

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ГОРЯЧЕКАТАНОГО ЛИСТА ИЗ ТРУБНОЙ СТАЛИ И ПРИЧИН ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

*Н.А. Шабурова¹, М.С. Киштыкова¹, В.Я. Гольдштейн²,
С.В. Руциц¹, Б.Г. Пластинин*

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² ЗАО «Ферросплав», г. Челябинск, Россия

Конечный комплекс свойств трубопрокатной металлопродукции формируется в ходе всей совокупности переделов, важнейшим из которых является сталеплавильный. Особенно это касается непрерывнолитой заготовки, так как ликвация литого металла, которая наследуется при последующей прокатке, приводит к образованию неоднородной структуры и обуславливает снижение механических свойств. В работе проведено исследование листового материала из стали марки К56, применяемого для изготовления электросварных труб для нефтепроводов. Отбраковка материала была проведена на готовом изделии – как в основном металле труб, так и в околошовной зоне при ультразвуковом контроле были обнаружены расслоения. Для установления природы выявленных дефектов были проведены микроструктурные исследования средствами оптической и электронной микроскопии.

Результаты оптической микроскопии подтвердили наличие несплошностей в виде трещин в осевой зоне образцов. Микроструктура металла в осевой зоне имеет отличную от основного металла морфологию и идентифицируется как низкоуглеродистый мартенсит. В то время как основной металл имеет полосчатую феррито-бейнитную структуру. Наличие мартенсита подтверждают и измерения микротвердости: основной металл имеет твердость порядка 220 НВ, несплошность в осевой зоне 270 НВ. Кроме того, было проведено исследование химического состава структурных составляющих по высоте образцов, которое показало повышенное количество Si и Mn вдоль осевой линии. Также в осевой микротрещине были обнаружены крупные строчечные выделения сульфидов и карбиды ниобия. Таким образом, установлено, что расслоения, обнаруженные в осевой зоне листового проката, являются следствием ликвации исходной непрерывнолитой заготовки.

Ключевые слова: низколегированные стали, микроструктура, непрерывнолитая заготовка, ликвация, дефекты листового проката.

Введение

Развитие нефтегазового комплекса вызывает не только увеличение потребностей в сварных трубах, применяемых для изготовления трубопроводов, но и способствует возрастанию требований, предъявляемым к сталям для изготовления труб. Следует учитывать, что конечный комплекс свойств трубопрокатной металлопродукции формируется в ходе всей совокупности переделов, важнейшим из которых является сталеплавильный. Особенно выражена технологическая наследственность при производстве низколегированных сталей: дефекты, образующиеся из-за отклонения от заданной технологии, приводят к значительному разбросу качества металлопродукции. В частности, ликвация литого металла, которая наследуется при последующей прокатке, приводят к образованию неоднородной структуры и обуславливает снижение механических

свойств [1–7]. Концентрационные изменения значительно влияют на термодинамику и кинетику фазовых превращений, на температуры критических точек, на диффузию, которая контролирует зарождение и рост карбидных частиц и формирование бейнита. Неоднократно показано, что в малоуглеродистых сталях даже небольшие изменения химического состава вызывают изменения структуры и фазового состава, а также влияют на уровень механических свойств по сечению проката [8–11].

В работе проведено исследование листового материала из стали марки К56, применяемого для изготовления электросварных труб для нефтепроводов. Отбраковка материала была проведена на готовом изделии – как в основном металле труб, так и в околошовной зоне при ультразвуковом контроле были обнаружены расслоения. Для установ-

ления природы выявленных дефектов были проведены микроструктурные исследования средствами оптической и электронной микроскопии.

Материал и методика исследования

Исследовали образцы листового материала толщиной 14 мм, изготовленного из трубной стали класса прочности К56. Для исключения влияния сварочного нагрева на образование внутренних дефектов из готовой трубы вырезались образцы на разном расстоянии от сварного шва: 20, 40 и 60 мм, дополнительно исследовались сами сварные швы. Химический состав стали представлен в табл. 1.

