пластичности в случае плазменно-электролитной обработки может быть вызван увеличением числа вероятных направлений скольжения внутри и вдоль границ зёрен металла вследствие снижения энергий активации образования дефектов и их миграции. Одновременно с этим идёт процесс дробления зёрен (рис. 3), сопровождающийся ростом количества и общей протяжённости их границ, что способствует упрочнению металла и сохранению значения временного сопротивления на уровне до нанесения покрытия.



Рис. 3. Микроструктура образца с плазменно-электролитным покрытием, $\times 200$

Защитная способность покрытий оценивалась по ГОСТ 9.308-85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний» [12] (метод испытаний при воздействии нейтрального соляного тумана). Длительность испытания составила 720 часов. Результаты представлены в табл. 3. Образцы выдержали испытание (отсутствует коррозия основного металла). Но, вместе с тем, площадь и скорость коррозии у гальванического покрытия

была значительно выше, чем у горячего и плазменно-электролитного. Степень поражения коррозией цинка (белой коррозией) для плазменно-электролитного покрытия значительно меньше, чем для горячего покрытия, при этом скорости их коррозии различаются не так существенно. Это связано с тем, что глубина проникновения коррозии в случае плазменно-электролитного покрытия выше, чем для образцов с горячим покрытием. Резервом улучшения коррозионных свойств плазменно-электролитного покрытия может служить пластическое деформирование металла с покрытием.

Таблица 3

Результаты коррозионных испытаний образцов с цинковым покрытием

Вид покрытия	Степень поражения белой коррозией, %	Потеря массы на единицу площади Δm , г/м ²	Скорость коррозии К, г/м ² ·ч
Горячее	11,6	25,8	0,036
Гальваническое	32,4	72,5	0,101
Плазменно-электролитное	6,7	21,7	0,030

С целью изучения структуры получаемых покрытий проведено их исследование методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3. Согласно этому методу измеряется количество энергии, поглощенной образцом или выделившейся из образца при непрерывном повышении или понижении температуры или при выдержке материала при постоянной температуре [13]. Были получены кривые (рис. 5, 7, 9). Затем проводился их анализ, результаты которого сопоставлялись с диаграммой состояния системы Fe-Zn (рис. 4) [14].

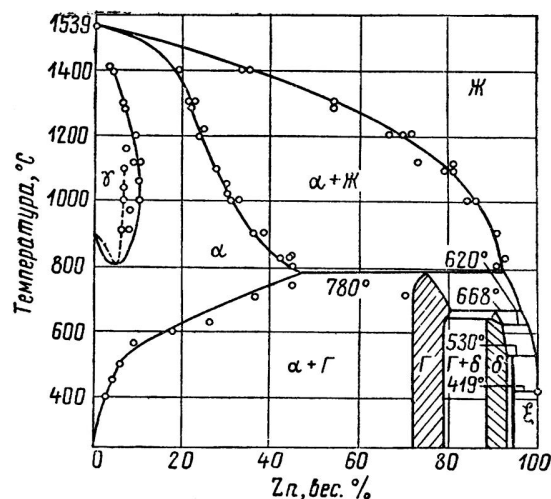


Рис. 4. Диаграмма состояния системы Fe-Zn

На графике, полученном для горячего покрытия (см. рис. 5), есть несколько эндотермических пиков, соответствующих определённым фазам в данном покрытии. Первый пик ($414,6^\circ\text{C}$) соответствует наличию в покрытии чистого цинка. Пик при температуре $573,8^\circ\text{C}$ указывает на присутствие ζ -фазы, которая

имеет столбчатую структуру. Следующая – δ -фаза. Она обнаруживается в покрытии по наличию на кривой ДСК пика при $672,6^{\circ}\text{C}$. Эта фаза содержит от 7 до 11,5% железа. Пик при $781,6^{\circ}\text{C}$ свидетельствует о Γ -фазе в покрытии, являющейся наиболее твердой из железоцинковых фаз. Следующий пик ($815,5^{\circ}\text{C}$) отвечает переходу всего покрытия в жидкое состояние. Исходя из его значения, можно считать, что процентное содержание цинка (по массе) в покрытии, полученном горячим способом, равно 91%. Пики при более высоких температурах соответствуют различным превращениям в основном металле и испарению цинка. Наличие в покрытии, полученном из расплава цинка, железоцинковых фаз подтверждается металлографическими исследованиями (рис. 6).

