

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ЗЕРНА АУСТЕНИТА ЦЕМЕНТУЕМЫХ МАРОК СТАЛИ**

Н. А. Ходосовская, И. А. Ковалева

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,  
г. Жлобин, Республика Беларусь

*Для ряда цементуемых низкоуглеродистых сталей (16MnCrS5, 20MnV6, 18ХГТ, 25ХГТ, E470) в зависимости от требований потребителя, необходимо получение стабильного мелкого аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве и длительной выдержке. Для обеспечения стабильности величины аустенитного зерна необходимо минимально достаточное количество ниобия в пределах согласно спецификации потребителя. В работе представлены исследования по освоению технологии производства цементуемых сталей со стабильной величиной аустенитного зерна с апробацией внесения изменений в технологию внепечной обработки. После корректировки технологии внепечной обработки стали максимальный размер аустенитного зерна в исследуемых образцах соответствовал 3–5 баллу. Результаты металлографических исследований показывают, что корректировка технологии внепечной обработки стали марки 16MnCrS5 не позволила в полной мере добиться поставленной цели, то есть получить величину зерна аустенита в цементуемой стали не крупнее 5 балла. Принимая во внимание полученные результаты металлографических исследований после корректировки технологии внепечной обработки и микролегирования стали ниобием, выработана дальнейшая стратегия по совершенствованию технологии производства цементуемых марок стали, устойчивых к росту аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве и длительной выдержке в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».*

*Ключевые слова:* величина аустенитного зерна; внепечная обработка; высокотемпературный нагрев; длительная выдержка; микроструктура; модифицирование; зародыши

## **STUDYING THE INFLUENCE OF STEEL TREATMENT ON THE VALUE AUSTENITE GRAINS OF CEMENTED STEEL GRADES**

N. A. Hodosovskaya, I. A. Kovaliova

OJSC «BSW – management company of «BMC» holding»,  
Zhlobin, Republic of Belarus

*For a number of carburized low-carbon steels (16MnCrS5, 20MnV6, 18CrMnTi, 25CrMnTi, E470), depending on the requirements of the consumer, it is necessary to obtain stable fine austenite grains during high-temperature heating and long-term holding. To ensure the*

*stability of the austenite grain size, a minimum sufficient amount of niobium is required within the limits according to the customer's specification. The paper presents studies on the development of the technology for the production of case-hardened steels with a stable austenite grain size with approbation of changes in the out-of-furnace processing technology. After adjusting the technology of out-of-furnace processing of steel, the maximum size of austenite grains in the studied samples corresponded to 3–5 points. The results of metallographic studies show that the adjustment of the technology of out-of-furnace processing of steel grade 16MnCrS5 did not allow to fully achieve the goal, that is, to obtain an austenite grain size in case-hardened steel no larger than 5 points. Taking into account the results of metallographic studies after adjusting the technology of out-of-furnace processing and microalloying of steel with niobium, a further strategy has been developed to improve the technology for the production of carburized steel grades that are resistant to the growth of austenite grains during high-temperature heating and long-term holding in the conditions of JSC «BMZ – the managing company of the holding» BMK».*

**Key words:** austenite grain size; out-of-furnace processing; high temperature heating; long exposure; microstructure; modification; embryos

**e-mail:** lfm.icm@bmz.gomel.by; nl.icm@bmz.gomel.by

Современная техника предъявляет все более высокие требования к качеству стали. В тех случаях, когда проведение операций, обеспечивающих требуемое качество металла, непосредственно в самом агрегате связано с потерей его производительности и недостаточно эффективно, операции переносят в ковш или во вспомогательную емкость. Проведение технологических операций вне плавильного агрегата называют вторичной металлургией (ковшевой металлургией, внеагрегатной обработкой, внепечной обработкой, ковшевым рафинированием). Основную цель вторичной металлургии можно сформулировать как осуществление ряда технологических операций быстрее и эффективнее по сравнению с решением аналогичных задач в обычных сталеплавильных агрегатах.

