



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-62-68>
УДК 669

Поступила 09.02.2023
Received 09.02.2023

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СОСТАВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ОКСИДОВ (САТЕЛЛИТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ) В ТВЕРДОЙ СТАЛИ

Т. И. СИДОРЕНКО, Е. В. ЕРМАЧЕНОК, Ю. С. БЕЛАШ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37

Основная цель любого современного производства сортового проката – обеспечение требуемого качества готовой продукции. Одним из важных показателей качества наряду с механическими и технологическими свойствами является качество поверхности металлопроката. В работе приведены результаты экспериментальных исследований состава высокотемпературных диффузионных оксидов, образующихся на поверхности искусственно нанесенных дефектов при различных условиях температурного воздействия с помощью микрорентгеноспектрального метода на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионным микроанализатором. Установлены характерные особенности процентного содержания и наличия определенных химических элементов в окалине различных марок стали.

Ключевые слова. Высокотемпературное окисление, микроскопия, микровключения, электронный микроскоп, микроанализ, диффузия, оксиды, термическая обработка, окалина.

Для цитирования. Сидоренко, Т.И. Влияние различных условий термического воздействия на состав высокотемпературных диффузионных оксидов (сателлитных включений) в твердой стали / Т.И. Сидоренко, Е.В. Ермаченок, Ю.С. Белаши // *Литье и металлургия*. 2023. № 1. С. 62–68. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-62-68>.

INFLUENCE OF VARIOUS THERMAL CONDITIONS ON THE COMPOSITION OF HIGH-TEMPERATURE DIFFUSION OXIDES (SATELLITE INCLUSIONS) IN SOLID STEEL

T. I. SIDORENKO, E. V. ERMACHENOK, Yu. S. BELASH, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

The main goal of any modern production of long products is to ensure the required quality of finished products. One of the important quality indicators, along with mechanical and technological properties, is the quality of the rolled metal surface. The article presents the results of experimental studies of the composition of high-temperature diffusion oxides formed on the surface of artificially deposited defects under various conditions of temperature exposure using the microrentgenospectral method on a scanning electron microscope with an energy dispersive microanalyzer. The characteristic features in terms of the percentage and presence of certain chemical elements in the scale of various steel grades have been established.

Keywords. High temperature oxidation, microscopy, microinclusions, electron microscope, microanalysis, diffusion, oxides, heat treatment, scale.

For citation. Sidorenko T.I., Ermachenok E.V., Belash Yu.S. Influence of various thermal conditions on the composition of high-temperature diffusion oxides (satellite inclusions) in solid steel. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 62–68. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-62-68>.

Формирование поверхности сортового проката происходит на всех стадиях металлургического передела: при внепечной обработке стали, непрерывной разливке, последующем нагреве блюмов под прокатку, а также при горячем прокате. Для устранения причины возникновения дефекта недостаточно его выявить, важно его правильно классифицировать. В отдельных случаях приходится сталкиваться с трудностями при определении происхождения дефекта, так как признаки образования могут иметь одинаковый вид.

При высокотемпературном окислении сталей в окалину переходит небольшая часть легирующих элементов, которые, как и железо, входят в ее состав главным образом в виде оксидов [1].

В работе рассмотрено влияние температурно-временного воздействия на образование и элементный состав диффузионных оксидов (сателлитных включений) в зоне поверхностных дефектов. Эксперимент проводили в лабораторных условиях на пробах горячекатаной стали с различным химическим составом:

- высокоуглеродистой легированной хромом – стали марки 100Cr6;
- среднеуглеродистой качественной – стали марки 40;
- низкоуглеродистой легированной хромом и марганцем – стали марки 16MnCr5.

Для исследования окалины и сателлитных включений, сопровождающих поверхностные дефекты, на исследовательские пробы механическим способом были нанесены продольные надрезы. После нанесения искусственных дефектов образцы подвергали нагреву и выдержке в лабораторной печи по применяемым в прокатном производстве режимам (нагрев под прокатку, режимы проката и сфероидизирующего отжига), значительно отличающихся условиями термического воздействия.

