

Received: 20.10.2023

Revised: 25.12.2023

Accepted: 29.12.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.175-188



COMPARING THE RESULTS OF TESTING A LONGITUDINAL TUBE WELD BY NONDESTRUCTIVE METHODS


A. S. Shleenkov^{1, a)}, D. V. Novgorodov^{1, b), *}, and Yu. B. Sobakinsky^{2, c)}

¹*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

²*Vyksa Metallurgical Plant JSC, Branch in Almetyevsk,
35 Industrialnaya St., Almetyevsk, the Republic of Tatarstan, 423450, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0002-6135-1504>  shleenkov@imp.uran.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-5151-8710>  novgorodov@imp.uran.ru;

c)  onmk@mail.ru

*Corresponding author. Email: novgorodov@imp.uran.ru
Address for correspondence: ul S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia

Defects of longitudinal tube welds identified by X-ray inspection are studied in order to determine possible causes of their occurrence and to assess the reliability of nondestructive testing results. Metallographic analysis shows that the base metal and weld metal meet the requirements of regulatory documents. The strength properties and the chemical composition conform to the standards. The contamination with non-metallic inclusions in the segregation streamers of the sheet extending to the edge and falling into the fusion zone was detected in X-ray photographs and incorrectly interpreted as a defect. This assumption is based on the correlation of X-ray patterns with the position of the grooves in the zones of the studied welded joints, but it ignores the results of studying by other nondestructive testing methods, and most importantly, it is not confirmed by metallographic studies. Neither were these defects found in the tubes during magnetic flaw detection by means of a UMD-101M device in the line of production of longitudinally electric-welded tubes. Erroneous defect identification during X-ray inspection happens in tube making. The results of the study show the expediency of the integrated application of different testing methods for a reliable assessment of the quality of tubes or pipes of both small and large diameters.

Keywords: weld, defect, testing methods, structure, metallography, chemical analysis

Acknowledgment

The work was carried out under the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme Diagnostics, No. 122021000030-1).

References

1. GOST 1050–2013. (In Russian).
2. GOST 10705–80. (In Russian).
3. Shleenkov, A.S., Bulychev, O.A., Shleenkov, S.A., and Novgorodov, D.V. The UMD–101MK flaw detection equipment for automated magnetic inspection of electrically welded small and medium pipes over the entire wall thickness and perimeter. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2019, 6, 87–101. DOI: 10.17804/2410-9908.2019.6.087-101. Available at: http://dream-journal.org/issues/2019-6/2019-6_267.html
4. Shleenkov, A.S., Bychkov, V.G., Bulychev, O.A., Lyadova, N.M., and Shcherbinin, V.E. Estimating the possibility of the magnetic detection of microflaws in weld seams of longitudi-

- nal electric-welded pipes manufactured by butt high-frequency welding. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46, 92–97. DOI: 10.1134/S1061830910020038.
5. Shleenkov, A.S., Bulychev, O.A., and Shleenkov, S.A. The UMD–101M plant for automated bulk magnetic nondestructive testing of quality of electric-welded pipes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, 44, 574–578. DOI: 10.1134/S106183090808010X.
 6. Kruglova, G.V., Knyazyuk, L.V., and Kortov, V.S. Determination of faulty-fusion dimensions in a cross section of a welded seam by radiographic testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, 41, 251–255. DOI: 10.1007/s11181-005-0158-x.
 7. Kruglova, E.V. and Knyazyuk, L.V. Determination of welded joint flaw dimensions on the basis of scanned X-ray images. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2004, 40, 57–60. DOI: 10.1023/B:RUNT.0000036430.21233.f3.
 9. Tarasov, S.Yu., Rubtsov, V.E., Kolubaev, E.A., Gnyusov, S.F., and Kudinov, Yu.A. Radioscopy of remnant joint line in a friction stir welded seam. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, 51, 573–579. DOI: 10.1134/S1061830915090090.
 10. Kudoyarov, R.U., Bagin, A.S., and Mogilner, L.Yu. Increasing the detection of defects in welds of large-diameter pipes in the conditions of manufacturing plants. *Nauka i Tekhnologii Truboprovodnogo Transporta Nefti i Nefteproduktov*, 2016, 4, 78–83. (In Russian).
 11. GOST 5640–68. (In Russian).
 12. GOST 8233–56. (In Russian).
 13. GOST 5639–82. (In Russian).
 14. GOST 1778–70. (In Russian).
 15. Mokrousov, V.I. Influence of a defect in the external chamfer of a longitudinal weld on the strength of a steel pipe. *Sovremennye Tendentsii Razvitiya Nauki i Tekhnologii*, 2016, 2–3, 67–74. (In Russian).
 16. Vyboishchik, L., Sopin, N., Kolosovsky, M., Ermolchik, E., and Abuzdin, A. The influence of post-welding treatment on the mechanical and corrosion properties of VChS welded joints. *Tekhnadzor*, 2015, 12 (109), 594–595. (In Russian).
 17. Zakharova, I.V., Royanov, V.A., and Dushenin, S.S. Analysis of the influence of non-metallic inclusions and microstructure on the quality of welded joints of pipe steel. *Nauka ta Virobnitstvo*, 2018, 19, 88–97. (In Russian).
 18. Khudyakov, M.A., Muftakhov, M.Kh., Berdin, V.K., Zakirnichnaya, M.M. The influence of a segregation streamer on stress distribution in a pipe wall. *Neftegazovoe Delo*, 2006, 2, 68. (In Russian). Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Hudyakov/Hudyakov_1.pdf
 19. Makarenko, V.D., Vinnikov, Yu.L., Nogina, A.M., and Petrenko, O.O. Research of the microstructure of the welding doped molybdenum on steel 20K. *Problemy Tertya ta Zashuvannya*, 2020, 1 (86), 98–107. (In Ukrainian). DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14496.
 20. Fedoseeva, E.M. Influence of structure and nonmetallic inclusions on properties of welded seams from Kh65 steel. *Vestnik PNIPU*, 2015, 17 (4), 76–87. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.06.
 21. Polevoy, E.V., Kozyrev, N.A., Shevchenko, R.A., and Usoltsev, A.A. Study of non-metallic inclusions composition in rail joints welded seams, obtained at their contact arc welding. *Chernaya Metallurgiya*, 2020, 76 (3), 251–256. (In Russian). DOI: 10.32339/0135-5910-2020-3-251-256.



