

# Строительные конструкции

УДК 624.014

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕРАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ФИЗКУЛЬТУРНО-СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА

*Р.Г. Губайдулин, А.К. Тиньгаев*

## RESEARCH INTO THE CAUSES OF NON OPERABLE CONDITION OF METALWORK OF FINISHING COAT OF PHYSICAL EDUCATIONAL AND SPORT CENTER

*R.G. Gubaidulin, A.K. Tingaev*

Приведены результаты экспериментальных исследований причин слоистого разрушения и ограниченной свариваемости конструкций покрытия физкультурно-спортивного комплекса, возводимого в г. Сатке.

*Ключевые слова:* арочная ферма, сварное соединение, слоистое разрушение, неметаллические включения.

The results of experimental research into the causes of layered destruction and limited welding capacity structures of coating of physical educational and sport center, which is erected in Satka, are given.

*Keywords:* arch girder, weld seam, layered destruction, non-metallic inclusions.

В настоящее время в городе Сатке возводится физкультурно-спортивный комплекс (ФСК), в котором в качестве несущих конструкций покрытия используются большепролетные арочные фермы (рис. 1).

Каркас здания – металлический. Шаг основных колонн – 6 и 12 м. Пролет несущей конструкции покрытия – 51,0 м. Верхний и нижний пояса арочной фермы выполнены в виде сварных двутавровых балок высотой 1278 мм и 632 мм соответственно. Устойчивость конструкций покрытия обеспечивается системой связей и прогонов.

Металлоконструкции покрытия здания запроектированы:

- верхние и нижние пояса арочных ферм покрытия из стали С345-3 по ГОСТ 27772–88\*;
- V-образные трубчатые стойки арочных ферм из стали 20 по ГОСТ 1050–88\*;
- прогоны и связи из стали С245 по ГОСТ 27772–88\*.

Все заводские швы выполнены механизированной сваркой в среде защитных газов, монтажные – ручной дуговой сваркой.

Для монтажных фланцевых стыков верхнего пояса ферм приняты высокопрочные болты М24 нормальной точности по ГОСТ 7798–70\* из стали марки 40Х «Селект» по ГОСТ 4543–71\*.

В результате анализа проектной документации и обследования конструкций было установлено:

1. В принятой конструкции арки отношение стрелы подъема к пролету составляет 1/10, а высоты сечения к пролету – 1/40, в то время как их оптимальные соотношения составляют соответственно 1/4...1/6 и 1/60...1/80. Неоптимальность геометрии и сечений элементов арки привели к увеличению толщины элементов до 45 мм и объема наплавленного металла в сварных соединениях, в которых возникают значительные остаточные напряжения, способные инициировать возникновение трещин.

2. Для исключения провисания затяжки в ненагруженном состоянии используются две V-образные стойки, расположенные на расстоянии 21,250 м друг от друга. В принятой арке раздвижка поясов не предусматривается, т. е. натяжение затяжки в процессе монтажа не производится. Таким образом, после сборки арки в кондукторе затяжка под собственным весом прогибается и не разгружает верхний пояс арки. Отсюда следует, что в затяжке вначале выбирается ее прогиб от собственного веса и только после этого она включается в работу и начинает разгружать верхний пояс арки. При этом один из опорных узлов арки должен быть подвижным.



## Строительные конструкции

В данном проекте подвижность опорных узлов ограничена из-за крепления их на каждой опоре с помощью четырех болтов (см. рис. 1), которые препятствуют смещению узлов. В силу этого затяжка не разгружает должным образом верхний пояс арки, а в опорном узле возникает дополнительный изгибающий момент.

3. Узлы крепления проушин к нижней полке верхнего пояса арки чрезмерно перегружены сварными швами. В этих узлах к нижней полке арки сверху привариваются усиливающие наклонные элементы и вертикальные ребра, а снизу – проушины толщиной 36 мм для крепления V-образных стоек (см. рис. 1).