Из литературных источников известно, что окисление металла особенно интенсивно протекает при температурах, превышающих 600 °С [2], и с увеличением содержания углерода скорость окисления углеродистых сталей понижается [3].

Температурно-временные условия, применяемые в данном эксперименте, приведены в табл. 1, 4, 7.

Для изучения образовавшейся в результате термического воздействия окалины и диффузионных оксидов из термообработанных проб вырезаны образцы в зоне дефектов. Пробоподготовку образцов, запрессованных в термореактивную токопроводящую смолу, осуществляли в соответствии с ASTM E3. Обеспечить высокую достоверность результатов позволило использование автоматической шлифовально-полировальной системы высококачественной подготовки образцов ACCURA 102.

Количественный и качественный элементный состав диффузионных оксидов в зоне дефектов определяли микрорентгеноспектральным методом на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 4GMS с энергодисперсионным микроанализатором (СЭМ). С помощью прибора зафиксировали изменение окисленного слоя и сателлитных включений на исследуемых микрошлифах.

Высокоуглеродистая легированная хромом сталь марки 100Cr6

Таблица 1. Режимы термообработки

Моделирование процесса нагрева в лабораторной печи		
под прокат режим № 1	в течение проката режим № 2	при сфероидизирующем отжиге режим № 3
Максимальная температура нагрева – 1200 °С, продолжительность термической обработки – 3,5 ч, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 1100 °С, продолжительность термической обработки – 30 мин, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 805 °С, продолжительность термической обработки – 20 ч, среда охлаждения – воздух

В результате исследований определили, что слой сателлитных включений образовался после каждого вида термического воздействия (рис. 1). При этом количество включений уменьшается по мере удаления от поверхности. После термообработки по режимам № 1 и 3 окисление проходит наиболее интенсивно, и вся полость надреза заполнена окалиной. Элементный состав окисленного слоя и сателлитных включений приведен в табл. 2, легкоплавких фаз – в табл. 3.

Таблица 2.

Элементный состав окалины и сателлитных включений

Номер режима	O	Si	Cr	Mn	Fe
Окалина, %					
1	25,39	0,46	3,21	0,34	70,6
2	24,95	2,61	3,68	0,45	68,3
3	24,85	4,73	1,11	1,51	67,8
Сателлитные включения, %					
1	6,42	0,94	4,43	1,34	86,87
2	4,48	0,74	4,18	1,16	89,44
3	7,10	0,92	2,17	2,46	87,35

Таблица 3.

Элементный состав легкоплавких фаз

Номер режима	Fe	Ni	Cu
Легкоплавкие фазы, %			
1	82,56	5,46	11,98
2	81,50	13,07	5,44
3	74,22	17,91	7,88

