

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:*

11. материалы XXI Уральской школы металловедов-термистов. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. С. 189-190.
12. 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.
13. 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.
14. Principles and Applications of Thermal Analysis / Paul Gabbott. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. 484 с.
15. 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: the... 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.

Низколегированная сталь 09Г2С широко используется в сварных конструкциях при температурах от -70 до 425°C и повышенном давлении: в химическом, нефтяном и пищевом машиностроении, судо-, вагоно- и мостостроении, при изготовлении трубопроводов [1]. В случае эксплуатации стали в условиях переменных нагрузок, в отличие от статических, происходит накопление необратимых микропластических деформаций в структурно-неоднородных объемах металла, перераспределение атомов углерода и примесей, которые приводят к увеличению прочности, твердости и одновременно к уменьшению пластичности и ударной вязкости, а следовательно, к снижению сопротивляемости разрушению [2–4]. Сварной шов и зона термического влияния вблизи него являются наиболее протяженным структурно-неоднородным объемом металлоконструкции, в котором вероятно зарождение очага усталостного разрушения.

Усталостные испытания сварных соединений проводились неоднократно [5, 6], но при этом тестировалась конструкция в целом без учета характера присутствовавших дефектов. В настоящей работе исследовали влияние допустимых (согласно нормативно-технологической документации [7, 8]) дефектов сварного шва на малоцикловую усталость.

Пластины из стали 09Г2С размером 500×150×8 мм (длина × ширина × толщина) сваривали встык механизированной сваркой в среде углекислого газа. Исходную пластину разрезали на образцы размером 300×30×8 мм, причем участки пластины, где начинался и заканчивался сварной шов, для испытаний не использовали. Подготовленные образцы в зависимости от наличия выявленных при рентгенографическом контроле допустимых дефектов делили на два условных типа:

А – с визуально различимыми допустимыми дефектами сварного шва (непровары, несплавления и подрезы глубиной до 0,4 мм);

Б – без выявленных дефектов сварного шва.

Для сравнения испытывали образцы без сварного шва (тип *В*). Материал образцов по результатам испытаний на растяжение показал следующие механические характеристики: предел прочности $\sigma_b = 490,2$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{02} = 367,7$ МПа, относительное удлинение $\delta = 29,8\%$.

Усталостные испытания проводили на универсальной машине ЦД-20 с пульсатором Пу-10. Переменная растягивающая нагрузка от максимального напряжения растяжения σ_{max} до минимального σ_{min} действовала вдоль оси образца (перпендикулярно сварному шву). Частота циклов нагружения составляла 10 Гц. В каждой серии использовали по 7 образцов. Результаты испытаний приведены в **таблице**.

На **рис. 1** представлены характерные примеры разрушенных образцов с визуально различимыми допустимыми дефектами сварного шва. Поверхность разрушения представляет собой классический усталостный излом, на котором выделяются зона усталости и зона долома. Усталостные трещины наблюдаются как в корневом шве (**рис. 1, а**), так и в зоне термического влияния на верхней поверхности образца вблизи облицовочного шва (**рис. 1, б**). Их зарождение

происходит вблизи непроваров (**рис. 1, в**), несплавлений и подрезов. В дальнейшем трещина может ветвиться в нескольких направлениях, с возникновением новых трещин вблизи других концентраторов напряжения.

Параметры усталостных испытаний

Номер серии	Тип образцов	Максимальное напряжение растяжения σ_{max} , МПа	Минимальное напряжение растяжения σ_{min} , МПа	Амплитуда изменения напряжения $A\sigma$, МПа	Количество циклов до разрушения N
1	А – с визуально различимыми допустимыми дефектами сварного шва	330	294	36	16000
2		330	303	27	35000
3		330	312	18	125000
4		330	314	16	150000
5		283	260	23	97000
6		250	214	36	50700
7		250	223	27	97600
8		250	232	18	250300
9		205	169	36	57200
10		205	187	18	323500
11	Б – без выявленных дефектов сварного шва	330	294	36	83000
12		330	312	18	348000
13		250	214	36	95700
14		250	232	18	433200
15		205	169	36	126800
16	В – без сварного шва	430	384	46	17300
17		330	284	46	64100
18		330	294	36	198200
19		330	303	27	346000
20		330	312	18	497000
21		250	214	36	239000
22		205	169	36	322900

Сравнение серий 1 – 11, 3 – 12, 4 – 14, 6 – 13, 9 – 15 (см. **таблицу**) показывает, что образцы без выявленных перед испытаниями дефектов сварного шва выдерживали в 2–5 раз большее число циклов изменения нагрузки до разрушения, чем образцы с дефектами. Причем наибольшее повышение выносливости наблюдается при «жестких» условиях испытания: максимальном напряжении растяжения 330 МПа и амплитуде изменения напряжения 36 МПа. После испытаний в изломе образцов типа *Б* обнаружены внутренние и приповерхностные дефекты размером до 200 мкм, вблизи которых и зарождались усталостные трещины.