Подана в журнал: 20.10.2023
УДК 620.184:620.179.18
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.175-188



СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ПРОДОЛЬНОГО СВАРНОГО ШВА ТРУБЫ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ


А. С. Шлеенков^{1, а)}, Д. В. Новгородов^{1, б), *}, Ю. Б. Собакинский^{2, в)}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620137, Россия

²Филиал акционерного общества «Выксунский металлургический завод» в г. Альметьевск,
ул. Индустриальная, 35, г. Альметьевск, Республика Татарстан, 423450, Россия

а)  <https://orcid.org/0000-0002-6135-1504>  shleenkov@imp.uran.ru;

б)  <https://orcid.org/0000-0002-5151-8710>  novgorodov@imp.uran.ru;

в)  onmk@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: novgorodov@imp.uran.ru
Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108, Россия

Исследование выявленных при рентгеновском контроле дефектов продольного сварного шва труб было выполнено с целью определения возможных причин их возникновения, а также оценки достоверности результатов неразрушающего контроля. Металлографический анализ показал соответствие основного металла и сварного шва требованиям нормативных документов. Прочностные свойства и химический состав соответствуют стандартам. Загрязненность неметаллическими включениями в ликвационных полосах листа, выходящих на кромку и попадающих в зону сплавления, была выявлена на рентгенограммах и некорректно интерпретирована как дефект. Данное предположение основано на корреляции картин рентгеновских снимков с положением канавок в зонах исследованных сварных соединений, но оно не учитывает результаты исследований другими методами неразрушающего контроля, а самое главное – не подтверждается металлографическими исследованиями. Также указанные дефекты не были обнаружены при магнитной дефектоскопии данных труб с помощью установки УМД-101М в технологической линии производства прямошовных электросварных труб. Ошибочная идентификация дефектов при рентгеновском контроле возникает при производстве труб. Результаты работы показывают целесообразность комплексного применения различных методов контроля для достоверной оценки качества труб как малого, так и большого диаметров.

Ключевые слова: сварной шов, дефект, методы контроля, структура, металлография, химический анализ

1. Введение

Проблема качественного и достоверного неразрушающего контроля (НК) продольных швов электросварных труб является острой и актуальной. Новизна проделанной работы состоит в том, что в статье приведены новые данные, представляющие научный интерес, поскольку отражают недостатки применения только одного вида НК. Работа имеет научную и практическую значимость с точки зрения доказательства необходимости перепроверки достоверности результатов НК продольных сварных швов, полученных рентгенографическим методом, другими высокоэффективными методами контроля, например магнитной дефектоскопией.

Работа имела целью:

- произвести визуально-измерительный контроль (ВИК), металлографическое исследование сварного шва и основного металла, химический анализ и определить размеры обнаруженных дефектов на образцах труб рентгенографическим методом;
- подтвердить достоверность результатов применения неразрушающего магнитного контроля (МК) и доказать его эффективность;
- показать целесообразность применения различных методов контроля.

2. Объекты анализа и методы исследования

Объектом исследования являлись образцы (темплеты длиной 200 мм) прямошовных электросварных (ВЧС) труб $\varnothing 159 \times 6,0$ из стали марки 20 ГОСТ 1050-2013 [1], изготовленные по ГОСТ 10705-80 [2], в которых при рентгенографическом контроле предположительно были обнаружены непровары и трещины в сварном шве, при этом сварные соединения выдержали механические испытания на прочность. Кроме этого, указанные дефекты не были обнаружены при магнитной дефектоскопии данных труб с помощью установки магнитной дефектоскопии УМД-101М в технологической линии производства прямошовных электросварных труб [3–5].

Общий вид образцов труб, переданных для металлографических исследований, показан на рис. 1. Это два темплета из труб длиной 200 мм (образцы 1.2 и 2.2) и образец с макрошлифом, вырезанный из темплета 1.5. Рентгеновский контроль (РК) – самый распространенный метод контроля сварного соединения. Верная интерпретация полученных результатов необходима для оценки размеров и принятия решения об отбраковке [6, 7]. В работах [8, 9] отмечено, что ложная идентификация приводит к перебраковке. Дефектные места в сварном соединении, определенные по данным расшифровки рентгенограмм для темплета 1.2, демонстрирует схема (рис. 2). На темплете 2.2 проекции двух дефектных зон отмечены белым маркером непосредственно на внешней поверхности сварного шва (рис. 1 в). На рис. 1 г представлен общий вид образца с макрошлифом, подготовленным из темплета 1.5, демонстрирующим дефекты в виде пор и трещины в основном металле.