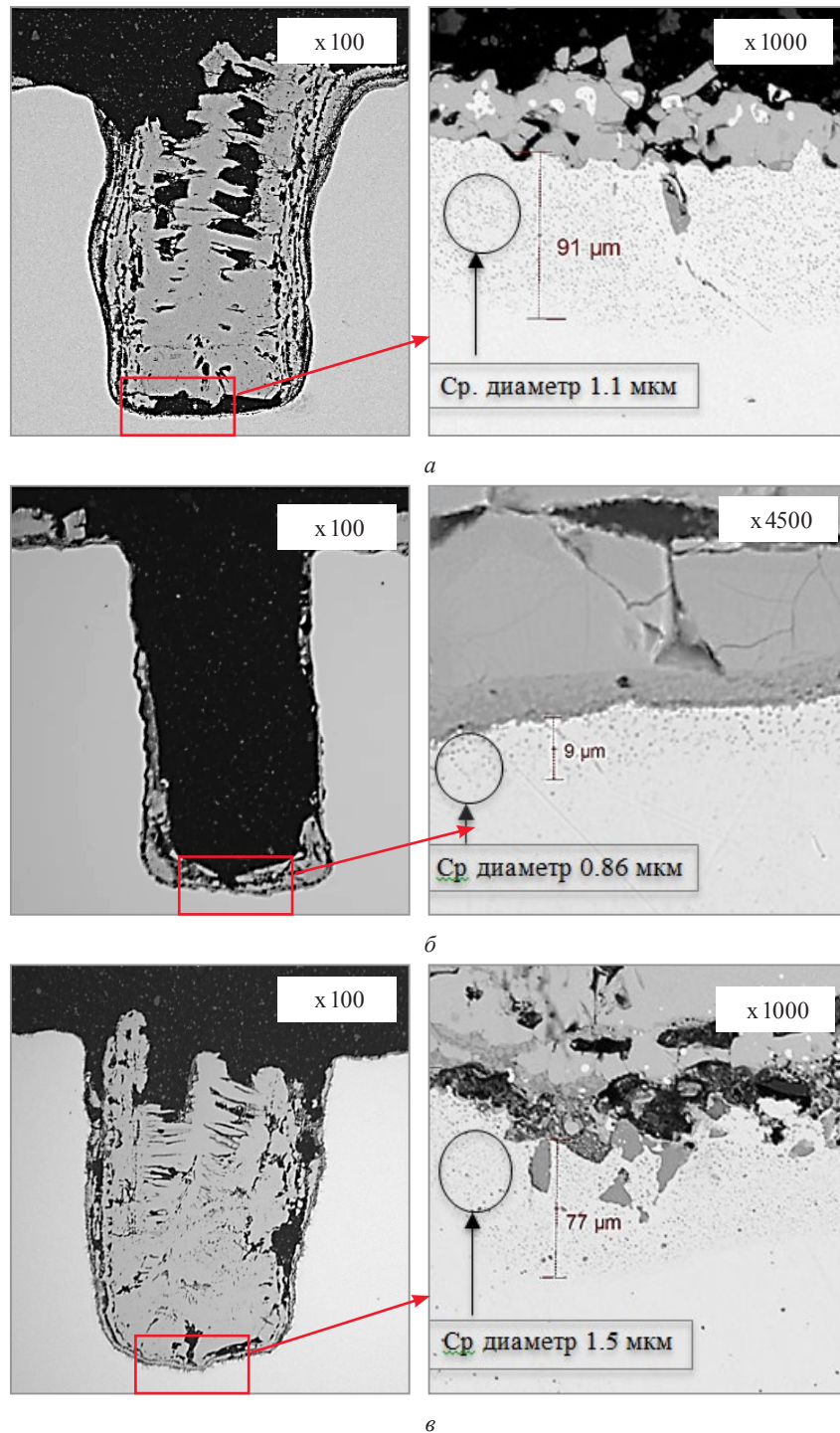


Рис. 1. Вид дефекта на микрошлифе: *а* – режим № 1; *б* – режим № 2; *в* – режим № 3

Из табл. 2 видно, что элементный состав окисленного слоя и сателлитных включений отличается в зависимости от вида применяемой термической обработки. После термообработки по режиму № 3 сформировалось наибольшее содержание марганца в окалине и сателлитных включениях и нужно отметить, что содержание кремния повысилось только в окалине. После моделирования процесса нагрева по режимам № 1 и 2 содержание хрома в окалине и сателлитных включениях выше, чем после режима № 3.

Необходимо обратить внимание на наличие в окалине легкоплавких фаз, количество и концентрация которых также меняется в зависимости от применяемой термической обработки. Из табл. 3 видно, что больше всего меди содержится во включениях в окисленном слое при режиме № 1. При режиме № 2 преобладает сосредоточение никеля. Распределение легкоплавких элементов (легкоплавкие фазы выделены цветом) показано на рис. 2.