Гальваническое покрытие полностью состоит из чистого цинка, поскольку на кривой ДСК (рис. 7) есть пик только при температуре $416,9^{\circ}\text{C}$ и отсутствуют пики, соответствующие различным железоцинковым фазам. Отсутствие в этом случае химического взаимодействия цинка со стальной основой снижает адгезию такого покрытия к основе. Микроструктура гальванического покрытия представлена на рис. 8.

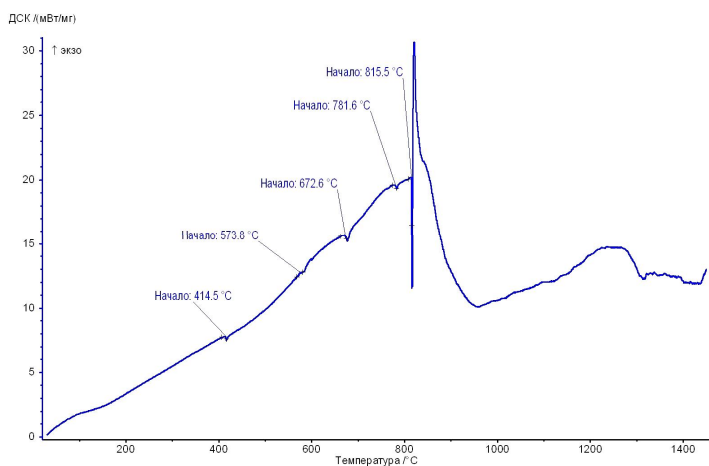


Рис. 5. Кривая ДСК для образца с горячим покрытием

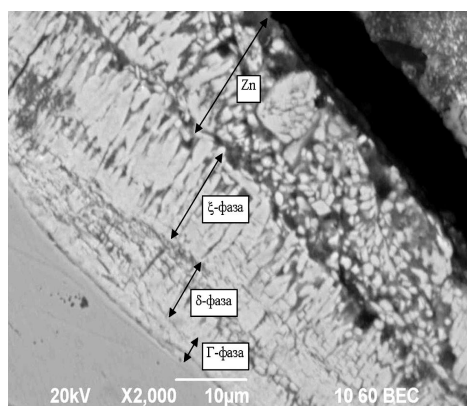


Рис. 6. Микроструктура покрытия, полученного из расплава цинка, $\times 2000$

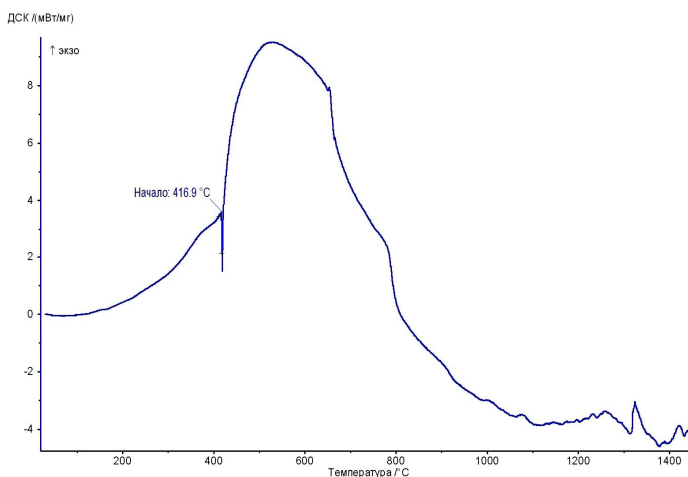


Рис. 7. Кривая ДСК для образца с гальваническим покрытием

Покрытие, полученное с помощью электролитной плазмы (рис. 9), также преимущественно состоит из чистого цинка (пик при температуре $414,7^{\circ}\text{C}$), но на границе покрытие – стальная основа имеет место железоцинковое соединение (ζ -фаза (пик при температуре $527,9^{\circ}\text{C}$)), что обуславливает прочное соединение покрытия с основой. Микроструктура плазменно-электролитного покрытия представлена на рис. 10.