Места вырезки образцов из дефектных зон темплетов 1.2 и 2.2 для проведения металлографического исследования, а также химического анализа основного металла труб показаны на рис. 1 а, в. Рисунок 3 демонстрирует общий вид образцов, подготовленных для исследований. Образцам присвоены следующие номера:

- образец № 1 размером 20×30 мм вырезан из краевой зоны основного металла темплета 1.2 для проведения химического анализа;
- образец № 2 размером 20×35 мм вырезан из краевой зоны основного металла темплета 2.2 для проведения химического анализа;
- образец № 1.2-1 размером 20×40 мм вырезан из дефектной зоны темплета 1.2 на расстоянии 38 мм от торца темплета;
- образец № 1.2-2 размером 25×45 мм вырезан из дефектной зоны темплета 1.2 на расстоянии 100 мм от торца темплета.

Объем проведенных лабораторных исследований включал:

- визуально-измерительный контроль внешнего состояния образцов представленных труб с установлением корреляции положения дефектных зон с данными рентгеновских снимков;
- определение химического состава материала труб (образцы № 1 и 2) методом спектрального анализа с использованием эмиссионного спектрометра «Аргон-5СФ»;
- металлографические макро- и микроструктурные исследования дефектных зон сварных соединений и основного металла труб. Исследования проводились по шлифам, подготовленным в плоскости поперечных сечений дефектных зон сварных швов на образцах № 1.2-1, 1.2-2, 2.2-1, 2.2-2 и 1.5 с использованием стереоскопического микроскопа «Цитоваль» и

металлографических микроскопов Neophot 21 и Neophot 32 (Carl Zeiss Jena, Германия, увеличение до 1000 крат).

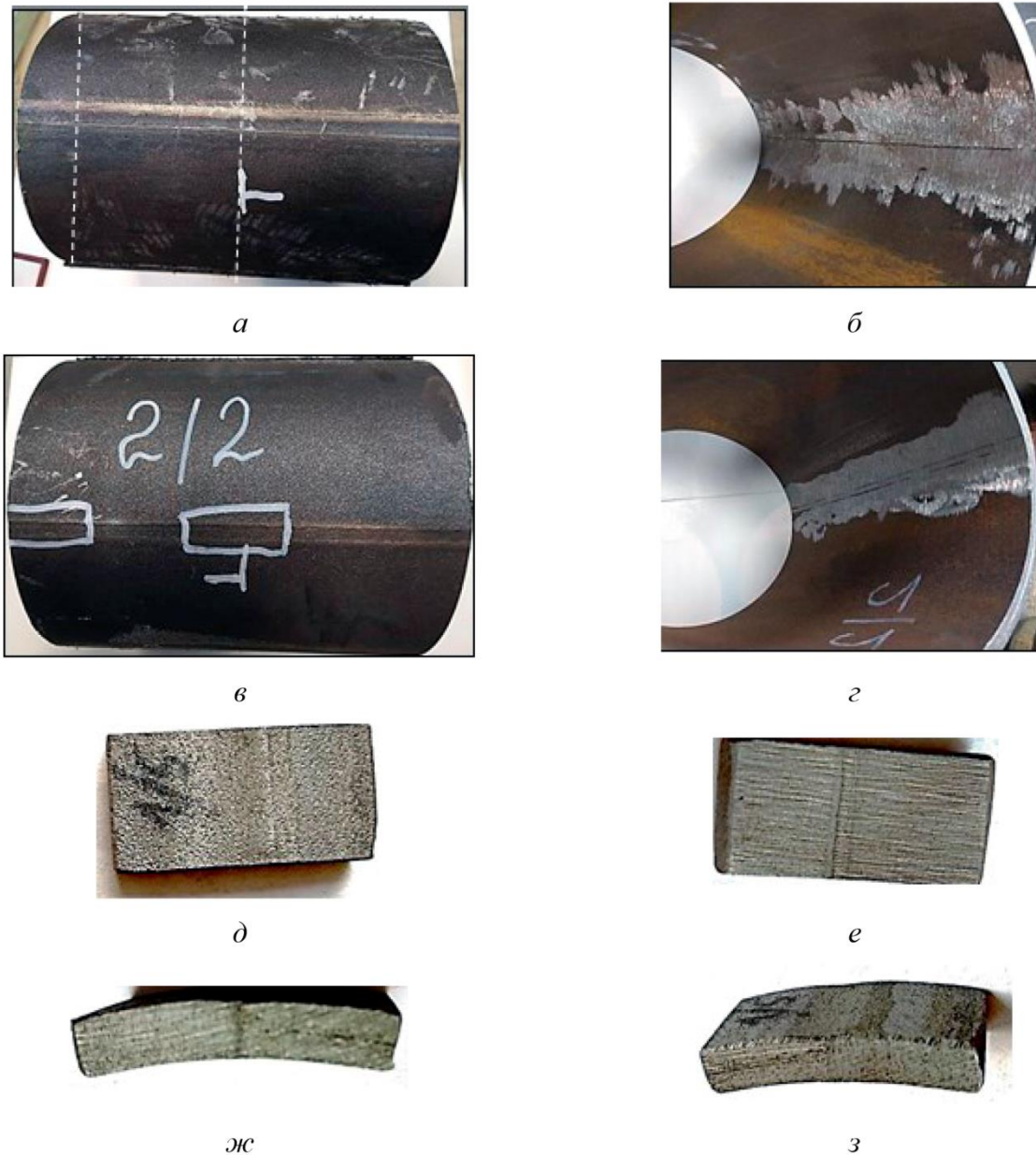


Рис. 1. Общий вид образцов труб, представленных для исследований:
a – внешняя поверхность зоны сварного соединения темплета из трубы 1.2 (белыми пунктирными линиями показаны сечения выборки образцов для металлографического исследования); *б* – внутренняя поверхность зоны сварного соединения темплета из трубы 1.2; *в* – внешняя поверхность зоны сварного соединения темплета из трубы 2.2 (белыми линиями показаны места выборки образцов для металлографического исследования); *г* – внутренняя поверхность зоны сварного соединения темплета трубы 2.2;
д, е, ж, з – общий вид вырезанных образцов темплета 1.5