В настоящее время методами внепечной металлургии обрабатывают сотни миллионов тонн стали массового назначения, установки для внепечной обработки имеются на всех заводах качественной металлургии. [1]

Для ряда цементуемых низкоуглеродистых сталей (16MnCrS5, 20MnV6, 18ХГТ, 25ХГТ, Е470), производство которых освоено в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», необходимо обеспечить получение стабильного мелкого аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве и длительной выдержке. В соответствии с требованиями некоторых потребителей размер аустенитного зерна после заданной термообработки (нагрев до температуры 925–980 °С и выдержка от 8 до 50 ч) не должен быть ниже 5 балла согласно шкалам стандартов ISO 643 [2] или ASTM E 112 [3]. При металлографических исследованиях было установлено, что максимальный размер аустенитного зерна в исследуемых образцах данных марок стали соответствует от 0 до 5 балла (рис. 1). [4]

Для решения данной проблемы было опробовано внесение корректировок по карбидообразующим элементам (ванадий, титан, ниобий, алюминий) в пределах значений, нормируемых спецификацией потребителя. В результате проведенной работы на начальном этапе были получены положительные результаты при корректировке химического состава ниобием для стали марки Е470. Однако, при дальнейшей отработке технологии производства цементуемых марок стали и оценке влияния дополнительной присадки ниобия однозначных стабильных результатов достигнуто не было. Для полу-

чения требуемых значений по величине аустенитного зерна минимально достаточное количество ниобия на практике оказалось выше допустимого уровня его содержания, указанного в спецификации потребителя.

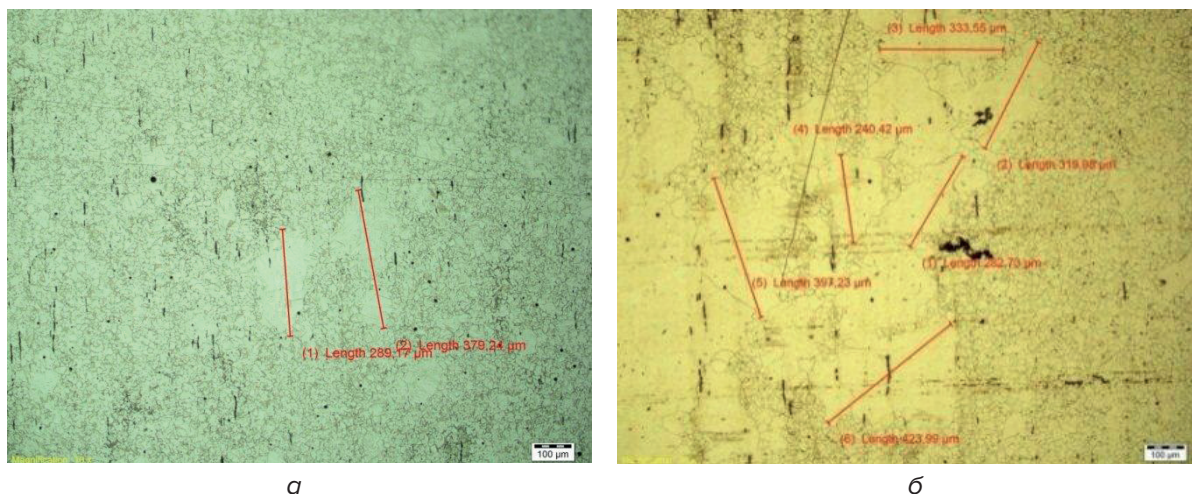


Рис. 1. Микроструктура образца стали 16MnCr5 после термообработки:  
а – 2,0 балл (нагрев до 930 °С, выдержка – 8 ч);  
б – 0 балл и процесс растворения зерен (нагрев до 930 °С, выдержка – 30 ч)

Учитывая неоднозначный опыт проведенных исследований, а также дополнительный анализ литературных источников по данной проблеме было принято решение продолжить работу по освоению технологии производства цементуемых сталей, обеспечивающую получение стабильной величины аустенитного зерна с апробацией внесения изменений в технологию внепечной обработки при производстве таких марок.