Во всех случаях разрушение носит вязкий характер, область разрушения деформирована, удлинение составляет не более 1,5% относительно рабочей длины образца.

Испытания при максимальном напряжении растяжения σ_{max} , превышающем предел текучести стали 09Г2С (серия 16 в **таблице**), показали заметное уменьшение длительности сопротивления образцов усталостному разрушению, по сравнению с другими образцами типа *В*.

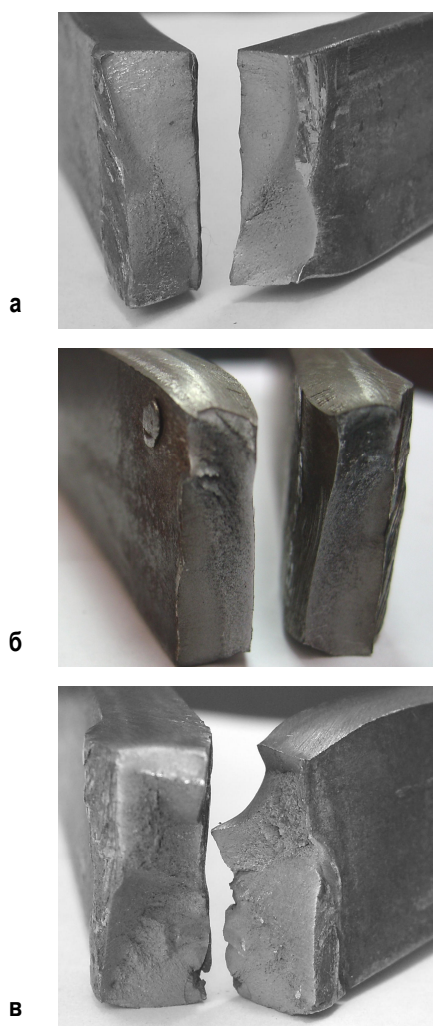


Рис. 1. Излом сварного соединения после усталостных испытаний (а – образец серии №9; б – образец серии №12; в – образец серии №11)

Сравнение результатов усталостных испытаний серий образцов *Б* и *В* свидетельствует, что наличие даже качественного сварного шва уменьшает длительность сопротивления металла усталостному разрушению в 1,4–2,4 раза. Особенно заметно количество циклов до разрушения уменьшается при повышенных значениях σ_{\max} и амплитуды изменения напряжения A_{σ} . Это обусловлено повышенной неоднородностью структуры литого металла и зоны термического влияния, а также наличием даже мельчайших концентраторов напряжений, которые могут стать очагами зарождения усталостной трещины.

Соотношение между количеством циклов до разрушения образца и параметрами испытаний для наиболее опасного типа образцов *А* описывает уравнение регрессии второго порядка:

$$N = 1,6461 \cdot 10^6 - 3701,8660 \cdot \sigma_{\max} - 59681,4092 \cdot A_{\sigma} + 1,4576 \cdot \sigma_{\max}^2 + 72,3891 \cdot A_{\sigma} \cdot \sigma_{\max} + 561,0847 \cdot A_{\sigma}^2.$$

Уравнение получено с помощью программы STATISTICA 6.1 (коэффициент корреляции 0,87 при доверительной вероятности 0,95; все коэффициенты

регрессии значимы). Геометрически оно интерпретируется плоскостью, показанной на рис. 2.

Анализ уравнения и рис. 2 показывает значительное влияние исследованных амплитуд изменения напряжения (18–36 МПа) на количество циклов до разрушения образцов: увеличение A_{σ} приводит кратно уменьшению N . Этот вывод подтверждают данные экспериментальных исследований при сравнении результатов испытаний серий образцов различных типов: 1 – 4, 6 – 8, 9 – 10, 11 – 12, 13 – 14 и т.д. (см. таблицу). Снижение амплитуды изменения напряжения до 6 – 8% от σ_{\max} практически перестает влиять на количество циклов до разрушения образца, которое может составлять более 10^5 . Повышение максимального напряжения растяжения снижает количество циклов до разрушения сварного соединения, что особенно заметно при малых значениях амплитуды изменения напряжения (см. рис. 2).

