



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-60-66>
УДК 669

Поступила 28.11.2024
Received 28.11.2024

УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ МЕСТНОГО ХАРАКТЕРА НА КАТАНКЕ СТАЛИ МАРКИ 20Г2Р ПОСЛЕ ОТЖИГА

Я. С. КУЛАКОВСКАЯ, М. И. КРАВЦОВА, Е. В. ЕРМАЧЕНОК, Т. И. СИДОРЕНКО, Т. П. КУРЕНКОВА,
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,
г. Жлобин Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37

Одним из важных показателей качества бунтового проката, подвергавшегося нормированию и контролю при аттестации, является глубина обезуглероженного слоя на поверхности, который формируется как при прокатке, так и при термической обработке. Обезуглероживание и окиснообразование существенно снижают механические свойства в поверхностных слоях металлопроката, вследствие чего поверхность становится восприимчивой к образованию рисок, задиров, царапин при прокатке, калибровке и холодной высадке. Для образования обезуглероженного слоя требуются дополнительные затраты на механическую обработку, в результате которой увеличивается объем металлических отходов и значительная часть стали уходит в утилизацию. В данной статье с помощью экспериментального исследования предпринята попытка выявить одну из причин образования обезуглероживания местного характера на катанке стали марки 20Г2Р после отжига.

Ключевые слова. Обезуглероженный слой, катанка, термическая обработка, пластическая деформация, поверхностные дефекты.

Для цитирования. Кулаковская, Я.С. Установление причины образования обезуглероживания местного характера на катанке стали марки 20Г2Р после отжига / Я.С. Кулаковская, М.И. Кравцова, Е.В. Ермаченок, Т.И. Сидоренко, Т.П. Куренкова // *Литье и металлургия*. 2024. № 4. С. 60–66. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-60-66>.

DETERMINATION OF THE CAUSE OF LOCAL DECARBURIZATION IN 20G2R STEEL WIRE ROD AFTER ANNEALING

Yu. S. KULAKOVSKAYA, M. I. KRAVTSOVA, E. V. YERMACHENOK, T. I. SIDORENKO, T. P. KURENKOVA,
OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,
Zhlobin, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str.

One of the key quality indicators for coiled steel products, which is standardized and monitored during certification, is the depth of the decarburized layer on the surface. This layer forms during both rolling and heat treatment. Decarburization and scale formation significantly reduce the mechanical properties of the surface layers of steel products, making the surface more susceptible to scratches, scoring, and other defects during rolling, calibration, and cold heading. The formation of a decarburized layer necessitates additional machining costs, leading to increased metal waste and the disposal of a considerable amount of steel.

This article presents an experimental study aimed at identifying one of the causes of localized decarburization in 20G2R steel wire rod after annealing.

Keywords. Decarburized layer, wire rod, heat treatment, plastic deformation, surface defects.

For citation. Kulakovskaya Yu.S., Kravtsova M.I., Yermachenok E.V., Sidorenko T.I., Kurenkova T.P. Determination of the cause of local decarburization in 20G2R steel wire rod after annealing. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 60–66. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-60-66>.

Введение

Задача современного этапа развития металлургического производства – это улучшение качества металлопроката и изготавливаемых из него изделий, повышение их работоспособности, надежности, долговечности, которые обеспечивают безопасность при дальнейшей эксплуатации конкретного изделия. Однако требования в снижении затрат, экономии материальных и энергетических ресурсов также остро стоят на повестке дня. При этом надежная и безопасная работа металлоизделий и технических устройств

при эксплуатации в значительной мере обуславливается структурой и свойствами поверхностных слоев металлоизделий и обеспечивается оптимизацией режимов технологических процессов.

С целью выявления браковочных признаков и определения соответствия требованиям нормативно-технической документации в процессе производства горячекатаного проката проводится тщательный контроль технических характеристик, макро- и микроструктуры [1].

В настоящей работе рассмотрено производство сортового проката и катанки в бухтах из стали марки 20Г2Р. Особенностью этих сталей является сочетание высокой технологической пластичности с хорошей прокаливаемостью. По сравнению с традиционными хромистыми сталями (например, 35Х, 38ХА, 40Х) боросодержащие обладают меньшим сопротивлением деформированию при холодной штамповке, что обеспечивает хорошую штампуемость и увеличивает стойкость холодновысадочного инструмента приблизительно на 5% [1].