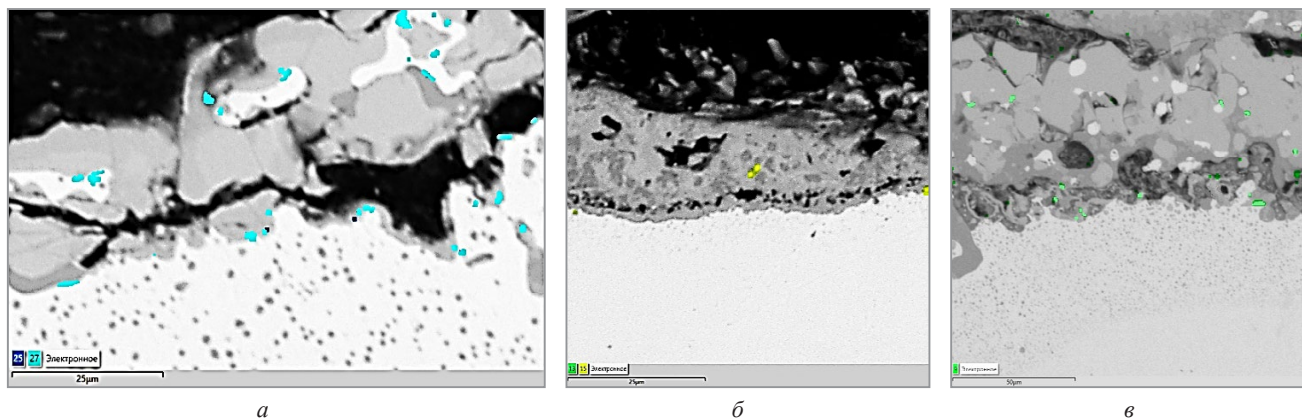


Рис. 2. Распределение легкоплавких фаз: а – режим № 1. x 3000; б – режим № 2. x 4000; в – режим № 3. x 2000

Среднеуглеродистая качественная сталь марки 40

Таблица 4. Режимы термообработки

Моделирование процесса нагрева в лабораторной печи		
под прокат режим № 1	в течение проката режим № 2	при сфероидизирующем отжиге режим № 3
Максимальная температура нагрева – 1180 °С, продолжительность термической обработки – 3 ч, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 1030 °С, продолжительность термической обработки – 30 мин, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 805 °С, продолжительность термической обработки – 4,5 ч, среда охлаждения – воздух

Элементный состав окисленного слоя и спутниковых включений приведен в табл. 5, легкоплавких фаз – в табл. 6.

Таблица 5. Элементный состав окалины и спутниковых включений

Номер режима	O	Si	Cr	Mn	Fe
Окалина, %					
1	28,39	4,16	0,63	0,42	66,39
2	26,93	6,46	0,93	0,58	65,11
3	22,95	0,46	0,26	1,64	74,69
Спутниковые включения, %					
1	12,23	2,45	3,14	10,97	71,11
2	15,39	5,82	3,13	10,32	65,33
3	–	–	–	–	–

Таблица 6. Элементный состав легкоплавких фаз

Номер режима	Fe	Ni	Cu
Легкоплавкие фазы, %			
1	74,63	3,38	21,98
2	79,45	11,96	8,58
3	91,63	6,73	1,64

Металлографическое исследование шлифов среднеуглеродистой стали после режимов № 1 и 2 показало наличие мелкозернистых спутниковых включений (рис. 3). После имитации термообработки по режиму № 1 плотный слой мелких диффузионных оксидов равномерно распространяется по всей поверхности дефекта. Полость надреза заполнена окалиной. При термообработке в соответствии с режимом № 2 процесс окисления проходит по границам зерен. Анализ микрорентгеноспектральных данных (табл. 5) показал самую высокую концентрацию кремния в окалине и спутниковых включениях. После сфероидизирующего отжига спутниковые включения отсутствуют. Однако наблюдается толстый слой окалины с наибольшей концентрацией марганца по сравнению с моделированием режимов № 1 и 2.