Несмотря на многоплановость задач, стоящих при решении проблемы повышения качества металла методами вторичной металлургии, используемые при этом технологические приемы немногочисленны и по существу сводятся к интенсификации следующих процессов:

1. Взаимодействия металла с жидким шлаком или твердыми шлакообразующими материалами (интенсивное перемешиванием специальной мешалкой, продувкой газом, вдуванием твердых шлакообразующих материалов непосредственно в массу металла, электромагнитное перемешивание и т. п.).

2. Газовыделения (обработка металла вакуумом или продувка инертным газом).

3. Взаимодействия с вводимыми в ванну материалами для раскисления и легирования (подбор комплексных раскислителей оптимального состава; введение реагентов в глубь металла в виде порошков, блоков, специальной проволоки; с использованием патронов, выстреливаемых в глубь металла; искусственное перемешивание для улучшения условия удаления продуктов раскисления и т. д.; организация тем или иным способом перемешивания ванны, интенсификация процессов массопереноса – обязательно условие эффективности процесса). [1]

В настоящее время в ходе внепечной обработки стали производители металла добиваются очень низких содержаний в металле фосфора и серы, значительного снижения загрязненности металла неметаллическими включениями и концентрации водорода в готовой продукции. На завершающей стадии внепечной обработки за счет проведения модифицирования и микролегирования удается существенно повысить физико-механические, эксплуатационные и технологические свойства стали.

При введении добавок непосредственно перед затвердеванием в расплав минимально перегретый над температурой ликвидуса, дополнительно реализуется механизм инокулирования как за счет ввода готовых (частиц железа в составе модификаторов), так и получения искусственных (оксидов, нитридов, карбонитридов) подложек, действующих в качестве зародышей в кристаллизующемся расплаве. Это воздействие, как правило, не ограничивается влиянием на первичную структуру и свойства литого металла, но сказывается также и на качестве деформируемого и термически обработанного материала (изделия). Трансформация модифицирующей добавки в микролегирующую реализуется как за счет механизма воздействия на зеренную структуру, так и за счет формирования «вторичных фаз» различной природы и растворимости (и, соответственно, – степени дисперсности). При этом реагенты работают в металле не только как модификаторы неметаллических включений, но и как микролегирующие элементы, способные взаимодействовать с вредными примесями. В полной мере положительное влияние активной добавки реализуется той ее частью («эффективной»), которая будет находиться в твердом растворе в так называемом «чистом», неокисленном состоянии, остающемся после неизбежных потерь при вводе в жидкий металл. Именно с помощью этой части можно осуществить более глубокое воздействие на микроструктуру металла, чистоту границ зерен, реализовать возможность образования соединений с цветными примесями, водородом и т.п. [5]

Существующая в настоящее время технология внепечной обработки цементуемых марок стали предусматривает отдачу кремнийсодержащих материалов и вторичного чушкового алюминия после выпуска расплава из ДСП и продувку аргоном.

В рамках корректировки технологии внепечной обработки при производстве стали марки 16MnCr5 были реализованы следующие мероприятия. При выпуске расплава из ДСП кремнийсодержащие ферросплавы не присаживались. В начале обработки плавки на установке внепечной обработки стали осуществлялась продувка расплава азотом в течение 10 мин (при наведении шлака), а далее – аргоном. Отдача кремнийсодержащих ферросплавов проводилась после окончания продувки азотом, а присадка чушкового алюминия – во время выпуска стали из ДСП.