Структуру сплавов, после травления 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте методами оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Оптическая металлография проводилась на микроскопе Axio Observer D1m, оснащенного программой для анализа изображений Thixomet.Pro. Состав микрообъемов сплавов этих образцах определяли на растровом микроскопе JEOL JSM-6460LV с пристав-

кой для микрорентгеноспектрального анализа Oxford Instruments Inca Energy. Измерение твердости элементов структуры проводилось на микротвердомере FM-800 при нагрузке 300 г.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для исключения влияния сварочного нагрева на появление внутренних дефектов в листах, предварительно проводилось исследование сварных швов. Результаты исследования показали, что ширина зоны термического влияния сварного шва составляет 4–5 мм. Следовательно, нагрев при сварке не мог спровоцировать появление дефектов. Все исследуемые образцы листового материала имеют идентичную феррито-бейнитную структуру. Характерный вид микроструктуры показан на рис. 1. Видно, что структура металла неоднородна, размер ферритного зерна колеблется от 9,5 до 12 баллов (по ГОСТ 5639–82). Кроме того, отмечена полосчатость структуры 4 балла (по ГОСТ 5640–68).

В осевой зоне всех образцов обнаружены несплошности, видимые на нетравленных

Химический состав исследованных образцов, масс. %

Таблица 1

Fe	C	Si	Ni	Mn	Nb	Cr	V	Ti
Основа	0,10	0,42	0,05	1,52	0,06	0,08	0,003	0,016

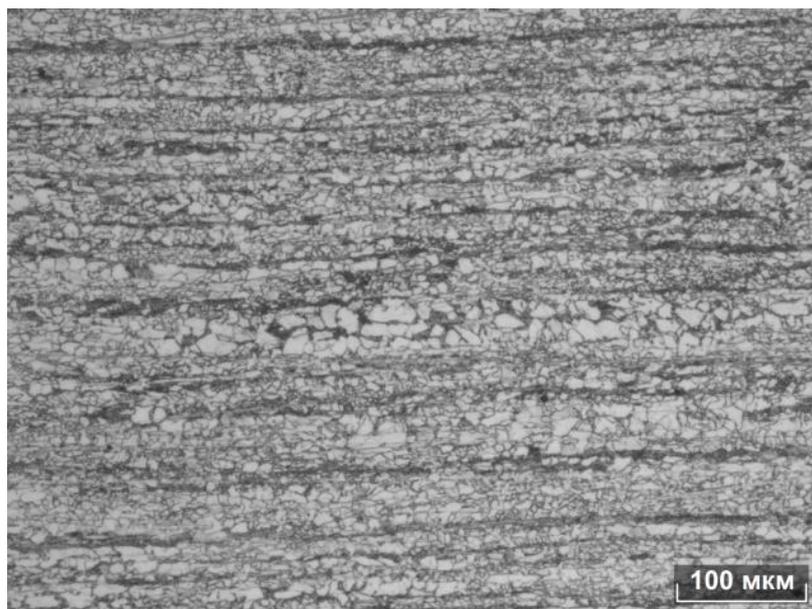


Рис. 1. Общий вид микроструктуры исследуемых образцов, $\times 200$

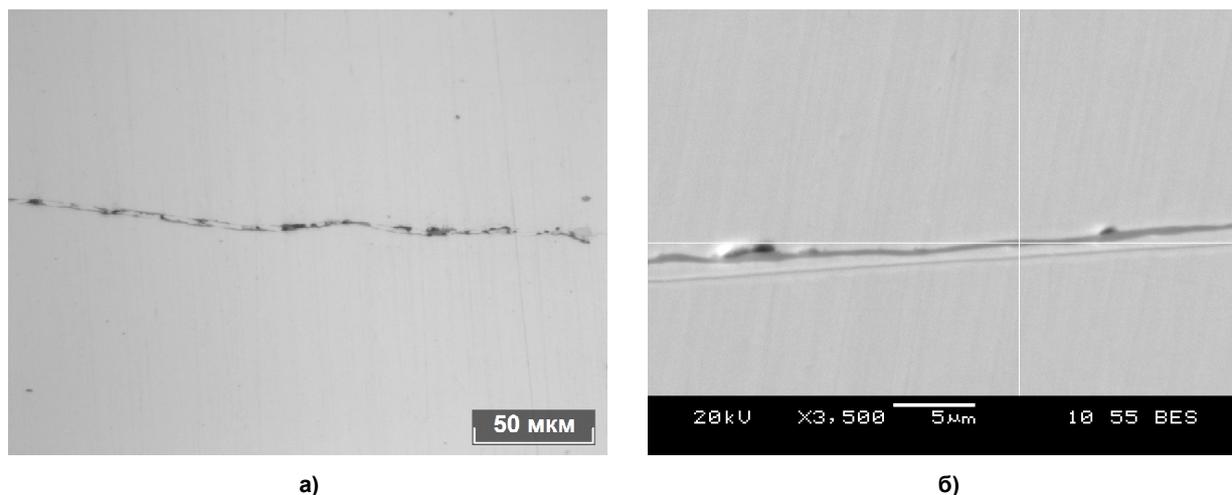


Рис. 2. Неплошности в осевой зоне: а – микротрещина, $\times 500$; б – сульфидная строчка, $\times 3500$

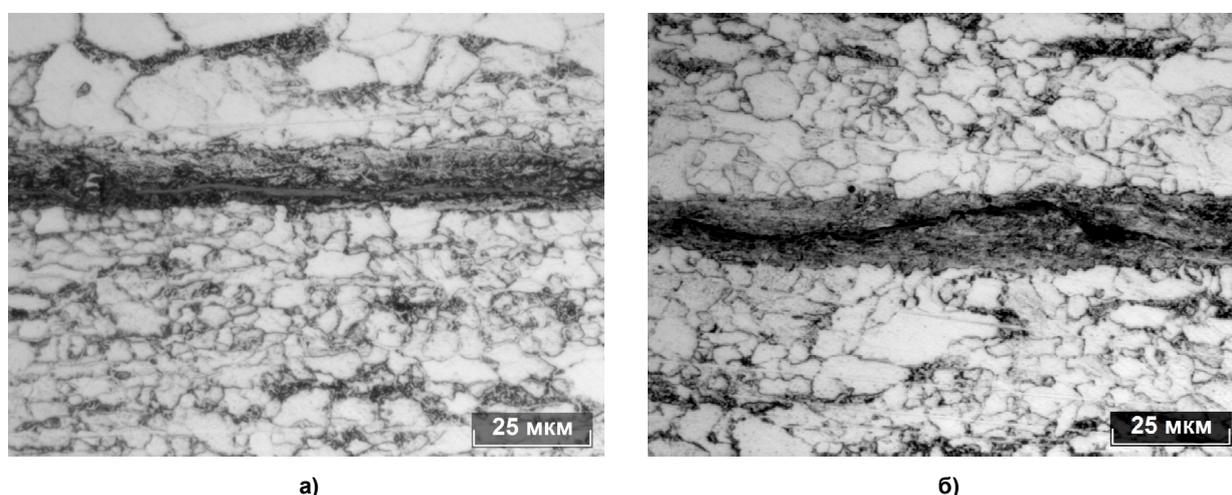


Рис. 3. Неплошность в осевой зоне, $\times 500$

шлифах как микротрещины (рис. 2а) или строчки сульфидных включений (рис. 2б).

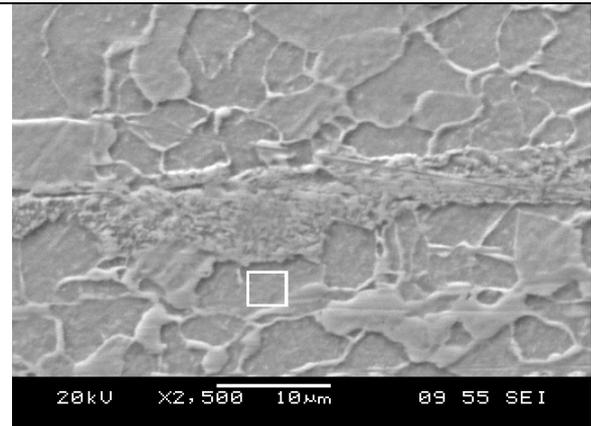
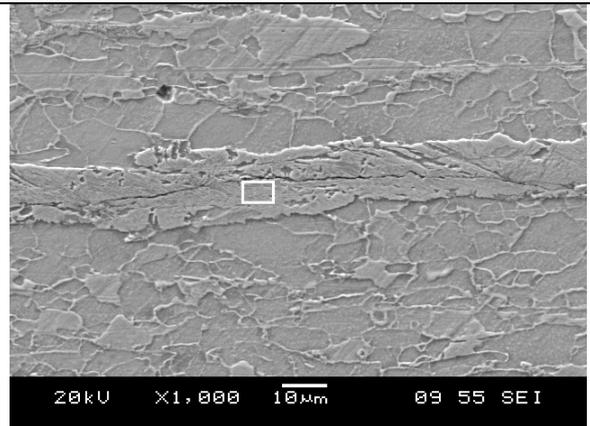
После травления образцов в осевой зоне, вблизи несплошностей, были обнаружены участки структуры отличной травимости, имеющие мартенситный характер структуры (рис. 3). Результаты измерения микротвердости показали, что основная феррито-бейнитная структура имеет твердость 214–224 HV, мартенсит вблизи несплошности осевой зоны 265–270 HV.