В результате принятого решения в нижней полке арки возникают значительные остаточные сварочные напряжения, растягивающие ее по толщине и провоцирующие металл к расслою. В частности, слоистое (ламельное) разрушение нижней полки было зафиксировано при укрупнительной сборке арки по оси 8.

Схожие проблемы могут возникнуть в сварных швах фланцевых соединений отправочных марок верхнего пояса арки, которые воспринимают растягивающие напряжения в направлении толщины. Для надежной работы таких узлов рекомендуют применять металлопрокат с гарантией механических свойств в направлении толщины.

Применительно к данному объекту это не было учтено ни проектировщиком, который принял сталь С345-3 по ГОСТ 27772–88, ни изготовителем, заменившим сталь С345-3 на 09Г2С-12 по ГОСТ 19281–89\*, для которых эти характеристики не регламентируются.

Одним из факторов, оказывающих непосредственное влияние на образование слоистых трещин, несплавлений по кромкам и между валиками, является качество металлопроката по показателям структурной, химической и механической неоднородности, которые существенно возрастают с увеличением толщины металлопроката. В отдельных случаях степень структурной неоднородности может оказаться настолько существенной, что возникают сложности в обрабатываемости и свариваемости конструкционного материала. Поэтому для оценки фактических свойств материала были проведены лабораторные исследования образцов, для чего в соответствии с ГОСТ 7564–97 и ГОСТ 7565–81 были отобраны пробы металла из основных несущих элементов покрытия. Химический анализ стали производился по ГОСТ 22536.0–87\* – ГОСТ 22536.9–88. Испытания образцов на растяжение и ударный изгиб, ориентированных в плоскости проката, проводились по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9454–78 соответственно. Результаты испытаний приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты химических испытаний проб стали

Номер пробы	Содержание химических элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
1	0,17	1,50	0,61	0,14	0,10	0,09	0,025	0,023
2	0,12	1,43	0,68	0,16	0,10	0,08	0,025	0,021
3	0,08	1,50	0,57	0,15	0,08	0,10	0,025	0,020
4	0,13	1,40	0,73	0,12	0,07	0,08	0,022	0,018
9	0,10	1,60	0,60	0,14	0,12	0,10	0,025	0,021
10	0,12	1,7	0,60	0,25	0,15	0,18	0,024	0,018
11	0,11	1,40	0,54	0,10	0,14	0,12	0,025	0,021

Примечание. Проба № 1 вырезана из верхнего пояса арки по оси 8, проба № 2 – из нижнего пояса арки по оси 3, проба № 3 – из верхнего пояса затяжки арки по оси 7, проба № 4 – из нижнего пояса затяжки арки по оси 5, проба № 10 – из стенки арки по оси 8, проба № 11 – из стенки затяжки по оси 12.

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов

Номер пробы	Предел		Относительное		Ударная вязкость	
	текущего, Н/мм <sup>2</sup>	прочности, Н/мм <sup>2</sup>	удлинение, %	сужение, %	KCV <sup>-40</sup> Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-40</sup> Дж/см <sup>2</sup>
1	<u>392–395</u> 394	<u>567–587</u> 577	<u>28–31</u> 30	<u>71–75</u> 73	<u>287–289</u> 288	<u>251–259</u> 256
2	<u>342–346</u> 344	<u>491–497</u> 494	<u>26–28</u> 27	<u>66–68</u> 67	<u>85–87</u> 86	<u>15–17</u> 16
3	<u>360–364</u> 362	<u>522–530</u> 526	<u>28–30</u> 29	<u>72–75</u> 74	–	–
4	<u>378–380</u> 379	<u>554–556</u> 555	<u>26–28</u> 27	<u>71–75</u> 73	<u>202–210</u> 205	–
10	<u>410–412</u> 411	540–544 542	36–37 36,5	–	<u>183–235</u> 208	<u>52–168</u> 110
11	<u>381–397</u> 389	<u>552–557</u> 555	<u>29–31</u> 30	–	<u>107–135</u> 127	<u>12–24</u> 18

В результате проведенных испытаний установлено:

1. По химическому составу практически все исследуемые пробы металла удовлетворяют требованиям, предъявляемым к стали 09Г2С-12 по ГОСТ 19281–89\* и С345-3 по ГОСТ 27772–88\*. Исключение составляет проба № 1, в которой выявлено повышенное содержание углерода, что не позволяет отнести ее к стали 09Г2С-12 (см. табл. 1).