При аттестации горячекатаного бунтового проката важными показателями качества, которые подвергаются нормированию и контролю, являются масса окалины и глубина обезуглероженного слоя (ОБС) на поверхности проката, который формируется [2] вследствие выгорания части углерода при нагреве металла как при прокатке, так и последующей термической обработке. Обезуглероживание и окалинообразование существенно снижают механические свойства (прочность, твердость, сопротивление изнашиванию и деформации) в поверхностных слоях металлопроката. Поверхность становится восприимчивой к образованию рисок, задигов, царапин при прокатке, калибровке и холодной высадке [1].

Таким образом, проблема уменьшения обезуглероженного слоя неизбежно связана с улучшением качества металла и снижением брака. С этой целью проведено экспериментальное исследование влияния незначительных поверхностных дефектов до проведения термической обработки на рост ОБС после отжига.

Литературный обзор

Рассмотрим понятие обезуглероживания стали более подробно. Обезуглероженный слой – это обедненный углеродом слой металла, который образуется в результате взаимодействия углерода, содержащегося в стали, с кислородом или водородом окружающей среды в процессе термической обработки или прокатки (рис. 1) [3–6].

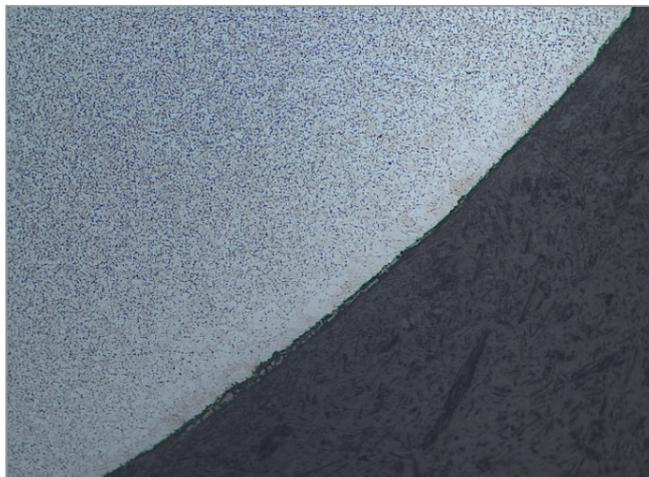


Рис. 1. Обезуглероженный слой на образце катанки. $\times 100$

Образование обезуглероженного слоя происходит в результате двух процессов: диффузии и окисления. В процессе тепловой обработки металла при высоких температурах и в присутствии кислорода или водорода происходит окисление углерода в поверхностном слое по реакции: $C+O_2 \rightarrow CO_2$ [3], что приводит к его выделению из структуры.

Глубину обезуглероженного слоя определяют металлографическими методами, методом замера термоэлектродвижущей силы, химическим методом, методом замера твердости и микротвердости. Наиболее предпочтительным из вышеперечисленных является металлографический метод.

Согласно методу М (металлографический метод) ГОСТ 1763-68, различают две зоны обезуглероживания: зону полного и частичного обезуглероживания. Структура полностью обезуглероженной зоны представляет собой чистый феррит. В некоторых источниках [5] также отмечается, что в стали с ферритной структурой в поверхностном слое при обезуглероживании значительно вырастают зерна (рис. 2).

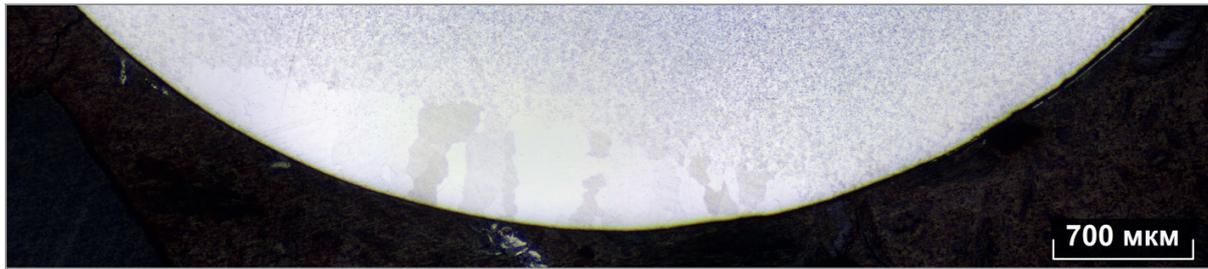


Рис. 2. Выросшее ферритное зерно в поверхностном слое

Зона частичного обезуглероживания характеризуется структурой, отличной от основной. По мере удаления от кромки образца доля феррита постепенно уменьшается до тех пор, пока содержание углерода не будет соответствовать основной структуре металла. Также обезуглероженный слой классифицируют по характеру распределения. Различают местное (на отдельных участках периметра образца [4]) и равномерное (по всему периметру образца) обезуглероживание.