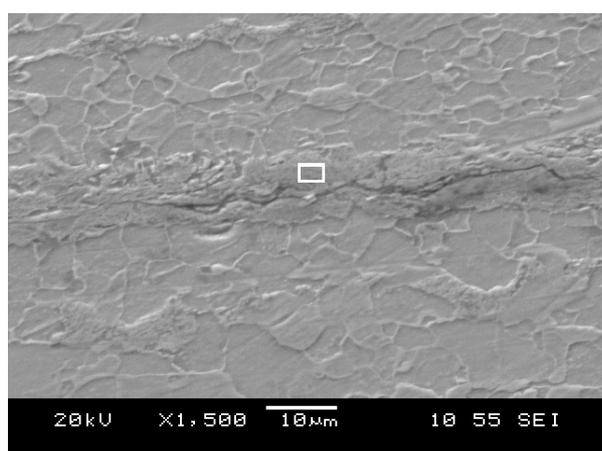
Для определения природы наблюдаемого дефекта на РЭМ исследовался состав ферритных и бейнитных полос по толщине образцов. Результаты химического анализа и примеры участков химического анализа (в направлении от оси листа к поверхности) показаны в табл. 2. Результаты анализа свидетельствуют о химической неоднородности элементов структур-

ных составляющих по толщине листа. В целом, можно отметить, что содержание Si и Mn в ферритных участках ниже, чем в бейнитных. Однако колебания состава в участках обоих типов носят флуктуационный характер.

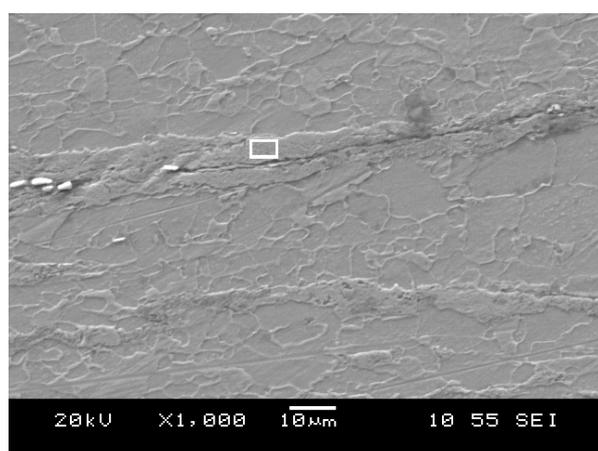
При исследовании на РЭМ установлено, что участок структурной неоднородности в осевой зоне по содержанию основных элементов близок к бейнитным участкам. На рис. 4 показаны участки химического анализа и спектры участков осевой зоны. Следует отметить, что участки со структурой схожего химического состава встречаются не только вдоль оси листа, но и выше по толщине листа (см. табл. 2). Существенным отличием полосы структурной неоднородности в осевой зоне является наличие выделений карбидов ниобия и строчек сульфидов (рис. 5).

Таблица 2

				
Участок анализа ферритной фазы		Участок анализа бейнитной структуры		
Спектры в таблице № 2,5, 7, 9, 11, 13		Спектры в таблице № 1, 4, 6, 8, 10, 12		
Химический состав элементов структуры по высоте образца, масс. %				
Спектр	Si	Mn	Fe	Итог
Спектр 1	0,94	2,96	96,10	100,00
Спектр 2	0,51	1,64	97,86	100,00
Спектр 4	1,11	3,02	95,87	100,00
Спектр 5	0,46	1,59	97,95	100,00
Спектр 6	0,56	1,67	97,77	100,00
Спектр 7	0,62	1,77	97,61	100,00
Спектр 8	0,60	1,97	97,43	100,00
Спектр 9	0,46	1,78	97,76	100,00
Спектр 10	0,53	1,69	97,78	100,00
Спектр 11	0,51	1,56	97,92	100,00
Спектр 12	0,47	1,84	97,69	100,00
Спектр 13	0,50	1,70	97,80	100,00