2. Содержание серы в пробах стали находится в интервале от 0,022 до 0,025 %, а для отдельных плавок до 0,037 % (сертификат качества № 1783), что с точки зрения сопротивления ламеряному (слоистому) разрушению является избыточным. Согласно [1] для обеспечения устойчивости стали к образованию ламеряных трещин содержание серы должно быть не более 0,007 %.

3. По номенклатуре характеристик механических свойств ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ , КСУ<sup>40</sup>) все исследуемые пробы металла соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к стали 09Г2С-12 по ГОСТ 19281–89\* и стали С345-3 по ГОСТ 27772–88\*. Вместе с тем по данным сертификатов качества, предоставленных ОАО «ЗЗМК», ряд плавок стали 09Г2С-12 не являются аналогами стали С345-3 по показателям механических свойств. В частности, сталь 09Г2С-12 толщиной 20 мм (сертификат качества № 1783) относится к классу прочности 295, в то время как для равноценной замены требуется класс прочности 325.

Учитывая имеющийся разброс по классам прочности поставленного металлопроката, а также выборочный характер проведенного контроля, было принято сталь 09Г2С толщиной до 20 мм включительно отнести к классу прочности 295, а толщиной более 20 мм – к классу прочности 265.

4. Испытания на ударный изгиб образцов с острым надрезом (образцов типа 11 по ГОСТ 9454–78) свидетельствуют о низкой сопротивляемости развитию трещины металла нижнего пояса арки (проба № 2) и стенки затяжки (проба № 11). Значения ударной вязкости этих проб в среднем в 16 и 6 раз меньше, чем у металла верхней полки (проба № 1) и стенки арки (проба № 10) соответственно (см. табл. 2).

Одной из причин низкой трещиностойкости стали в направлении толщины является загрязненность ее неметаллическими включениями, которые различаются по виду, форме и местоположению в прокате. При нагружении такого проката около неметаллических включений возникает высокая концентрация напряжений, которая при низкой пластичности металла может привести к его раскрекиванию.

Применительно к сварным строительным конструкциям слоистые трещины зарождаются преимущественно в зоне термического влияния сварного соединения и уступами углубляются (развиваются) в основной металл. Большая часть этих трещин располагается в подповерхностном

слое на стыке зоны термического влияния и основного металла и ориентированы параллельно поверхности листа.

В общем случае возникновение слоистого разрушения зависит от множества факторов, к которым следует отнести:

– качество основного металла, и в первую очередь степень загрязнения его сульфидами, оксидами и силикатными включениями;

– уровень внутренних сварочных напряжений и напряжений, которые возникают в направлении толщины проката в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации конструкции;

– степень жесткости конструкции или сварного соединения, вызывающая образование больших местных напряжений и деформаций в металле;

– использование форм разделки кромок листов, вызывающих деформацию в направлении толщины проката;

– наличие диффузионного водорода и закалочных структур в металле околошовной зоны.

Для оценки технологических и эксплуатационных свойств металлопроката в направлении толщины были проведены механические испытания на растяжение по ГОСТ 28870–90. В качестве объекта исследования был выбран нижний пояс арки по оси 7 толщиной 20 мм (отправочная марка А13т), к которому привариваются проушины толщиной 36 мм для крепления V-образных стоек.