По результатам анализа различных источников установлено, что причинами появления и роста обезуглероженного слоя в стали могут быть следующие параметры:

1. Скорость и температура нагрева [6, 7].
2. Время выдержки при высокой температуре.
3. Давление в камере печи [6].
4. Состав печной газовой атмосферы.

Водород, водяной пар, двуокись углерода и кислород обезуглероживают поверхностный слой металла. Для предохранения деталей от окисления и обезуглероживания при высоких температурах в рабочее пространство печи искусственно вводят защитную газовую среду, называемую защитной и контролируемой атмосферой. В составе защитных атмосфер могут встречаться инертные газы (аргон, неон и чистый азот, не содержащие даже следов кислорода), а также продукты диссоциации аммиака [7].

5. Отношение воздуха к газу.

При сжигании топлива с недостатком воздуха в продуктах горения топлива появляется водород, который в присутствии водяного пара является самым сильным обезуглероживающим газом.

6. Сорт сжигаемого топлива.
7. Степень обжатия металла при обработке давлением.

Чем больше степень обжатия и увеличение поверхности изделия, тем меньше глубина обезуглероживания конечного продукта прокатки [6].

8. Наличие окалины на поверхности.

Образующиеся в процессе окисления продукты, откладываясь на поверхности, уменьшают процесс обезуглероживания. Чем больше скорость образования окалины, тем меньше глубина обезуглероженного слоя [5, 8].

9. Химический состав стали.

Легирующие элементы, входящие в состав стали, оказывают воздействие на процесс обезуглероживания и величину обезуглероженного слоя через скорость диффузии углерода. Чем больше скорость диффузии углерода, его активность и увеличение температуры α - γ -превращения, тем больше вероятность появления обезуглероживания на поверхности изделия [8].

Так как спрогнозировать влияние легирующих элементов на величину обезуглероженного слоя достаточно сложно в силу имеющихся важнейших факторов, влияющих на этот процесс, то это можно ценить по крайней мере с теоретической точки зрения [9–11].

Хром снижает скорость окалинообразования и повышает температуру α - γ -превращения. Этим факторам, способствующим увеличению обезуглероживания, противодействуют другие факторы – замедление диффузии углерода и уменьшение его активности. Благодаря этому в большинстве случаев склонность к обезуглероживанию при введении хрома уменьшается.

Кремний уменьшает скорость окалинообразования благодаря образованию промежуточных слоев из химического соединения Fe_2SiO_4 . Он повышает активность углерода и температуру α - γ -превращения. Эти два последних фактора, увеличивающие окалинообразование, перекрывают влияние кремния, несколько уменьшающего скорость диффузии углерода в аустените. Поэтому кремний повышает склонность к обезуглероживанию.

Марганец не влияет на обезуглероживание, так же как и на скорость диффузии углерода. Уменьшение активности углерода и снижение температуры α - γ -превращения приводят, как правило, к небольшому уменьшению склонности стали к обезуглероживанию.

Никель повышает активность углерода и скорость его диффузии в аустените. Он существенно не влияет на скорость окалинообразования, однако ускоряет образование прочных металлических промежуточных слоев. Кроме того, никель снижает температуру α - γ -превращения и, таким образом, в большинстве случаев приводит к уменьшению склонности к обезуглероживанию.

Ванадий и вольфрам усиливают воздействие других легирующих элементов. Так же как и хром, ванадий является карбидообразующим элементом, предупреждающим обезуглероживание деталей. Вольфрам снижает температуру α - γ -превращения, тем самым уменьшая возможность появления обезуглероженного слоя [8].

Таким образом, все перечисленные выше параметры в той или иной мере влияют на появление и дальнейший рост обезуглероженного слоя. Степень их воздействия различается в зависимости от оборудования и технологии производства продукции.