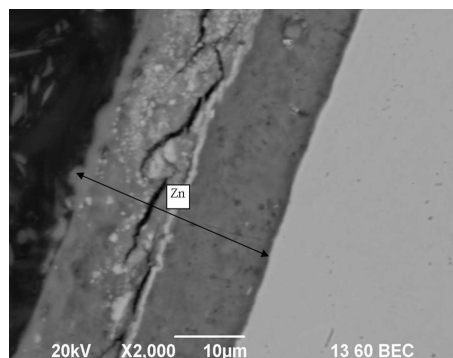


Рис. 8. Микроструктура гальванического покрытия, $\times 2000$

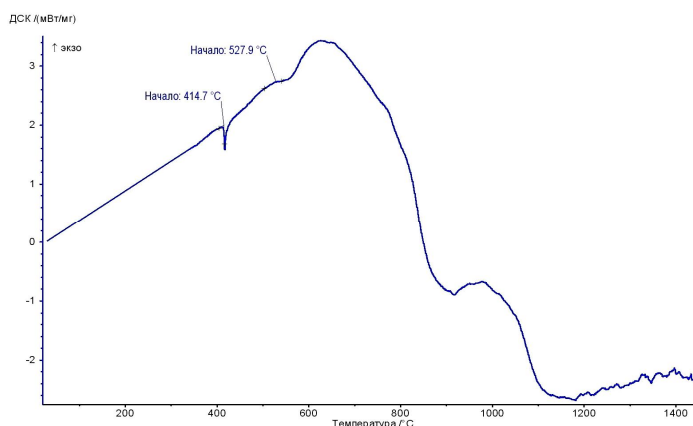


Рис. 9. Кривая ДСК для образца с плазменно-электролитным покрытием

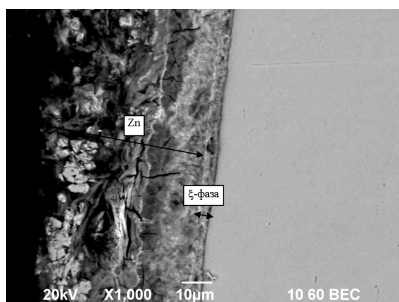


Рис. 10. Микроструктура плазменно-электролитного покрытия, $\times 1000$

Таким образом, можно говорить об уникальности свойств цинкового покрытия, получаемого способом плазменно-электролитной обработки. Он даёт возможность создавать универсальные компактные агрегаты, позволяющие наносить покрытия из различных металлов на одном и том же агрегате.

Список литературы

1. Пикалов С.Л. Развитие производства и сбыта оцинкованного и окрашенного проката в ОАО ММК. Основные тенденции и перспективы // *Материалы 7-й Международной конференции «Рынок оцинкованного и окрашенного проката - 2012»*. М., 2012.
2. Пат. 2008109 Российской Федерации, МПК⁶ В 21 С 23/22, В 23 К 35/40, В 23 К 20/04. Способ очистки поверхности металлического изделия / Стеблянко В.Л., Бухиник Г.В. и др. Опубл. 28.02.94, Бюл. № 4.
3. Пат. 2055947 Российской Федерации, МПК⁶ С 25 F 1/00. Способ изготовления биметаллической проволоки / Стеблянко В.Л., Рябков В.М. и др. Опубл. 10.03.96, Бюл. № 7.
4. Пат. 2077611 Российской Федерации, МПК⁶ С 25 D 5/00, С 25 D 17/00. Способ обработки поверхностей и устройство для его осуществления / Стеблянко В.Л., Рябков В.М. - Опубл. 20.04.97, Бюл. № 11.
5. Пат. 5.700366 США, МПК⁶. Electrolytic Process for Cleaning and Coating Electrically Conducting Surfaces / Steblianko V.L., Riabkov V.M. Опубл. 23.12.97.
6. Стеблянко В.Л. Создание технологии получения биметаллической проволоки и покрытий на основе процессов, совмещённых с пластическим деформированием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 2000.
7. Стеблянко В.Л., Пономарев А.П., Адаев А.Р. Повышение качества обработки и эксплуатационных свойств металлической поверхности на основе контроля и управления её электрическим потенциалом // *Чёрные металлы / Издательский дом «Руда и металлы»*. 2011. Июнь (специальный выпуск). С. 47-50.
8. ГОСТ 792-67. Проволока низкоуглеродистая качественная. Технические условия. Взамен ГОСТ 792-41; введ. 1968-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 6 с.
9. ГОСТ 14019-2003. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. Взамен ГОСТ 14019-80; введ. 2004-09-01. М.: Стандартинформ, 2006. 7 с.
10. Пономарев А.П., Стеблянко В.Л. Электролитно-плазменное цинкование как перспективный метод модифицирования свойств металлоизделий // *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов:*

- материалы XXI Уральской школы металловедов-термистов. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. С. 189-190.
11. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. Взамен ГОСТ 11701-66; введ. 1986-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 12 с.
 12. ГОСТ 9.308-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. Взамен ГОСТ 9.012-73; введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 21 с.
 13. Principles and Applications of Thermal Analysis / Paul Gabbott. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. 484 с.
 14. Алисова С.П., Будберг П.Б. Диаграммы состояния металлических систем. М.: Производственно-издательский комбинат ВНИИТИ, 1975. 268 с.