В связи с тем, что толщина нижнего пояса арки составляет 20 мм и не позволяет изготовить образец требуемой длины, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 28870–90 было изготовлено сварное соединение крестообразной формы, которое в дальнейшем разрезалось механическим способом на темплеты, из которых после шлифовки, травления и разметки изготавливались образцы на растяжение (рис. 2).

В результате проведенных испытаний было установлено, что среднее значение величины относительного сужения на образцах, вырезанных в направлении толщины проката ( $\psi_z$ ), составляет 9,3 % (табл. 3). При такой пластичности невозможно гарантировать отсутствие в металле сварных соединений ламеряных (слоистых) трещин, так как при  $\psi_z < 10$  % сталь считается склонной к данному виду разрушения [1, 2]. Согласно ГОСТ 28870–90 и СП 16.13330–2011 для элементов арочной фермы толщиной более 20 мм, воспринимающих растягивающие напряжения в направлении толщины, среднее значение  $\psi_z$  должна быть не менее 25 %.

О склонности исследуемой стали к ламеряному разрушению свидетельствует и характер разрушения испытанных образцов. На рис. 3 приведены фотографии поверхностей разрушения, на которых отчетливо видны характерные для ламеряного разрушения признаки. Это так называемые террасы – протяженные участки, на которых произошло отслаивание сульфидных включений

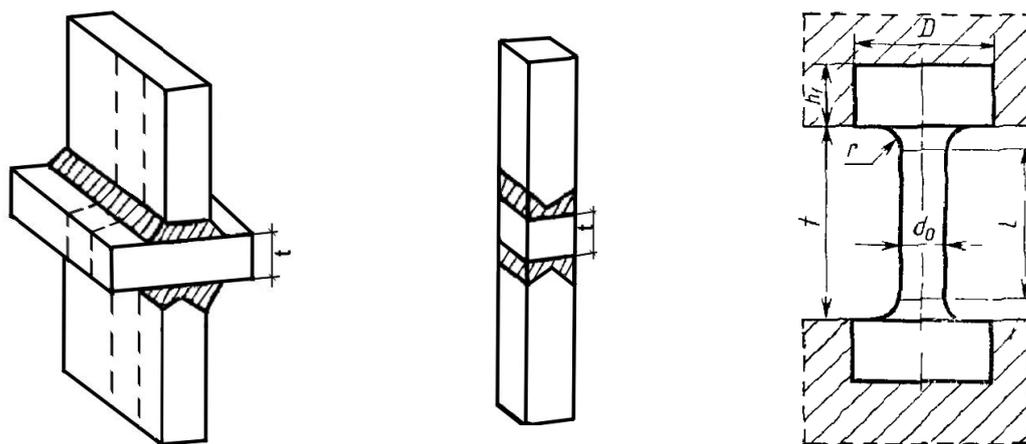


Рис. 2. Изготовления образцов на растяжение в направлении толщины проката

Таблица 3

Результаты механических испытаний образцов, ориентированных по толщине проката

Предел		Относительное	
текучести, Н/мм <sup>2</sup>	прочности, Н/мм <sup>2</sup>	удлинение, %	сужение, %
–	425	7,0	7,0
–	425	6,0	8,0
–	445	7,0	13,0

Примечание. Проба № 9 вырезана из нижнего пояса арки по оси 7.



Рис. 3. Общий вид поверхностей разрушения образца, испытанного на растяжение в направлении толщины проката

от металлической матрицы под воздействием напряжения, нормального к поверхности листа и стенки – участки, перпендикулярные поверхности излома, соединяющие между собой отдельные террасы, расположенные в разных плоскостях.

Для установления причин ограниченной свариваемости и низкой трещиностойкости стали были проведены металлографические исследования металла нижней полки арки и стенки затяжки. Фрактографическое исследование поверхности излома образца на электронном сканирующем микроскопе JSM 6490 показало, что микромеханизм его разрушения преимущественно вязкий (рис. 4). В изломе наблюдаются равноосные (ямочные) и вытянутые формы излома, внутри которых обнаружены неметаллические включения, представляющие собой сульфиды марганца (см. рис. 4, табл. 4).