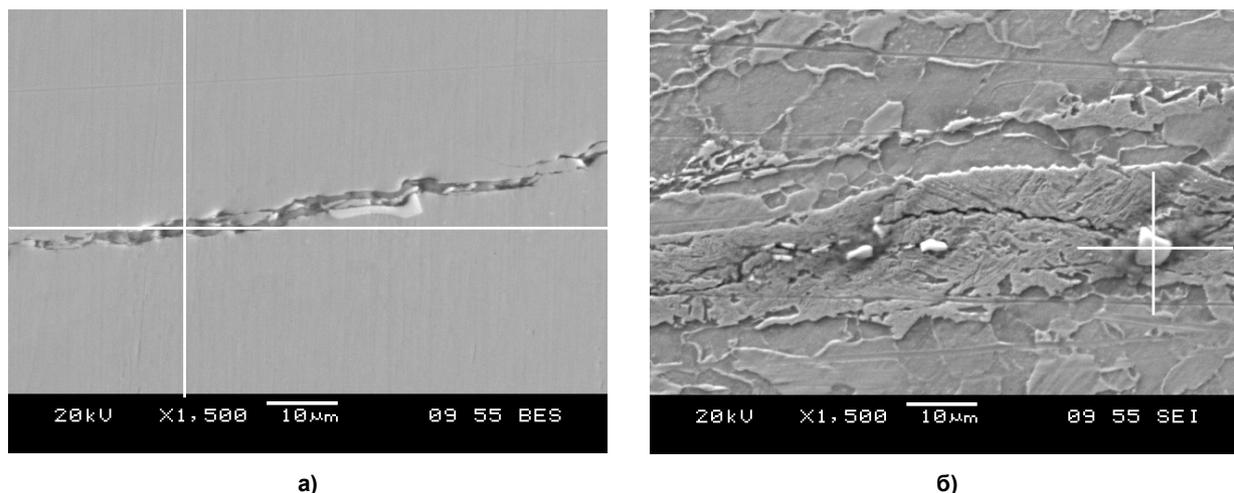


а)



б)

Рис. 4. Участки анализа химического состава в осевой зоне:
а – 0,74 масс. % Si, 2,61 масс. % Mn, 96,66 масс. % Fe;
б – 0,92 масс. % Si, 2,46 масс. % Mn, 96,62 масс. % Fe



Результаты химического анализа участков, масс. %

Спектр	C	S	Ti	Mn	Fe	Nb	Итог
Спектр 3		23,29		44,89	31,82		100,00
Спектр 4	11,27		6,07		4,84	77,82	100,00

Рис. 5. Сульфиды и карбиды ниобия в осевой зоне: а – спектр 3; б – спектр 4

Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о ликвации по толщине листа таких элементов, как Mn и Si. Наиболее высокое содержание этих элементов в осевой зоне листов в участках структурной неоднородности. Следовательно, природа наблюдаемых дефектов – осевая ликвация, возникающая вследствие того, что примеси и тугоплавкие элементы понижают температуру кристаллизации, вытесняются в центр литой заготовки и кристаллизуются в последнюю очередь.

Отмеченная ликвация проявляется не только в формировании структурной неоднородности повышенной твердости, но и в формировании микротрещин в осевой зоне. Также в ликвационных участках обнаружены карбиды ниобия и строчечные сульфидные включения.

Таким образом, наблюдаемые в осевой зоне образцов участки структурной неоднородности и микротрещины следует отнести к дефектам ликвационного характера, сформировавшимся в процессе изготовления непрерывно-литой заготовки. Подобная трансформация ликвационных дефектов непрерывно-литой заготовки исследуется в работах [12–14]. Для предотвращения появления подобных дефектов рекомендуется уменьшение перегрева в промежуточном ковше.