На образцах стали марки 40 (табл. 6) выявлено, что при термообработке по режиму № 1 в окалине распространены легкоплавкие включения с преобладающим содержанием меди. После обработки образцов по режиму № 2 обнаружено скопление легкоплавких элементов по границам зерен в виде сетки глубиной залегания 19 мкм. При этом среднее процентное содержание никеля в легкоплавких включениях больше, чем

меди. На образцах, термообработанных по режиму № 3, наблюдаются единичные включения легкоплавких фаз в окисленном слое. Распределение легкоплавких составляющих, выделенных цветом, показано на рис. 4.

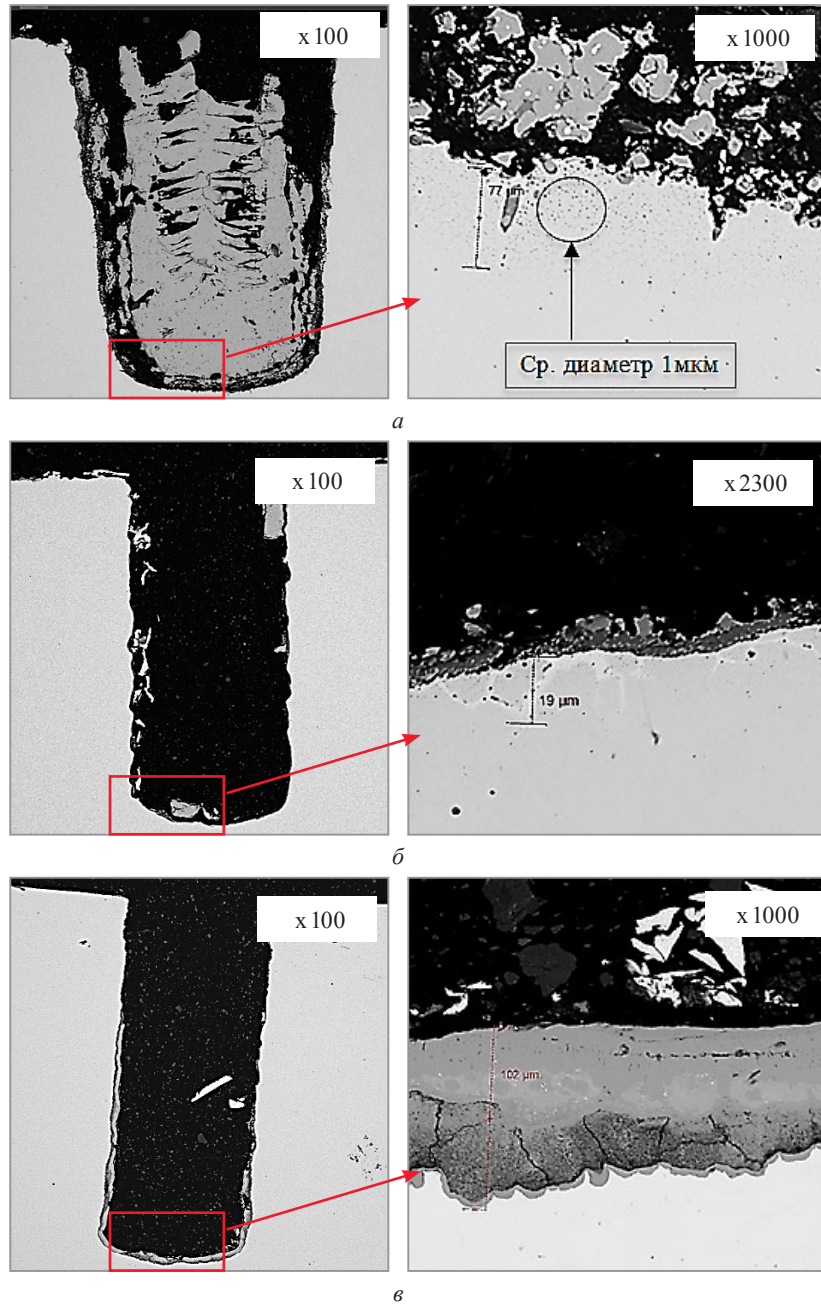


Рис. 3. Вид дефекта на микрошлифе: *а* – режим № 1; *б* – режим № 2; *в* – режим № 3.