Представленные на рис. 4 изображения могут

создать впечатление о чрезмерно высоком содержании включений в стали. Однако это не так. По данным [3] объемная доля включений не превышает 0,5 %, а их высокая концентрация на поверхности излома объясняется избирательным расположением включений и избирательностью самого разрушения. В данном случае разрушение произошло за счет зарождения и объединения небольших трещин, которые образовались вдоль плоских скоплений сульфидов марганца от остаточных сварочных напряжений, действующих в направлении толщины.

Аналогичный вид излома был зафиксирован при разрушении сварного соединения проушины с нижним поясом арки, что подтверждает вывод о склонности исследуемой стали к ламелярному (слоистому) разрушению при наличии значительных технологических или эксплуатационных напряжений в направлении толщины проката.

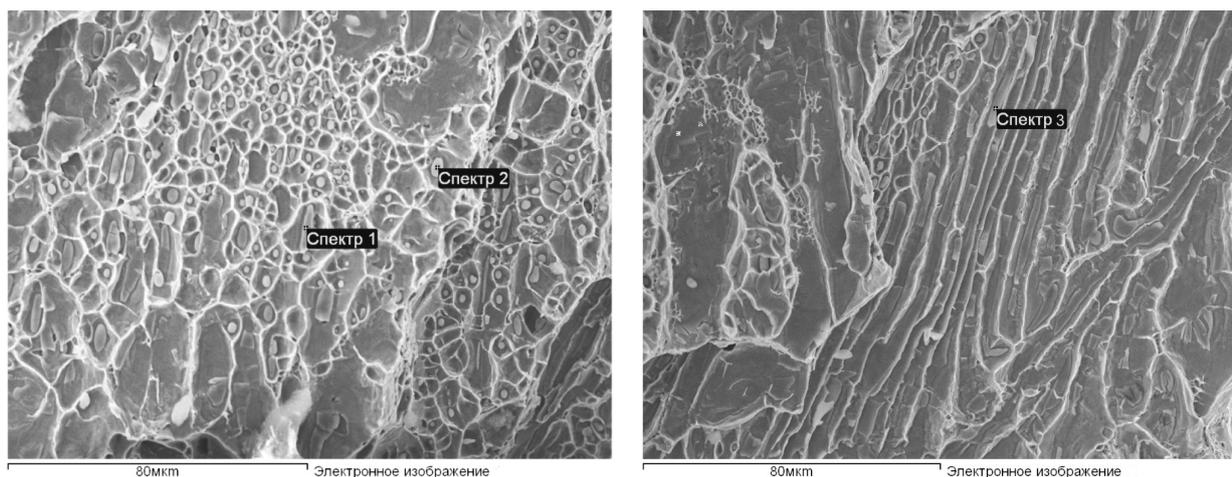


Рис. 4. Электронные изображения излома образца, испытанного на растяжение в направлении толщины проката

Химический анализ включений в изломе образца

Таблица 4

Спектр	Массовая доля элементов, %			
	S	Mn	Fe	Итог
Спектр 1	21,90	29,62	37,77	100,00
Спектр 2	39,08	53,22	7,69	100,00
Спектр 3	21,90	29,62	37,77	100,00

Из практики эксплуатации стальных конструкций следует, что для угловых, тавровых и крестовых сварных соединений, воспринимающих рабочие нагрузки в направлении толщины проката, отсутствие ламелярных трещин можно гарантировать при величине относительного сужения в направлении толщины не менее 25 %.