Bibliography

1. Pikalov S.L. The development of production and distribution of zinc-coated and painted rolled metal in JSC MMK. The main trends and prospects / S.L. Pikalov // *Materials of the 7-th International conference «The market of zinc-coated and painted rolled metal 2012»*. М., 2012.
2. Pat. 2008109 of The Russian Federation, IPC⁶ B 21 C 23/22, B 23 K 35/40, B 23 K 20/04. Method of surface cleaning of metal product / Steblianko V.L., Buhinik G.V. et al. Publ. 02/28/94, Bull. № 4.
3. Pat. 2055947 of The Russian Federation, IPC⁶ C 25 F 1/00. Method of bimetallic wire fabrication / Steblianko V.L., Riabkov V.M. et al. Publ. 03/10/96, Bull. № 7.
4. Pat. 2077611 of The Russian Federation, IPC⁶ C 25 D 5/00, C 25 D 17/00. Method of surface cleaning and device for its realization / Steblianko V.L., Riabkov V.M. Publ. 04/20/97, Bull. № 11.
5. Pat. 5.700366 of The USA, IPC⁶. Electrolytic Process for Cleaning and Coating Electrically Conducting Surfaces / Steblianko V.L., Riabkov V.M. Publ. 12/23/97.
6. Steblianko V.L. Creation of technology of bimetallic wire and coatings production on the basis of the processes combined with plastic forming: thes. ... Dr.Sci.Tech.: 05.16.05. Magnitogorsk, 2000.
7. Steblianko V.L., Ponomarev A.P., Aadaev A.R. Improving the quality of processing and performance properties of the metal surface through the control and management of its electric potential // *Ferrous metals / Publishing house «Ore and Metals»*. 2011. June (special issue). P. 47-50.
8. GOST 792-67. Low-carbon wire of quality. Specifications. In return for GOST 792-41; intr. 1968-01-01. М.: PPC Standards Publishing house, 2003. 6 p.
9. GOST 14019-2003. Metallic materials. Bend test method. In return for GOST 14019-80; intr. 2004-09-01. М.: Standartinform, 2006. 7 p.
10. Ponomarev A.P., Steblianko V.L. Electrolytic-plasma zincing as a promising method of metal goods properties modification // *Topical problems of physical metallurgy of steels and alloys: materials of the XXI Ural school of metallographers-heat-treaters. Magnitogorsk: MSTU named after G.I. Nосov Publishing house, 2012. P. 189-190.*
11. GOST 11701-84. Metals. Methods of tensile testing of thin sheets and strips. In return for GOST 11701-66; intr. 1986-01-01. М.: Standards Publishing house, 1985. 12 p.
12. GOST 9.308-85 Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Procedures for accelerated corrosion tests. In return for GOST 9.012-73; intr. 1987-01-01. М.: Standards Publishing house, 1986. 21 p.
13. Principles and Applications of Thermal Analysis / Paul Gabbott. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. 484 p.
14. Alisova S.P., Boodberg P.B. The phase diagrams of metal systems. М.: Production and publishing complex of All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, 1975. 268 p.

УДК 621.64

Кусков К.В., Ковенский И.М.

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 09Г2С

Исследовано влияние допустимых дефектов сварного шва на малоцикловую усталость стали 09Г2С. При испытаниях варьировались максимальное напряжение растяжения и амплитуду изменения напряжения. Получено квадратичное уравнение регрессии, связывающее число циклов до разрушения, максимальное напряжение растяжения и амплитуду изменения напряжения.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, сталь 09Г2С, сварной шов, дефект.

The influence of valid weld trouble on the low cycle fatigue of the steel 09G2S had been studied. The maximum stress of tension and the amplitude of stress excursion ranged during testing. The quadratic regression equation relating the number of cycles to failure, the maximum stress of tension and the amplitude of stress excursion had been obtained.

Keywords: low cycle fatigue, steel 09G2S, weld, trouble.