Литература

1. Голиков, И.Н. Дендритная ликвация в сталях и сплавах / С.Б. Масленков, И.Н. Голиков. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
2. Формирование литой структуры и макроликвации в непрерывнолитых слябах / П. Штадлер, К. Хаген, П. Хаммеримид, К. Швердтфегелр // Черные металлы. – 1982. – № 9. – С. 12–21.
3. Функе, П. Влияние первичной структуры на конечные свойства горячекатанных листов и полос / П. Функе, М. Эльсайед // Черные металлы. – 1988. – № 22. – С. 53–61.
4. Филипов, Е.С. Структура, физика и химия металлических расплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 304 с.
5. Чернов, Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению. – М.: Наука, 1983. – 448 с.
6. Теория и практика непрерывного литья заготовок / А.Н. Смирнов, А.Я. Глазков, В.Л. Пилюшенко и др. – Донецк: ДонНТУ, 2000. – 371 с.
7. Хуанг, Л. Возникновение макроликвации при непрерывной разливке сортовых заготовок / Л. Хуанг, К. Вердфегер // Черные металлы. – 1981. – № 3. – С. 19–23.
8. Особенности изменения структуры по сечению листового проката из высокопрочных штрипсовых сталей / А.И. Ковалев,

Д.Л. Вайнштейн, А.Ю. Рашковский и др. // *Металлург.* – 2011. – № 11. – С. 61–68.

9. Дюдкин, Д.А. *Качество непрерывнолитой стальной заготовки* / Д.А. Дюдкин. – Киев: Техника, 1988. – 253 с.

10. Пфанн, В.Дж. *Зонная плавка* / Дж.В. Пфанн. – М.: Металлургиздат, 1960. – 272 с.

11. *Систематизация критериев комплексной оценки качества непрерывнолитой заготовки* / А.Н. Смирнов, В.В. Несвет, А.Я. Глазков и др. // *Металлы и литье Украины.* – 2001. – № 709. – С. 32–36.

12. *Изменение структуры низколегированной стали в процессе производства* /

С.В. Денисов, А.Н. Завалицин, Е.В. Кожевникова, М.И. Румянцева // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова.* – 2013. – № 3. – С. 51–54.

13. *Завалицин, А.Н. изменение структуры стали К60 на различных этапах технологии производства* / А.Н. Завалицин, Е.В. Кожевникова // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* – 2013. – № 2. – С. 96–101.

14. *Природа дефектов горячекатаного листа из трубных марок стали. Часть 1. Дефекты, имеющие сталеплавильную природу* / А.А. Казаков, П.В. Ковалев, Л.С. Чигинцев и др. // *Черные металлы.* – 2007. – № 11. – С. 8–15.

Шабурова Наталия Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shaburovana@susu.ru.

Киштыкова Мадина Саимовна, магистрант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kishtykovams@susu.ru.

Гольдштейн Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ЗАО «Ферросплав», г. Челябинск; paschenko@ferro-splav.ru.

Рушиц Сергей Вадимович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; rushchitsv@susu.ru.

Пластинин Борис Глебович, д-р техн. наук, профессор, г. Челябинск; plastininbg@mail.ru.

Поступила в редакцию 8 октября 2018 г.

DOI: 10.14529/met180409

STUDY OF THE DEFECTS OF A HOT-ROLLED TUBE STEEL SHEET AND THE CAUSES OF THEIR CREATION

N.A. Shaburova¹, shaburovana@susu.ru,
M.S. Kishtykova¹, kishtykovams@susu.ru,
V.Ya. Goldstein², paschenko@ferro-splav.ru,
S.V. Rushchits¹, rushchitsv@susu.ru,
B.G. Plastinin, plastininbg@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² CJSC "Ferrosplav", Chelyabinsk, Russian Federation

The final complex of properties of the pipe-rolled metal products is formed during the entire set of production stages, the most important of which is steelmaking. This is especially true for continuously cast billet, because segregation of cast metal, which is inherited during subsequent rolling, leads to the formation of a heterogeneous structure, and causes a decrease in mechanical properties. A study was carried out on sheet material from steel grade K56, used for the manufacture of electric-welded pipes for oil pipelines. The rejection of the material was carried out on the finished product. As in the base metal of the pipe, and in the heat-affected zone, ultrasonic testing revealed stratifications. To establish the nature of the revealed defects, microstructural studies were carried out using optical and electron microscopy.