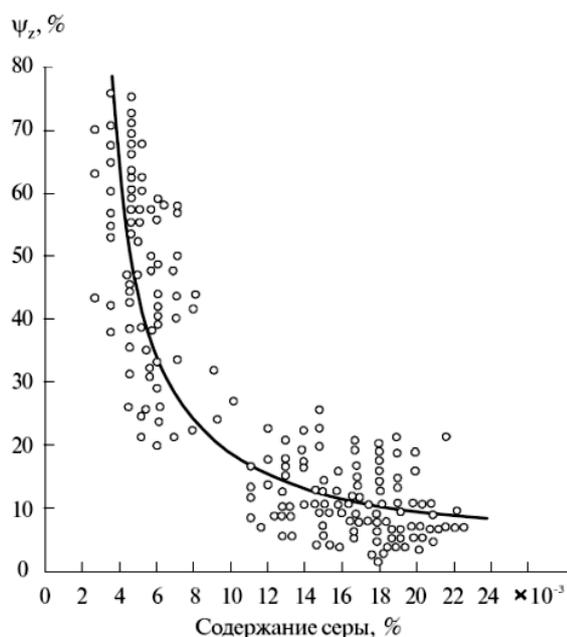


Рис. 5. Влияние содержания серы на величину  $\psi_z$  толстолистовой низколегированной стали [1]

Теоретически, даже по содержанию серы в пробах металла, можно предположить о склонности толстолистовой стали к слоистому разрушению (рис. 5). В частности, из рис. 5 следует, что при содержании серы в стали более 0,022–0,025 % величина  $\psi_z$  не превышает 10 %, в то время как в нашем случае требуется не менее 25 %.

Наряду с отмеченными конструктивными недостатками в сварных соединениях элементов арки были выявлены многочисленные недопустимые технологические дефекты в виде непроваров в корне шва, несплавления по кромкам и между валиками, которые были отнесены к критическим дефектам, снижающим несущую способность конструкции покрытия.

Для определения возможных причин ограниченной свариваемости и низкой сопротивляемости развитию трещины металла стенки затяжки были проведены металлографические исследования качества стали по ГОСТ 1778–70 (Ш1), ГОСТ 5639–82 и ГОСТ 5640–82 с использованием оптического микроскопа Axiovert 40MAT. Химический состав неметаллических включений определяли с помощью спектрального анализа.

В результате проведенных исследований установлено:

1. Микроструктура стали неоднородна по сечению и по длине проката и представляет собой феррито-перлитную с участками бейнита (рис. 6, а), а в некоторых случаях – феррито-бейнитную (рис. 6, б) структуру с твердостью по 167...181 HV.

## Строительные конструкции

2. Величина ферритного зерна по ГОСТ 5639–82 составляет 8-й, 9-й номер. Полосчатость микро-структуры в сечении образца по ГОСТ 5640–82 составляет 2-й, 3-й балл.

3. Средний балл неметаллических включений, представленных в виде точечных оксидов, сульфидов и недеформирующихся силикатов, не превышает 3 по ГОСТ 1778–70 (табл. 5).

4. На глубине 0,15–1,4 от поверхности метал-

ла выявлены строчки неметаллических включений в виде оксидов алюминия протяженностью 0,3–1,65 мм, что может оказать неблагоприятное влияние на свариваемость стали. Строчка с максимальной протяженностью  $l = 1,65$  мм обнаружена на глубине 0,15 мм от поверхности проката (рис. 7, а).

5. Одной из причин относительно низкой сопротивляемости металла стенки затяжки развитию трещины является наличие в нем структурной не-