Экспериментальная часть

Для установления закономерностей образования обезуглероживания местного характера были подготовлены горячекатаные образцы катанки стали марки 20Г2Р с искусственно нанесенными дефектами: образец № 1 – вмятины от ударов молотка, образец № 2 – дефекты после трения образца об образец (металл о металл), образец № 3 – потертости от напильника. Для образцов с дефектами была проведена термическая обработка в промышленных условиях – нагрев и выдержка при 780 °С в течение 180 мин, охлаждение в атмосфере печи.

Подготовку образцов для установления причин образования ОБС местного характера осуществляли с помощью автоматической шлифовально-полировальной системы ACCURA 102, которая позволяет добиваться высокого качества поверхности металлографических шлифов. На подготовленных образцах проведено металлографическое исследование влияния дефектов на величину и характер распределения обезуглероженного слоя.

Визуальный осмотр и исследование поверхности образцов выполняли с помощью стереоскопического микроскопа STEMI 2000CS.

Металлографическое исследование глубины обезуглероживания и размера действительного зерна в зоне ОБС проводили с использованием моторизованной системы для анализа микроструктуры и автоматической оценки загрязненности стали неметаллическими включениями Thixomet согласно методу М ГОСТ 1763-68 и методом сравнения полученного изображения со стандартной шкалой ГОСТ 5639-82 на шлифах, травленных в 2%-ном растворе азотной кислоты в спирте.

Результаты исследований

Образец № 1

На горячекатаный образец № 1 искусственно нанесены незначительные вмятины глубиной 0,04 мм с помощью молотка с двух диаметрально противоположных сторон.

При микроструктурном исследовании после термической обработки в поперечном сечении образца в местах механического воздействия наблюдаются углубления в виде вмятин с сопровождающим их обезуглероженным слоем. В зоне ОБС отмечены выросшие зерна феррита № 2. В результате измерения глубины ОБС были получены следующие значения: полный обезуглероженный слой составил от 0,54 до 0,6 мм, глубина общего – от 0,77 до 0,79 мм (рис. 3).

Образец № 2

Повреждения, отмеченные на образце № 2, были нанесены в результате трения одного образца о другой (металл о металл) с двух противоположных сторон. В ходе визуального осмотра на поверхности образца были отмечены локальные продольные несплошности, имеющие металлический блеск, без заметного углубления.

В результате металлографического исследования термически обработанного образца установлено, что обезуглероженный слой имеет местный характер: обнаружен с двух диаметрально противоположных сторон, соответствующих местам потертостей. В зоне обезуглероженного слоя наблюдаются выросшие ферритные зерна 2-го, 1-го балла. Глубина полного ОБС составляет от 0,42 до 0,54 мм, глубина общего – от 0,57 до 0,70 мм (рис. 4).