Данные корректировки осуществлялись с целью получения устойчивых оксидов, нитридов и карбонитридов, которые, как известно, оказывают существенное влияние на формирование вторичной структуры и конечные свойства проката и готовых изделий. Природная величина зерна в значительной степени определяется процессами, протекающими при легировании и раскислении стали. Неметаллические включения, образующиеся при раскислении стали, являются центрами кристаллизации, а при дальнейшем нагреве стали выполняют роль «барьеров» и таким образом препятствуют росту зерна. [6] Так, например, устойчивые оксиды, нитриды, карбонитриды располагаются в междоузлиях кристаллической решетки. Основной эффект воздействия междоузельных атомов заключается в том, что они скапливаются на дислокациях и препятствуют их движению, вызывая упрочнение. В последующем образуются зародыши оксидных, нитридных и карбонитридных фаз на дислокациях, которые уже сами обуславливают дальнейшее сопротивление их движению.

После разливки полученные непрерывнолитые заготовки сечением 300×400 мм были прокатаны в круглый сортовой прокат диаметром 120 мм. Для исследования величины аустенитного зерна были отобраны пробы проката и подвергнуты нагреву до 930 °С с последующей выдержкой в печи около 50 ч и охлаждением в масле.

В ходе металлографического исследования образцов, проведенного с использованием инвертированного металлографического микроскопа отраженного света Olympus GX-51 с цифровой системой изображений, было определено, что максимальный размер аустенитного зерна в исследуемых образцах соответствует 3–5 баллу (рис. 2).