The results of optical microscopy confirmed the presence of discontinuities in the form of cracks in the axial zone of the samples. The microstructure of the metal in the axial zone has a different from the base metal morphology and is identified as low-healed martensite. While the base metal has a banded ferrite-bainite structure. The presence of martensite is confirmed by microhardness measurements: the base metal has a hardness of about 220 HV, discontinuity in the axial zone of 270 HV. The study of the chemical composition of the structural components along the height of the samples showed an increased number of Si and Mn in the axial line. Also in the central zone, large line-secretions of sulphides and carbides of niobium were found. Thus, it was established that the delaminations found in the axial zone of sheet metal are a consequence of the segregation of the initial continuously cast billet.

Keywords: low-alloy steels, microstructure, continuous-cast billet, segregation, sheet metal defects.

References

1. Golikov I.N., Maslennikov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendritic Segregation in Steels and Alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 224 p.
2. Stadler P., Hagen K., Hammerschmid P., Shverdftegelr K. [Formation of Cast Structure and Macrolivkatsii in Continuously Cast Slabs]. *Chernye Metally*, 1982, no. 9, pp. 12–21. (in Russ.)
3. Funke P., Elsayed M. [Influence of the Primary Structure on the Final Properties of Hot-Rolled Sheets and Strips]. *Chernye Metally*, 1988, no. 22, pp. 53–61. (in Russ.)
4. Filipov E.S. *Stroyeniye, fizika i khimiya metallicheskih rasplavov* [Structure, Physics and Chemistry of Metal Melts]. Moscow, Metallurgy Publ., 1995. 304 p.
5. Chernov D.K. *Izbrannyye trudy po metallurgii i metallovedeniyu* [Selected Works on Metallurgy and Metallurgy]. Moscow, Science Publ., 1983. 448 p.
6. Smirnov A.N., Glazkov A.Ya., Pilyushenko V.L. et al. *Teoriya i praktika nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Theory and Practice of Continuous casting]. Donetsk, DonNTU Publ., 2000. 371 p.
7. Huang L., Verdfeger K. [The Emergence of Macrolysis in the Continuous Casting of Varietal Billets]. *Chernye Metally*, 1981, no. 3, pp. 19–23. (in Russ.)
8. Kovalev A.I., Weinstein D.L., Rashkovsky A.Yu., Khlusova E.I., Orlov V.V. [Features of Structural Changes Through the Cross Section of Sheet Rolled from High Strength Skelp Steels]. *Metallurgist*, 2011, vol. 55, iss. 1–2, pp. 34–45. DOI: 10.1007/s11015-011-9389-3
9. Dyudkin D.A. *Kachestvo nepreryvnolitoi stal'noy zagotovki* [Quality of Continuous Cast Steel Billet]. Kiev, Technique Publ., 1988. 253 p.
10. Pfann W.G. *Zone melting*, Wiley, 1958. 236 p.
11. Smirnov A.N., Nesvet V.V., Glazkov A.Ya. et al. [Systematization of the Criteria for the Integrated Quality Assessment of Continuously Cast Billets]. *Metals and Casting of Ukraine*, 2001, no. 709, pp. 32–36. (in Russ.)
12. Denisov S.V., Zavalishchin A.N., Kozhevnikova E.V., Rummyantsev M.I. [Change in the Structure of Low-Alloyed Steel in the Production Process]. *Vestnik MGTU*, 2013, no. 3, pp. 51–54. (in Russ.)
13. Zavalishchin A.N., Kozhevnikov E.V. [Change in the Structure of K60 Steel at Various Stages of Production Technology]. *Bulletin of Nizhny Novgorod University*, 2013, no. 2, pp. 96–101. (in Russ.)
14. Kazakov A.A., Kovalev P.V., Chigintsev L.S. et al. [The Nature of Defects in Hot-Rolled Sheet of Tube Steel Grades. Part 1. Defects with Steelmaking Nature]. *Chernye Metally*, 2007, no. 11, pp. 8–15. (in Russ.)

Received 8 October 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование дефектов горячекатаного листа из трубной стали и причин их образования / Н.А. Шабурова, М.С. Киштыкова, В.Я. Гольдштейн и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 82–88. DOI: 10.14529/met180409

FOR CITATION

Shaburova N.A., Kishchykova M.S., Goldstein V.Ya., Rushchits S.V., Plastinin B.G. Study of the Defects of a Hot-Rolled Tube Steel Sheet and the Causes of Their Creation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 82–88. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180409