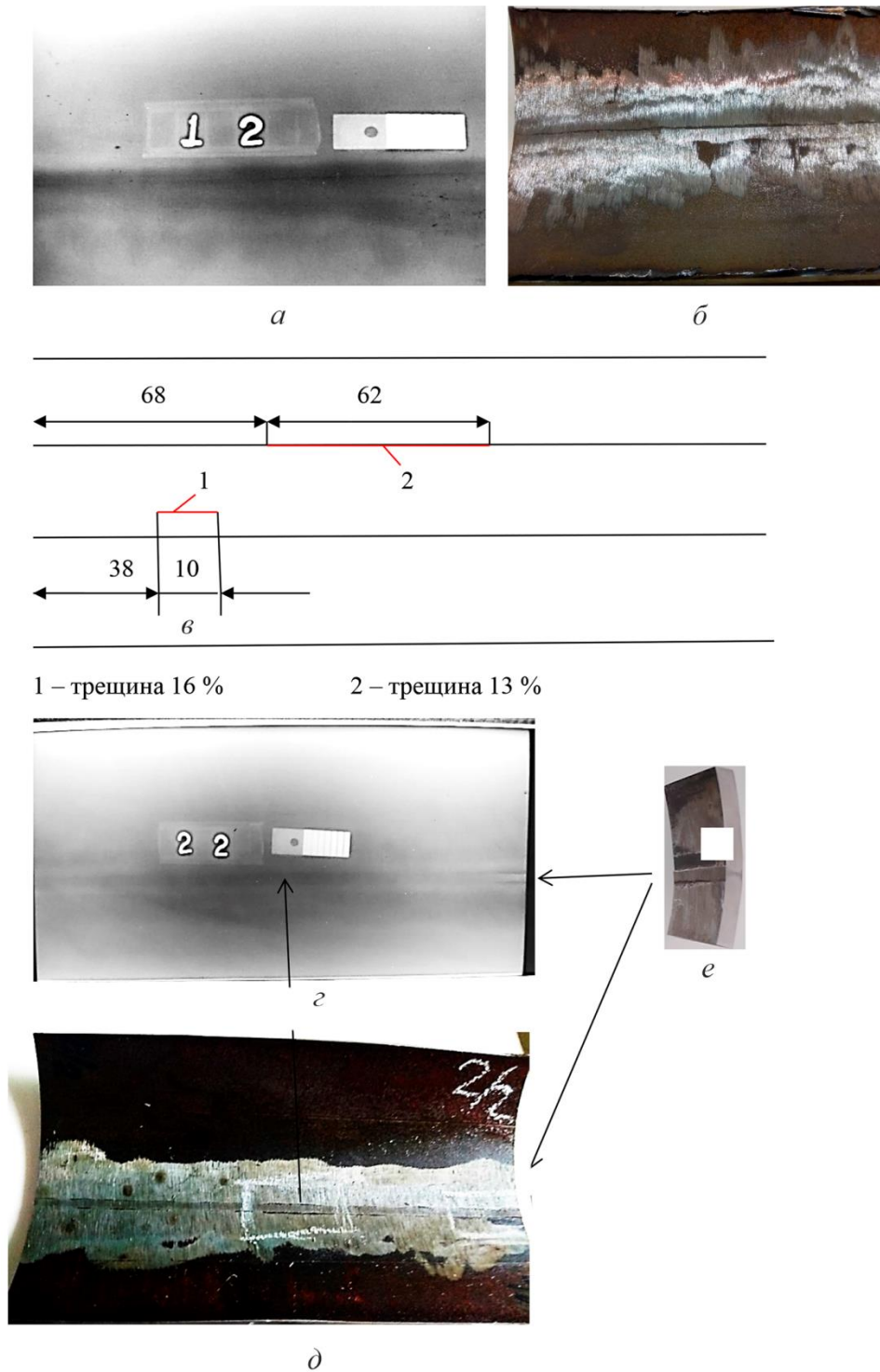
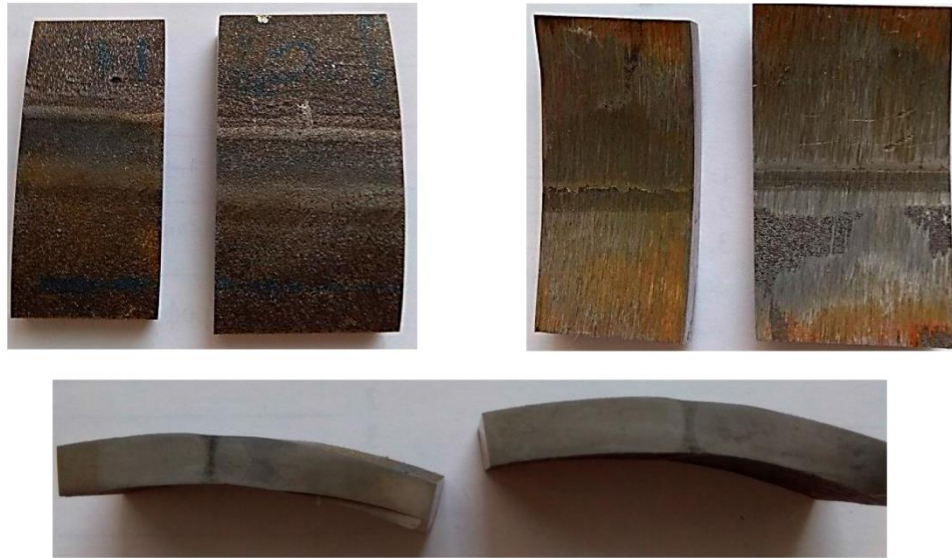