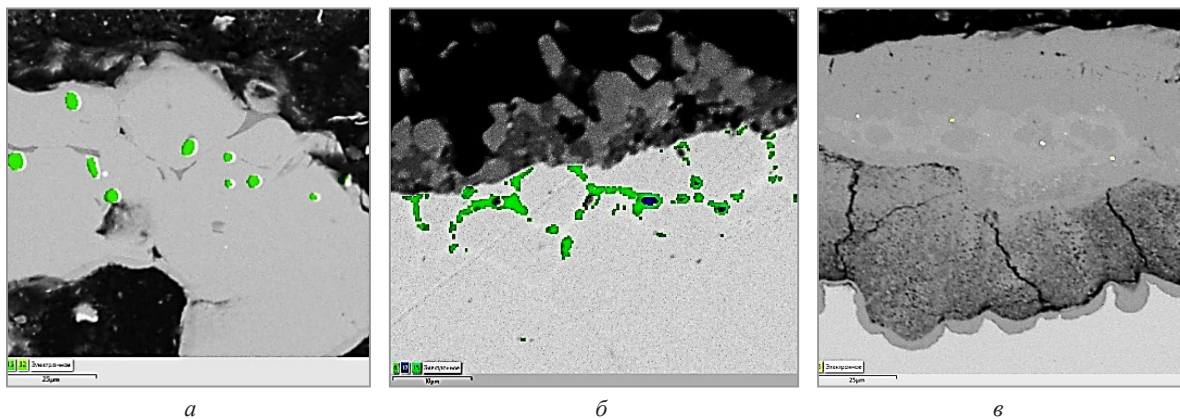


Рис. 4. Распределение легкоплавких фаз: *а* – режим № 1. $\times 2000$; *б* – режим № 2. $\times 3000$; *в* – режим № 3. $\times 1500$

Низкоуглеродистая легированная хромом и марганцем сталь марки 16MnCr5

Таблица 7. Режимы термообработки

Моделирование процесса нагрева в лабораторной печи		
под прокат режим № 1	в течение проката режим № 2	при сфероидизирующем отжиге режим № 3
Максимальная температура нагрева – 1180 °С, продолжительность термической обработки – 3 ч, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 1030 °С, продолжительность термической обработки – 30 мин, среда охлаждения – воздух	Максимальная температура нагрева – 745 °С, продолжительность термической обработки – 4,5 ч, среда охлаждения – воздух

Элементный состав окисленного слоя на образцах марки стали 16MnCr5 приведен в табл. 8, легкоплавких фаз – в табл. 9.

Таблица 8. Элементный состав окалины

Номер режима	O	Si	Cr	Mn	Fe
	Окалина, %				
1	26,20	0,58	2,20	0,42	70,60
2	26,26	5,15	6,55	1,15	60,9
3	25,59	0,42	1,13	0,83	71,94

Таблица 9. Элементный состав легкоплавких фаз

Номер режима	Fe	Ni	Cu
	Легкоплавкие фазы, %		
1	86.47	0.46	13.07
2	82.65	7.56	9.79
3	92.83	5.18	1.99

Эксперимент показал отсутствие сателлитных включений в низкоуглеродистой легированной стали (рис. 5). По всему периметру полости искусственно нанесенных дефектов присутствует окалина. При термообработке по режиму № 2 содержание кремния и хрома значительно отличается по сравнению с режимами № 1, 3 и имеет наибольшее значение. Концентрация марганца в окалине после термического воздействия по режиму № 3 незначительно выше, чем при термообработке по режимам № 1 и 2. Необходимо отметить присутствие в окалине единичных вкраплений легкоплавких фаз (рис. 6).