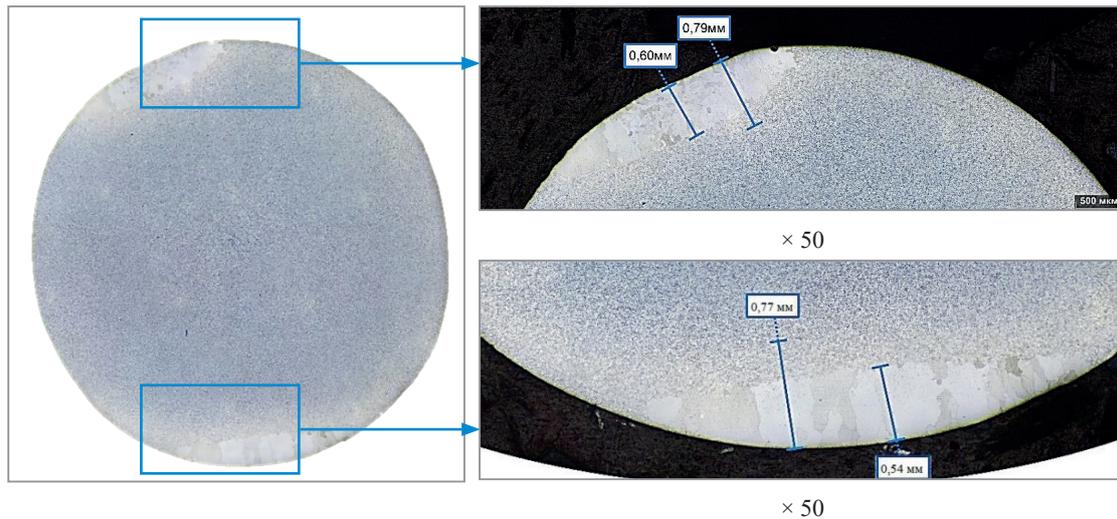


Рис. 3. Обезуглероженный слой на образце № 1

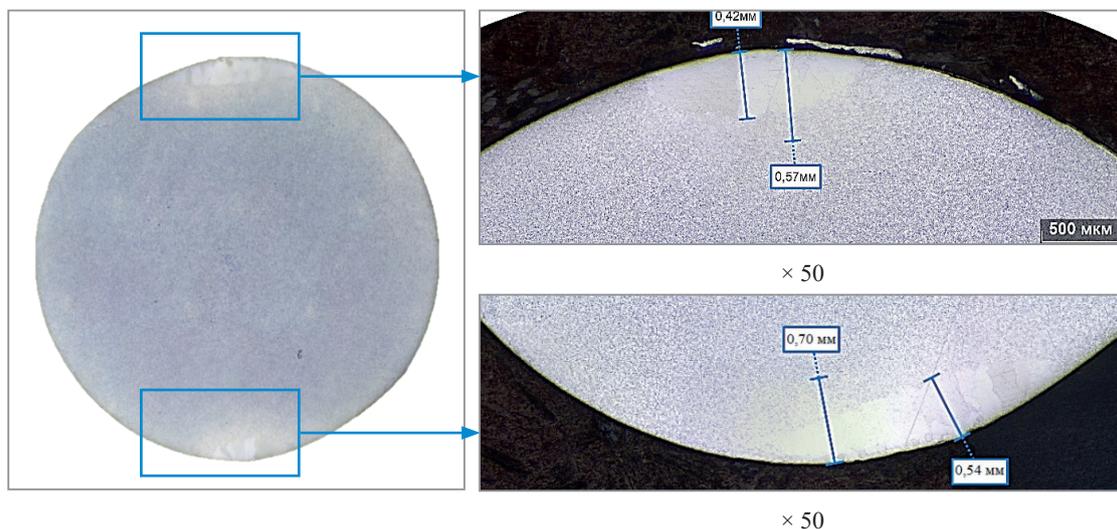


Рис. 4. Обезуглероженный слой на образце № 2

Образец № 3

Вдоль образца № 3 в горячекатаном состоянии были нанесены потертости с двух диаметрально противоположных сторон в результате трения напильника об образец. При этом трение проводили перпендикулярно направлению проката.

В результате микроисследования образца после термообработки установлено, что в местах дефектов, оставленных напильником, обезуглероженный слой носит местный характер: обнаружен с двух диаметрально противоположных сторон. Размер ферритного зерна в обезуглероженном слое – № 3, 2. Глубина полного ОБС составляет от 0,25 до 0,30 мм, глубина общего – от 0,37 до 0,40 мм (рис. 5).

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показывают, что для установления причин образования после отжига обезуглероживания местного характера необходимо учитывать влияние не только температурно-скоростных параметров обработки катанки, но и принимать во внимание процессы, протекающие в металле как в горячекатаном состоянии (до проведения термической обработки), так и в процессе ТО.

Так, при нагреве деформированного металла в нем протекают процессы возврата, полигонизации и рекристаллизации, обуславливающие возвращение всех свойств к свойствам металла до деформации.

При нагреве до сравнительно низких температур (300–400°C [12]) начинается процесс возврата, под которым понимают повышение структурного совершенства наклепанного металла в результате уменьшения плотности дефектов строения, однако при этом еще не наблюдается заметных изменений структуры, видимой в световом микроскопе, по сравнению с деформированным состоянием.