Рис. 2. Корреляция рентгеновских снимков с околошовными дефектами на внутренней поверхности сварных соединений образцов труб: *a* – рентгеновский снимок зоны сварного соединения темплета из трубы 1.2; *б* – канавка на внутренней поверхности вдоль границы сварного соединения темплета трубы 1.2, коррелирующая с темной полосой на рентгенограмме; *в* – схема расположения трещины на внутренней поверхности сварного соединения темплета трубы 1.2; *г* – рентгеновский снимок зоны сварного соединения темплета из трубы 2.2; *д*, *е* – канавки на внутренней поверхности трубы вдоль границы сварного соединения темплета из трубы 2.2, коррелирующие с темными полосами на рентгенограмме



a



б

Рис. 3. Общий вид образцов, подготовленных для исследований:
a – образцы темплета 1.2: № 1.2-1 и 1.2-2; *б* – образцы темплета 2.2: № 2.2-1 и 2.2-2

Подготовка шлифов включала механическую шлифовку и полировку. Для выявления металлографической структуры использован 4 %-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Феррито-перлитная структура оценивалась в соответствии с ГОСТ 5640-68 [10] и ГОСТ 8233-56 [11], размер ферритных зерен определялся в соответствии с ГОСТ 5639-82 [12].

Оценка загрязненности металла неметаллическими включениями проводилась на не-травленных шлифах образцов по ГОСТ 1778-70 [13] (метод Ш) при увеличении $\times 100$. Допол-

нительно проведен спектральный микроанализ состава включений образца № 1.5 на растровом электронном микроскопе Quanta 200 с энергодисперсионным спектрометром EDAX для элементного анализа.

3. Результаты исследования

3.1 Визуально-измерительный контроль внешней и внутренней поверхностей исследуемых образцов труб

Визуально-измерительный контроль на внешней и внутренней поверхностях исследуемых образцов труб проводился с целью выявления дефектных зон, коррелирующих с картиной рентгеновских снимков. Общий вид исследуемых образцов представлен на рис. 1. Копии рентгеновских снимков с исследуемых образцов труб продемонстрированы на рис. 2.

При визуальном обследовании и обследовании с помощью стереоскопического микроскопа «Цитоваль» (увеличение до $\times 100$) внешней поверхности зон сварных соединений на темплетях 1.2 и 2.2 каких либо дефектов (трещин, непроваров, раковин), уменьшающих толщину стенки трубы за пределы допуска (более 10 %), не выявлено. На внутренней поверхности по всей длине темплетов в зоне сварных соединений имеются следы механической зачистки поверхности (после проведенной рентгеноскопии внутреннего грата), ориентированные перпендикулярно сварному шву. При этом вдоль границ снятого грата видны протяженные канавки, глубина которых переменна. В работах [14, 15] указано, что подобные дефекты могут влиять на несущую способность трубы. В сечениях образцов, подготовленных для металлографических исследований, глубина канавок не превышает 300 мкм, что находится в пределах допуска (10 %), установленного ГОСТ 10705-80 [2], толщина стенок исследуемых труб составляет 6 мм. На темплете 1.2 канавка располагается с одной стороны сварного шва практически вдоль всей длины темплета, ее длина составляет 190 мм. На темплете 2.2 с двух сторон шва наблюдаются прерывистые канавки разной длины и ширины. Положение внешних границ сварного шва в полосах остаточного грата выявлялось путем травления поперечных срезов образцов.

Обследование поверхностей представленного темплета из трубы 1.5 с зоной сварного соединения, подвернутого грубой зачистке торцевых поверхностей с последующим полным погружением в реактив для макротравления (10-процентный водный раствор азотной кислоты), позволяет сделать выводы относительно отсутствия недопустимых дефектов в сварном шве представленного образца, аналогичные результатам обследований темплетов 1.2 и 2.2. На внутренней поверхности наблюдается канавка по границе снятого внутреннего грата. В основном металле образца, в центральной части сечения, наблюдается полоса строчечной сегрегации неметаллических включений ликвационной полосы, унаследованной от слитка, использованного для прокатки листов. Таким образом, результаты лабораторного визуального контроля подтверждают результаты МК и опровергают результат РК.

3.2. Определение элементного (химического) состава материала исследуемых образцов труб

Результаты определения химического состава материала труб, проведенного на образцах № 1 (темплет 1.2) и 2 (темплет 2.2) методом спектрального анализа на эмиссионном спектрометре «Аргон-5СФ», показали, что материал исследуемых образцов труб соответствует стали марки 20 по ГОСТ 1050-2013 [1]. В таблице представлено сравнение полученных данных с ГОСТ 1050-2013 [1].

Таблица

Химический анализ основного металла

Образец	Химические элементы, %										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	As	Al	Fe
№ 1	0,198	0,22	0,48	0,004	0,005	0,026	0,038	0,044	0,003	0,045	Осн.
№ 2	0,174	0,22	0,49	0,005	0,004	0,030	0,033	0,042	0,001	0,041	Осн.
Сталь 20, ГОСТ 1050-88	0,17– 0,24	0,17– 0,37	0,00– 0,30	0,00– 0,04	0,00– 0,03	≤0,25	≤0,03	≤0,03	≤0,08	–	Осн.