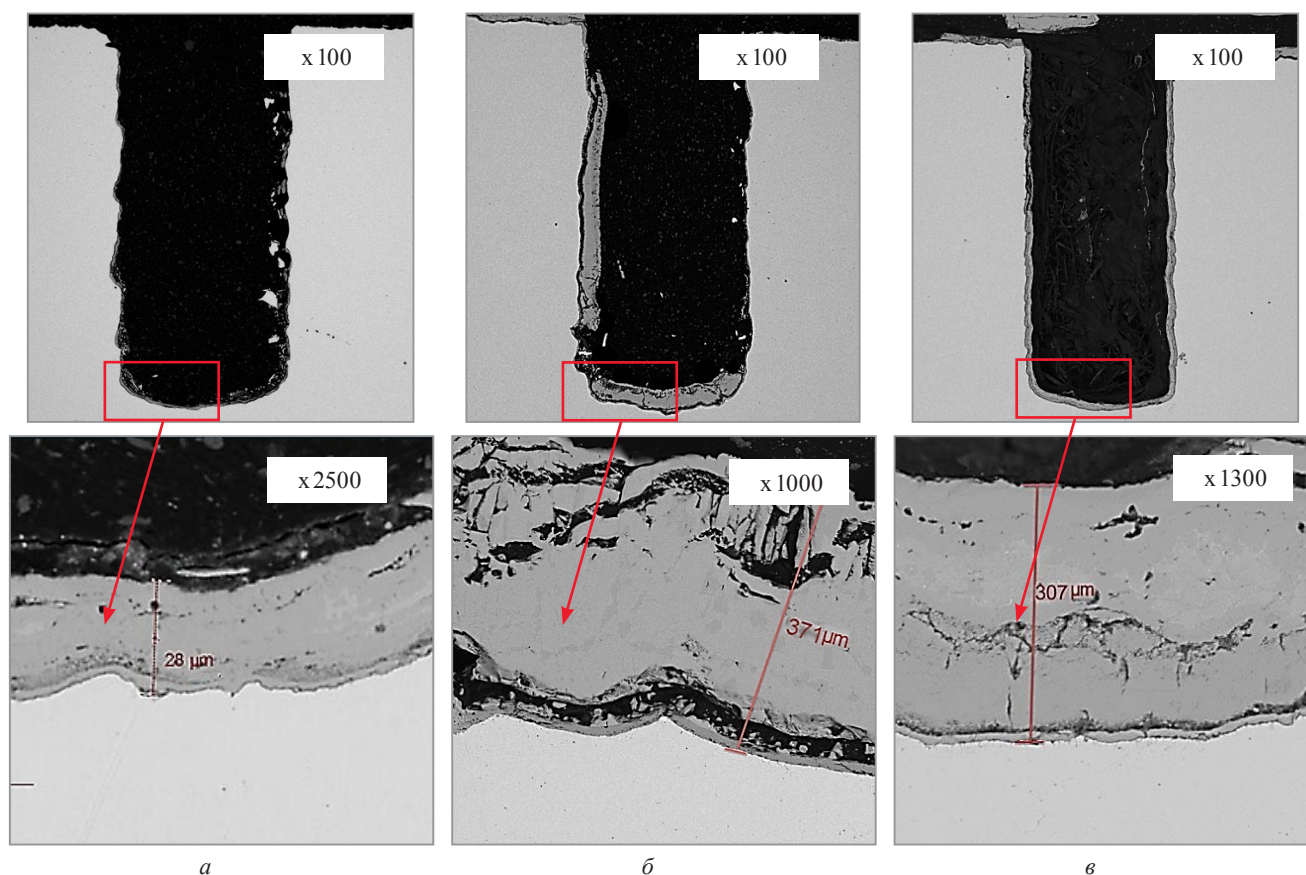


Рис. 5. Вид дефекта на микрошлифе: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3