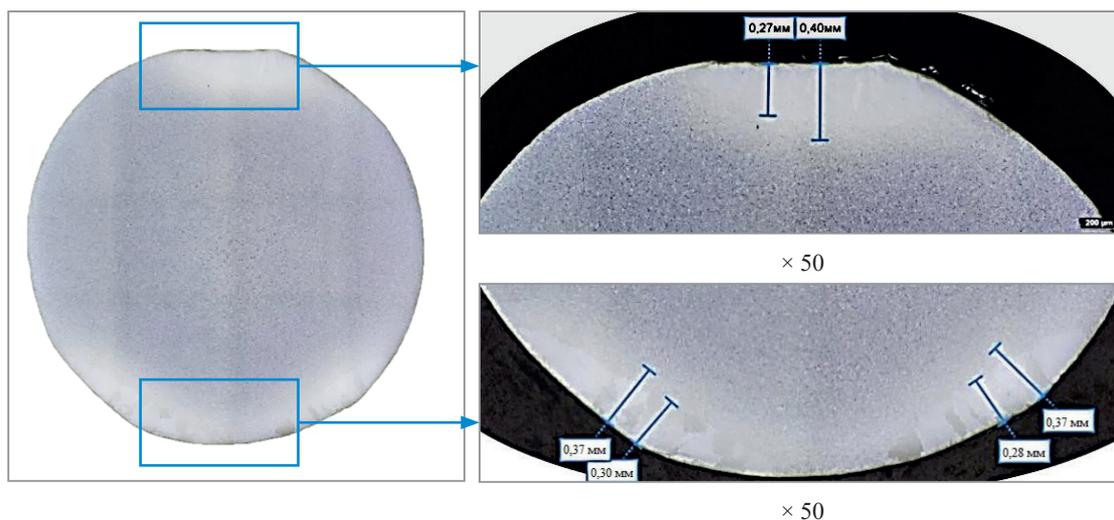


Рис. 5. Обезуглероженный слой на образце № 3

При дальнейшем повышении температуры подвижность атомов возрастает и при достижении определенной температуры образуются новые равноосные зерна. Образование новых равноосных зерен вместо ориентированной волокнистой структуры деформированного металла называется рекристаллизацией обработки или первичной рекристаллизацией.

После завершения первичной рекристаллизации в процессе последующего нагрева происходит рост одних рекристаллизованных зерен за счет других путем передвижения большеугловых границ так, что зерна с вогнутыми границами «поедают» зерна с выпуклыми границами. Так как выпуклые границы чаще имеются у малых зерен, а вогнутые – у больших, то в процессе роста последних малые зерна исчезают. Процесс роста новых рекристаллизованных зерен называют собирательной рекристаллизацией. Основной причиной собирательной рекристаллизации является стремление к уменьшению зернограничной («поверхностной») энергии благодаря уменьшению протяженности границ при росте зерна.

Зерна, растущие с большой скоростью, можно условно рассматривать как зародышевые центры и поэтому процесс их роста получил название вторичной рекристаллизации. В результате вторичной рекристаллизации образуется множество мелких зерен и небольшое число очень крупных зерен. Вторичная рекристаллизация, вероятно, вызвана благоприятной для роста кристаллографической ориентировкой отдельных зерен, меньшей, чем у других зерен концентрацией дефектов (величиной объемной энергии) и более высокой подвижностью границ в результате неравномерного выделения примесей.

Величина зерна после холодной пластической деформации и рекристаллизации может быть больше или меньше исходного зерна. Величина зерна зависит от температуры рекристаллизационного отжига, его продолжительности, степени предварительной деформации, химического состава сплава, размера исходного зерна, наличия нерастворимых примесей и т. д. При данной степени деформации с повышением температуры и при увеличении продолжительности отжига размер зерна возрастает [12, 13].