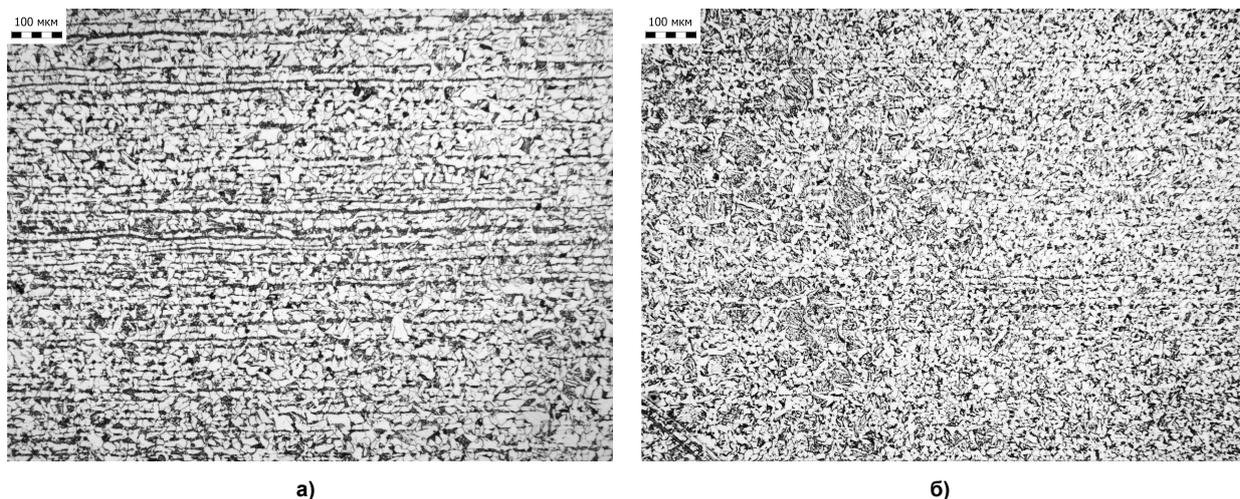


Рис. 6. Микроструктура пробы металла, вырезанной из стенки затяжки арочной фермы: а – феррито-перлитная структура с участками бейнита; б – феррито-бейнитная структура

Результаты оценки неметаллических включений по ГОСТ 1778–70

Таблица 5

Марка стали	Условный номер образца	Оценка в баллах		
		Оксиды точечные (ОТ)	Сульфиды (С)	Силикаты недеформирующиеся (СН)
09Г2С	1	3	3	1
	2	3	2,5	1
	3	3	2	1
	4	3	3	1
Средний балл		3	2,6	1

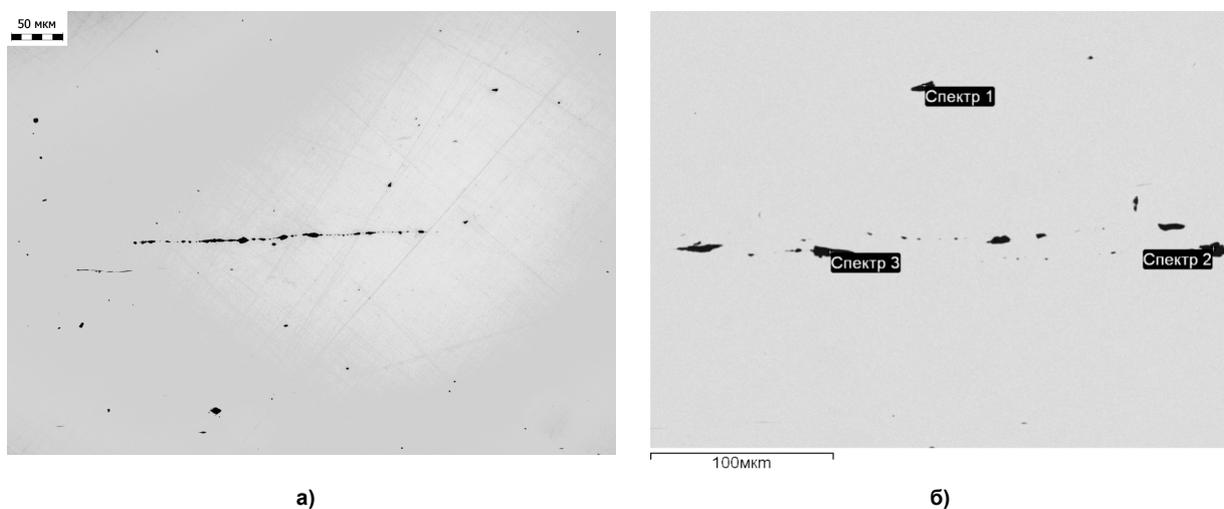


Рис. 7. Строчка неметаллических включений вблизи поверхности пробы металла, вырезанной из стенки затяжки: а – оптическая микроскопия; б – электронная микроскопия