3.3. Металлографический анализ структурного состояния сварных соединений и основного металла образцов исследуемых труб

С помощью стереоскопического микроскопа «Цитоваль» при увеличении до 100 крат на поперечных шлифах темплетов 1.2 и 2.2 и образца 1.5 было проведено исследование структуры основного металла и зоны сварного соединения на предмет наличия внутренних трещин, непроваров, раковин и других недопустимых дефектов. В результате анализа структур недопустимые дефекты в исследованных объектах не обнаружены.

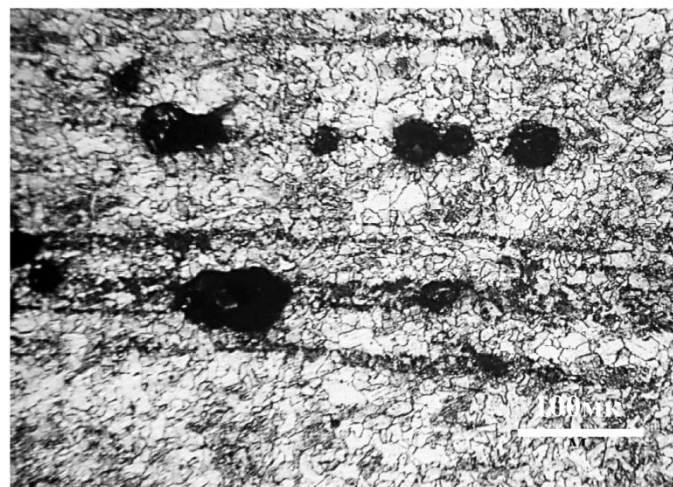
Микроструктурное состояние основного металла и сварных соединений исследуемых труб показано на рисунках 4 и 5.

Наблюдаемая феррито-перлитная структура горячекатаной стали 20 в сечениях исследуемых образцов неоднородна как по содержанию и размерам перлитных колоний (от 1 до 6 баллов по ГОСТ 8233-56) [11], так и по состоянию ферритной фазы; направленности ферритных зерен практически нет; в отдельных зонах наблюдается видманштеттова структура. В зоне сварного шва – феррит в равновесном (нормализованном) состоянии с размером зерен 8–10 баллов по ГОСТ 5639-82 [12]. Перлит зернистый, в виде крупных колоний, вытянутых вдоль границ стыкуемых кромок труб. Структура металла околошовной зоны одной из кромок шва темплетов 1.2 и 1.5 сорбитообразная. Структурные исследования подтверждают результаты, полученные при МК и ВИК. Таким образом, структурные исследования опровергают данные РК. Ложная идентификация дефекта при РК указывает на необходимость комплексного применения различных методов дефектоскопии на производстве и при строительных работах.

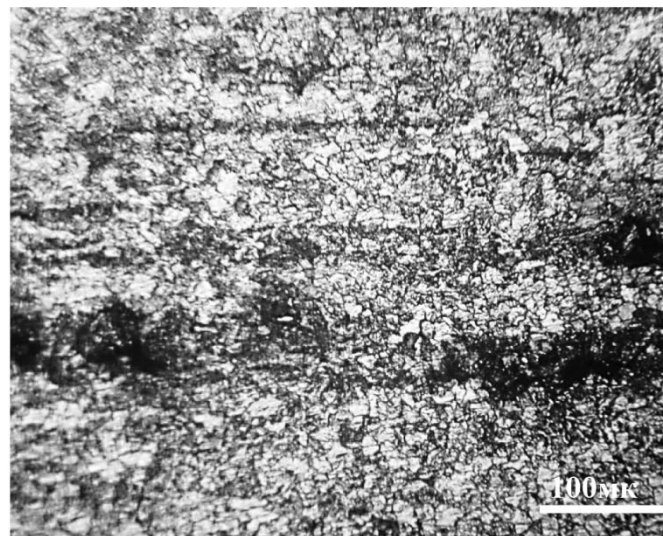
Неоднородность фазового состава металла образцов характеризуется ликвационными полосами, обогащенными сегрегациями мелких и крупных простых и сложных неметаллических оксидных включений (корунда, шпинелей), вытянутых вдоль направления прокатки и частично входящих в металл зоны сплавления, что, несомненно, влияет на качество сварного соединения [16–20]. В отдельных зонах металла труб наблюдаются глобулы силикатных включений. На рис. 6 укрупненно показаны неметаллические включения, наблюдаемые в ликвационной полосе образца 1.5.



a



б



в

Рис. 4. Микроструктура основного металла (сталь 20) исследуемых образцов труб:
a – нетравленный шлиф, загрязненность оксидными включениями; *б* – неоднородная горячекатанная феррито-перлитная структура, ликвационные полосы с сегрегациями мелких и крупных неметаллических оксидных включений (*a, б* – темплет 1.2); *в* – темплет 2.2

Структура стали темплетов 1.2 и 2.2. аналогична.