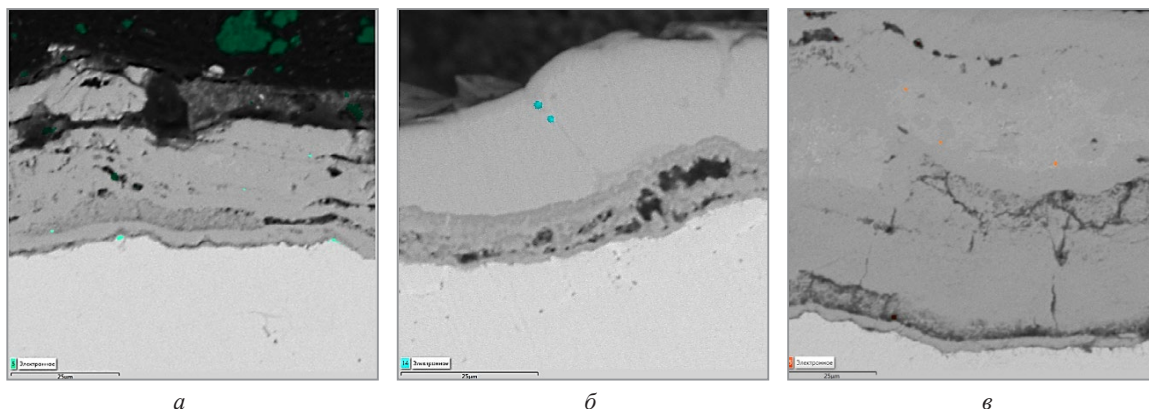


Рис. 6. Распределение легкоплавких фаз: а – режим № 1. х 2000; б – режим № 2. х 3000; в – режим № 3. х 1500

Выводы

Анализ результатов микрорентгеноспектрального исследования позволил определить некоторые особенности, свойственные для определенного вида термического воздействия.

Поверхность надреза образцов при моделировании режима нагрева под прокат характеризуется интенсивным ростом окалины с наличием легкоплавких элементов, преобладающим содержанием меди по сравнению с другими видами термообработки. Наличие слоя спутанных включений отмечается в высоко- и среднеуглеродистой стали (сталь 100Сг6, сталь 40).

Отличительной чертой поверхности полости надреза образцов в результате моделирования процесса прокатки является низкое содержание спутанных включений и незначительный слой окалины. При этом в окалине преобладает процентное содержание кремния, хрома, марганца.

После сфероидизирующего отжига по поверхности исследуемых образцов, включая искусственный дефект, наблюдается максимальный окисленный слой с наибольшим содержанием марганца, а в спутанных включениях – наименьшим.

В результате проведенных исследований подтверждена зависимость элементного состава окалины и высокотемпературных диффузионных оксидов, образующихся в твердой стали разных марок, от условий термического воздействия. Результаты полученных экспериментальных данных методом рентгеноструктурного анализа позволяют дифференцировать этапы происхождения поверхностных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн М.Л., Рахштадта А.Г. Справ. в 3-х т. Т. 2. М.: Металлургия, 1983.
2. Копытов В.Ф. Нагрев стали в печах. М.: Metallurgizdat, 1955.
3. Щедров К.П., Гакман Э.Л. Жаростойкие материалы: Справ. пособ. М.: Машиностроение, 1965.

REFERENCES

1. Bernshtejn M. L., Rahshtadta A. G. *Spravochnik v treh tomah* [Handbook in three volumes]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, vol. 2.
2. Kopytov V. F. *Nagrev stali v pechah* [Heating steel in furnaces]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1955.
3. Schedrov K. P., Gakman Je. L. *Zharostojkie materialy* [Heat resistant materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965.