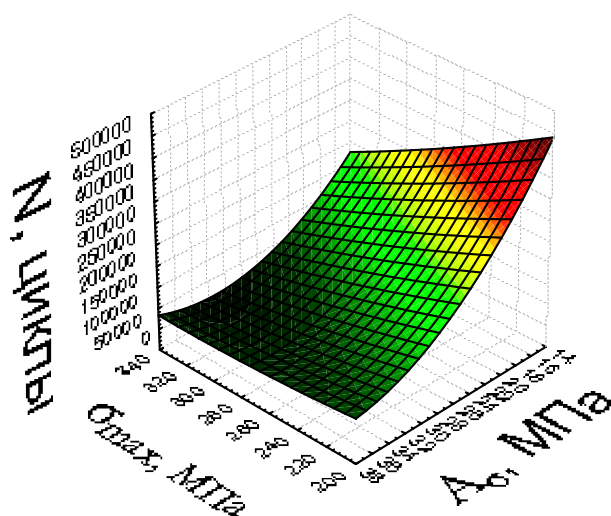


Рис. 2. Графическая интерпретация уравнения корреляции количества циклов до разрушения образца с максимальным напряжением растяжения σ_{\max} и амплитудой изменения напряжения A_{σ}

Полученное уравнение корреляции позволяет оценить остаточный ресурс металлоконструкции, который еще достаточно велик, так как с момента зарождения трещины до разрушения сталь 09Г2С выдерживает примерно 6–10 тысяч циклов в зависимости от амплитуды изменения напряжения. В течение этого периода зарождающийся очаг разрушения может быть выявлен, что позволит принять своевременные меры для ремонта дефектного участка.

Выводы

1. Оценено влияние сварного шва на длительность сопротивления стали 09Г2С переменным растягивающим нагрузкам. Количество циклов до разрушения образцов с качественным сварным соединением уменьшается более чем на 40% по сравнению с цельными образцами, а при наличии допустимых дефектов до 0,4 мм – в 5 – 12 раз.
2. Получено уравнение регрессии второго порядка, свидетельствующее о корреляции количества

циклов до разрушения образца от максимального напряжения растяжения и амплитуды изменения напряжения усталостных испытаний.

3. Установлено существенное влияние амплитуд изменения напряжения при растяжении в диапазоне от 18 до 36 МПа на количество циклов до разрушения образца. Уменьшение A_{σ} до 6–8% от σ_{\max} перестает влиять на количество циклов до разрушения образца, которое может составлять более 10^5 при испытаниях образцов с визуально различимыми допустимыми дефектами сварного шва.

Список литературы

1. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. ; под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
2. Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С., Ямалеев К.М. Старение труб нефтепроводов. М. : Недра, 1995. 222 с.
3. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалеев, Г.В. Журавлев, Ф.И. Бадиков. М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 231 с.
4. Ямалеев К.М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепроводов. М. : Изд-во ВНИИОЭНГ, 1990. 64 с.
5. Кудрявцев И.В., Наумченков Н.Е. Усталость сварных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. 270 с.

6. Худяков М.А., Рафикова Г.С. Исследование механических свойств основного металла и сварных соединений длительно эксплуатируемых нефтепроводов // Транспорт и подземное хранение газа. 2000. №6. С. 20-33.
7. ВСН 012-88* (Миннефтегазстрой). Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ. Ч.1. М., 1998. 60 с.
8. СНиП III-42-80*. Магистральные трубопроводы. Правила производства и приемки работ. М., 2001. 33 с.

Bibliography

1. Database of steels and alloys / V.G. Sorokin, A.V. Volosnikova, S.A. Vyatkin etc.; edited by V.G. Sorokin. M.: Mechanical Engineering, 1989. 640 p.
2. Gumerov A.G. Zainullin R.S., K.M. Yamaleev. Aging oil pipes wires. M. Nedra, 1995. 222 p.
3. Fracture toughness of the metal pipe oil / A.G. Gumerov, K.M. Yamaleev, G.V. Zhuravlev, F.I. Badikov. M. : LLC «Nedra-business centers», 2001. 231 p.
4. Yamaleev K.M. Aging of the metal pipes in the operation of pipelines. M. Publishing House of the VNIIOENG, 1990. 64 p.
5. Kudryavtsev I.V., Naumchenko N.E. Fatigue of welded structures. M. Mechanical engineering, 1976. 270 p.
6. Khudyakov M.A., Rafikov G.S. The study of the mechanical properties of the base metal and welded joints of long exploited pipelines // Transport and underground storage. 2000. № 6. Pp. 20-33.
7. VSN 012-88* (Minneftegazstroj). Construction of main and field pipelines. Quality control and acceptance. Part 1. M., 1998. 60 p.
8. SNIP III-42-80*. Pipelines. Rules of production and acceptance. M., 2001. 33 p.