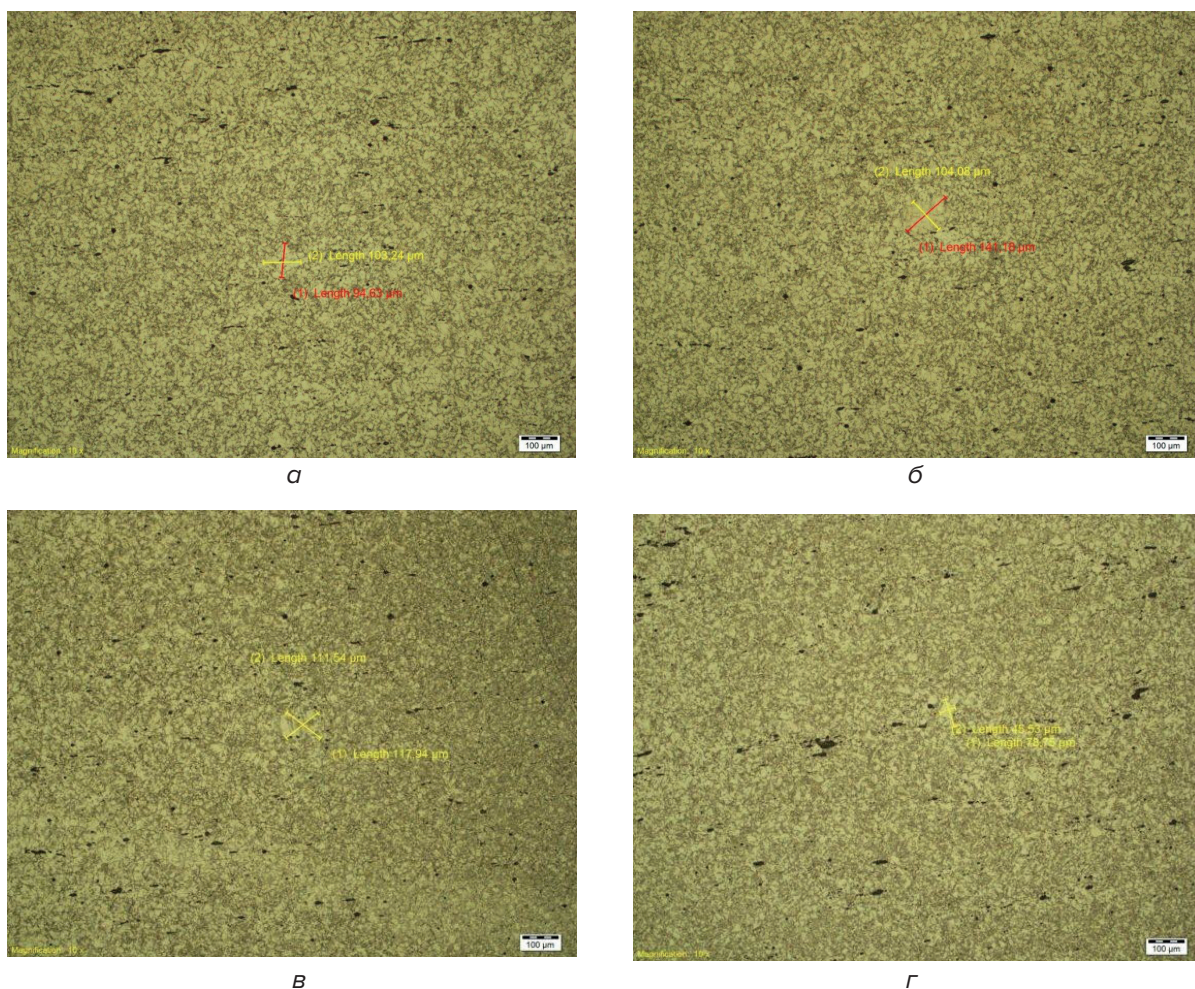


Рис. 2. Микроструктура образца стали 16MnCr5 после термообработки (нагрев до 930 °С, выдержка – 50 ч):  
*a* – 4,0 балл; *б* – 3,0 балл; *в* – 3,5 балла; *г* – 5,5 балла

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании полученных результатов металлографических исследований можно сделать вывод о том, что внесенная корректировка технологии внепечной обработки стали марки 16MnCr5 не позволила в полной мере добиться поставленной цели, то есть получить величину зерна аустенита в цементуемой стали не крупнее 5 балла.

Принимая во внимание полученные результаты металлографических исследований после корректировки технологии внепечной обработки и микролегирования стали ниобием, выработана дальнейшая стратегия по совершенствованию технологии производства цементуемых марок стали, устойчивых к росту аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве и длительной выдержке в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Воскобойников, В. Г. Общая металлургия [Текст] : учебник для вузов. / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. – 6-ое изд., перераб. и доп. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2022. – 768с.
2. Сталь. Метрографическое определение видимого размера зерна : ISO 643. – 4-ое издание, 2019-12. – 26 с.

3. Стандартные методы для определения средней величины зерна : ASTM E 112-13, 2013. – 69 с.
4. Ходосовская, Н. А. Комплексное исследование морфологии аустенита цементуемых сталей после высокотемпературной выдержки / Н. А. Ходосовская, И. А. Ковалева // Сталь. – 2022. – № 2. – С. 23–26.
5. Голубцов, В. А. Теория и практика добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов. – Челябинск, 2006. – 423 с.
6. Борнацкий, И. И. Производство стали / И. И. Борнацкий, В. Ф. Михневич, С. А. Яргин. – М. : Metallurgia, 1991. – 400 с.

#### REFERENCES

1. Voskoboinikov, V. G. General metallurgy [Text]: a textbook for universities / V. G. Voskoboinikov, V. A. Kudrin, A. M. Yakushev. – 6th ed., revised. and additional. – М. : ICC «Akademkniga», 2022. – 768 p.
2. Steel. Micrographic defenition of visible grain size : ISO 643. – 2019-12. – 26 p.
3. Standart methods for determing the average grain size : ASTM E 112-13, 2013. – 69 p.
4. Khodosovskaya N. A. A comprehensive study of the morphology of austenite in cemented steels after high-temperature holding / N. A. Khodosovskaya, I. A. Kovaleva // Steel. – 2022. – No. 2. – Pp. 23–26.
5. Golubtsov, V. A. Theory and practice of additives to steel outside the furnace / V. A. Golubtsov. – Chelyabinsk, 2006. – 423 p.
6. Bornatsky, I. I. Steel production / I. I. Bornatsky, V. F. Mikhnevich, S. A. Yargin. – М. : Metallurgy, 1991. *цементуемых* – 400 p.

*Статья поступила в редакцию 11.05.2023 г*