Выводы

1. Проанализированы и выявлены параметры, влияющие на появление и последующий рост обезуглероженного слоя в стали.
2. Проведен эксперимент, в ходе которого были подготовлены и подвергнуты термической обработке в промышленных печах образцы катанки стали марки 20Г2Р с искусственно нанесенными дефектами.
3. В результате экспериментального исследования на всех образцах обнаружен обезуглероженный слой, имеющий схожие признаки: местный характер расположения (в местах, где зафиксированы дефекты) и выросшее крупное ферритное зерно (от № 3 до № 1).
4. Проведенное исследование указывает на то, что наличие дефектов небольшой глубины и протяженности, полученных в результате деформации металла в горячекатаном состоянии (образовавшихся от механических повреждений при транспортировке и/или хранении – потертости, продиры и т. д.), может привести к образованию обезуглероженного слоя местного характера с крупным зерном феррита в месте дефекта после термической обработки (отжиг).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнение технологических методов подготовки структурно-механических свойств поверхности проката для высадки метизов с целью снижения воздействия на работников опасных и вредных факторов / А. А. Филиппов [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 10–1. – С. 88–96.
2. Преимущества экспресс-метода определения массы окалины и обезуглероженного слоя бунтового проката / Э. В. Парусов [и др.]. – М.: *Металлургия*, 2017.
3. <http://structure.by/index.php/studentam/o-metallakh-i-nemetallakh/137-obezuglerozhivanie>. – Дата доступа: 01.08.2024.
4. Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя: ГОСТ 1763–68. – Введ. 17.12.1992. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1992. – 24 с.
5. <https://studfile.net/preview/5056145/page:22/>. – Дата доступа: 30.08.2024.
6. **Копытов, В. Ф.** Нагрев стали в печах / В. Ф. Копытов. – М.: *Металлургиздат*, 1955. – 264 с.
7. **Самохоцкий, А. И.** Технология термической обработки металлов / А. И. Самохоцкий, Н. Г. Парфеновская. – М.: *Машиностроение*, 1976.
8. Техника и технологии машиностроения: материалы VI междунар. конф. (Омск, 20–21 апреля 2017 г.). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. – 174 с.
9. **Рахштадт, А. Г.** Пружинные стали и сплавы / А. Г. Рахштадт. – М.: *Металлургия*, 1982. – 400 с.
10. **Новиков, И. И.** Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М.: *Металлургия*, 1986. – 480 с.
11. **Захаров, Б. В.** Прогрессивные технологические процессы и оборудование при термической обработке металлов / Б. В. Захаров, В. Н. Берсенева. – М.: Высшая школа, 1988. – 71 с.
12. **Гуляев, А. П.** *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М.: *Металлургия*, 1986. 544 с.
13. **Лахтин, Ю. М.** *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю. М. Лахтин. – М.: *Металлургия*, 1983. – 359 с.

REFERENCES

1. **Filippov A. A., Pachurin G. V., Matveev Ju. I., Kuz'min A. N.** Sravnenie tehnologicheskikh metodov podgotovki strukturno-mehaničeskikh svojstv poverhnosti prokata dlja vysadki metizov s cel'ju snizhenija vozdejstvija na rabotnikov opasnyh i vrednyh faktorov [Comparison of technological methods for preparing structural and mechanical properties of the rolled surface for the installation of hardware in order to reduce the impact of hazardous and harmful factors on workers]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2016, no. 10–1, pp. 88–96.
2. **Parusov Je. V., Sychkov A. B., Gubenko S. I., Chujko I. N., Sagura L. V.** *Preimushhestva jekspress-metoda opredelenija massy okaliny i obezuglerozhennogo sloja buntovogo prokata* [Advantages of the express method for determining the mass of scale and decarburized layer of rolled products]. Moscow, Metallurgya Publ., 2017.
3. <http://structure.by/index.php/studentam/o-metallakh-i-nemetallakh/137-obezuglerozhivanie>. 01.08.2024.
4. GOST 1763-68. Minsk, Belarus. gos. in-t standartizacii i sertifikacii, 1992, 24 p.
5. <https://studfile.net/preview/5056145/page:22>. 30.08.2024.
6. **Kopytov V. F.** *Nagrev stali v pechah* [Heating steel in furnaces]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1955, 264 p.
7. **Samohockij A. I., Parfenovskaja N. G.** *Tehnologija termicheskoj obrabotki metallov* [Technology of heat treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976 p.
8. **Eremín E. N.** Tehnika i tehnologii mashinostroenija [Engineering and technology of mechanical engineering]. *Materialy VI mezhdunarodnoj konferencii (Omsk, 20–21 aprelja 2017 g.) = Proceedings of the VI International Conference (Omsk, April 20–21, 2017)*. Omsk, Izd-vo OmGTU Publ., 2017, 174 p.
9. **Rahshadt A. G.** *Pruzhinnye stali i splavy* [Spring steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Puubl., 1982, 400 p.
10. **Novikov I. I.** *Teorija termicheskoj obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 480 p.
11. **Zaharov B. V., Berseneva V. N.** *Progressivnye tehnologičeskie processy i oborudovanie pri termicheskoj obrabotke metallov* [Progressive technological processes and equipment for heat treatment of metals]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1988, 71 p.
12. **Guljaev A. P.** *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 544 p.
13. **Lahtin Ju. M.** *Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, 359 p.