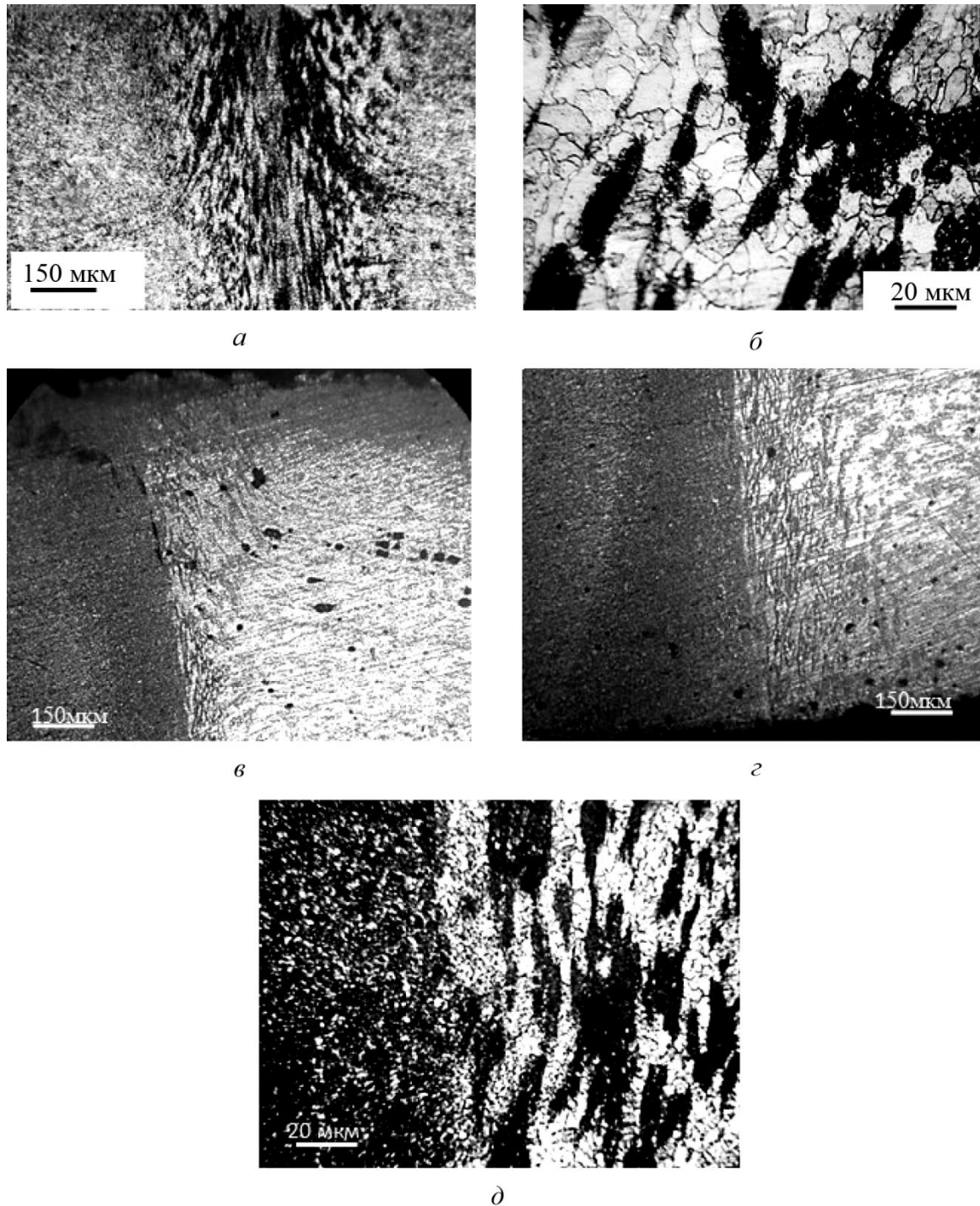


Рис. 5. Микроструктура сварных соединений исследуемых образцов труб:
а, б – феррито-перлитная структура стали 20 в сварном шве на темплете 2.2;
в, г – сварной шов на темплете 1.5; д – зона сплавления на темплете 1.2

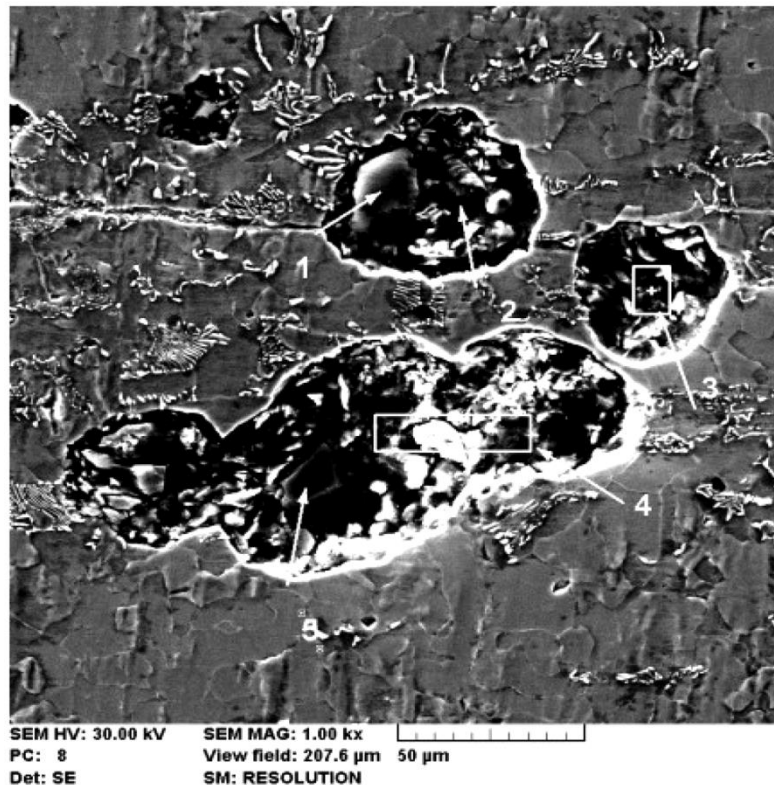


Рис. 6. Элементный состав неметаллических частиц в ликвационной полосе образца 1.5 (Quanta 200, энергодисперсионный спектрометр EDAX)

Общая загрязненность основного металла и металла в зонах сварного шва исследуемых труб составляет 3 балла и более по ГОСТ 1778-70 [13]. В отдельных зонах загрязненность неметаллическими включениями превышает 5 баллов по ГОСТ 1778-70 [13].