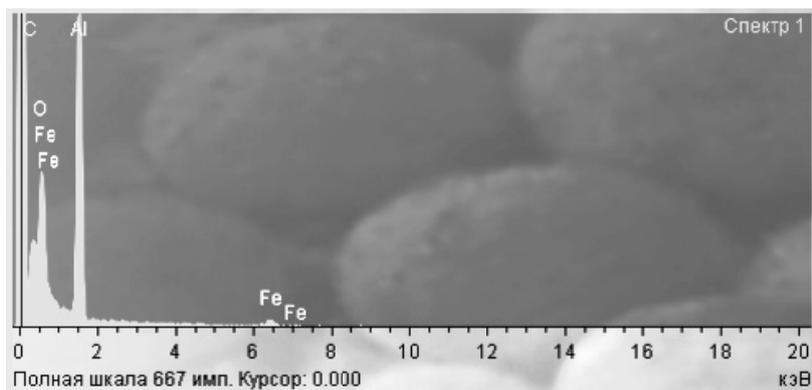


Рис. 8. Характерный химический состав неметаллических включений в поверхностном слое стенки затяжки (спектр № 1)

однородности и строчек хрупких неметаллических включений в виде оксидов алюминия (рис. 7, б, 8).

На основании проведенных исследований было установлено:

1. При проектировании особо опасных, технически сложных и уникальных объектов необходимо проводить теоретический анализ их действительной работы с выработкой рекомендаций по расчету, конструированию, технологии изготовления и монтажа конструкций, которые должны способствовать обеспечению высокой надежности и экономичности конструкций покрытия. В отношении рассматриваемого объекта данный анализ не проводился, поэтому все выявленные недостатки, приведшие к неработоспособному состоянию покрытия, возникли в результате назначения неоптимальной геометрии арочной фермы с большими изгибающими моментами в верхнем поясе и распором в затяжке, принятия конструкции отдельных узлов с повышенной концентрацией напряжений и остаточными сварочными напряжениями, а также ошибок, допущенных при выборе и последующей замене марки стали.

2. Наличие структурной и механической неоднородности металлопроката привело к ограничению его свариваемости, возникновению слоистого разрушения и многочисленным недопустимым несплавлениям в монтажных стыках отправочных марок. Причина такой неоднородности микроструктуры обусловлена переменной концентрацией химических элементов по толщине листа

и свидетельствует о необходимости ужесточения нормативных требований к качеству металлопроката для ответственных строительных конструкций по показателям неметаллических включений. Достижение этих требований может быть осуществлено за счет внедрения современных технологий внепечной обработки стали.

3. Для предотвращения аналогичных ошибок проекты уникальных, технически сложных и особо опасных объектов должны выноситься на обсуждение всеми участниками строительства с привлечением компетентных научно-исследовательских организаций. Реализация таких проектов должна осуществляться по специальным техническим условиям при обязательном научно-техническом сопровождении объекта на всех этапах его жизненного цикла.

#### Литература

1. *Металлические конструкции. Справочник проектировщика: в 3 т. Т. 1. Общая часть / под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 576 с.*
2. *Гривняк, И. Свариваемость сталей / И. Гривняк; пер. со словац. Л.С. Гончаренко; под. ред. Э.Л. Макарова. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.*
3. *Гладштейн, Л.И. Слоистые разрушения сварных соединений стальных строительных конструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2007. – № 9. – С. 2–8.*

Поступила в редакцию 15 декабря 2011 г.