4. Заключение

При визуальном обследовании и обследовании с помощью стереоскопического микроскопа (увеличение до $\times 100$) внешней поверхности зон сварных соединений труб каких-либо дефектов (трещин, непроваров, раковин), выводящих толщину стенок труб за пределы допуска (более 10 %), не выявлено. Наблюдаемые канавки вдоль границ сварных швов внутренней поверхности труб, образованные наплывами внутреннего грата под стенкой труб, при рентгенографическом контроле были интерпретированы как дефекты сварного шва. Очевидно, данное ошибочное предположение основано на корреляции картин рентгеновских снимков с положением канавок в зонах исследованных сварных соединений. По химическому составу основной металл исследованных образцов труб соответствует стали 20 по ГОСТ 1050-2013 [1]. Структурное состояние сварного шва и зоны сплавления не обнаруживает дефектов, указывающих на нарушение технологии формирования ВЧС-шва. Результаты контроля электросварных труб радиографическим методом не подтверждаются результатами визуально-измерительного контроля, металлографических исследований и магнитного контроля, поэтому трубы признаны пригодными для промышленного применения.

Результаты работы показывают целесообразность комплексного применения различных методов контроля для достоверного выявления имеющихся недопустимых дефектов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (шифр «Диагностика», № 122021000030-1).

Литература

1. ГОСТ 1050–2013.
2. ГОСТ 10705–80.
3. The UMD–101MK flaw detection equipment for automated magnetic inspection of electrically welded small and medium pipes over the entire wall thickness and perimeter / A. S. Shleenkov, O. A. Bulychev, S. A. Shleenkov, D. V. Novgorodov // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2019. – Iss. 6. – P. 87–101. – DOI: 10.17804/2410-9908.2019.6.087-101. – URL: http://dream-journal.org/issues/2019-6/2019-6_267.html
4. Estimating the possibility of the magnetic detection of microflaws in weld seams of longitudinal electric-welded pipes manufactured by butt high-frequency welding / A. S. Shleenkov, V. G. Bychkov, O. A. Bulychev, N. M. Lyadova, V. E. Shcherbinin // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2010. – Vol. 46. – P. 92–97. – DOI: 10.1134/S1061830910020038.
5. Shleenkov A. S., Bulychev O. A., Shleenkov S. A. The UMD–101M plant for automated bulk magnetic nondestructive testing of quality of electric-welded pipes // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2008. – Vol. 44. – P. 574–578. – DOI: 10.1134/S106183090808010X.
6. Kruglova G. V., Knyazyuk L. V., Kortov V. S. Determination of faulty-fusion dimensions in a cross section of a welded seam by radiographic testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2005. – Vol. 41. – P. 251–255. – DOI: 10.1007/s11181-005-0158-x.
7. Kruglova E. V., Knyazyuk L. V. Determination of welded joint flaw dimensions on the basis of scanned X-ray images // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2004. – Vol. 40. – P. 57–60. – DOI: 10.1023/B:RUNT.0000036430.21233.f3.
8. Radioscopy of remnant joint line in a friction stir welded seam / S. Yu. Tarasov, V. E. Rubtsov, E. A. Kolubaev, S. F. Gnyusov, Yu. A. Kudinov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2015. – Vol. 51. – P. 573–579. – DOI: 10.1134/S1061830915090090.
9. Кудояров Р. У., Багин А. С., Могильнер Л. Ю. Повышение выявляемости дефектов сварных швов труб большого диаметра в условиях заводов-изготовителей // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2016. – № 4. – С. 78–83.
10. ГОСТ 5640–68.
11. ГОСТ 8233–56.
12. ГОСТ 5639–82.
13. ГОСТ 1778–70.
14. Мокроусов В. И. Влияние дефекта внешней фаски продольного сварного шва на прочность стальной трубы // *Современные тенденции развития науки и технологий*. – 2016. – № 2–3. – С. 67–74.
15. Влияние послесварочной обработки на механические и коррозионные свойства сварных соединений ВЧС / Л. Выбойщик, Н. Сопин, М. Колосовский, Е. Ермольчик, А. Абуздин // *Технадзор*. – 2015. – № 12 (109). – С. 594–595.
16. Захарова И. В., Роянов В. А., Душенин С. С. Анализ влияния неметаллических включений и микроструктуры на качество сварных соединений стали трубного назначения // *Наука та виробництво*. – 2018. – Вып. 19. – С. 88–97.
17. Влияние ликвационной полосы на распределение напряжений в стенке трубы / М. А. Худяков, М. Х. Муфтахов, В. К. Бердин, М. М. Закирничная // *Нефтегазовое дело*. – 2006. – № 2. – С. 68. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Hudyakov/Hudyakov_1.pdf

18. Дослідження мікроструктури зварювального шва, легованого молібденом, на сталі 20К / В. Д. Макаренко, Ю. Л. Винников, А. М. Ногіна, О. О. Петренко // Проблеми тертя та зношування. – 2020. – № 1 (86). – С. 98–107. – DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14496.
19. Федосеева Е. М. Влияние структуры и неметаллических включений на свойства сварных швов из стали Х65 // Вестник ПНИПУ. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 76–87. – DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.06.
20. Исследование состава неметаллических включений сварных швов рельсовых соединений, полученных при их электроконтактной сварке / Е. В. Полевой, Н. А. Козырев, Р. А. Шевченко, А. А. Усольцев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 76 (3). – С. 251–256. – DOI: 10.32339/0135-5910-2020-3-251-256.