

УДК 669.112.227.3:621.771.25

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА НА РАЗВИТИЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БУНТОВОГО ПРОКАТА

ПАРУСОВ Э. В.<sup>1</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
ГУБЕНКО С. И.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
СЫЧКОВ А. Б.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.,  
ЛУЦЕНКО В. А.<sup>4</sup>, д. т. н., с. н. с.,  
САГУРА Л. В.<sup>5\*</sup>, к. т. н.

<sup>1</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепр, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4290-6498

<sup>2</sup> Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, пр. Ленина, 38, Магнитогорск, Россия, 455000, тел. +7 (919) 348-66-84, e-mail: absyckov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

<sup>4</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепр, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 47-29-25, e-mail: lutsenko@optima.com.ua, ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

<sup>5\*</sup> Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепр, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: slv\_metal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

**Аннотация. Введение и состояние проблемы.** Одним из нежелательных и распространенных дефектов микроструктуры, который снижает качественные показатели высокоуглеродистого бунтового проката (катанки) и эксплуатационные характеристики изготавливаемых из него изделий является обезуглероживание поверхности. При этом сопротивление металла знакопеременным нагрузкам определяется глубиной обезуглероженного слоя, то есть фактическим различием микроструктуры на поверхности от структуры основного металла. Известно [1, 2], что для развития процесса обезуглероживания на поверхности металла при нагреве в печи газовая атмосфера должна оказывать не очень сильное окислительное воздействие. Если скорость окисления будет больше скорости диффузии углерода в стали, то интенсифицируется окалинообразование и в этом случае кислород может окислять уже одновременно и углерод и железо.

В большинстве случаев обезуглероженный слой считается неудовлетворительным фактором, однако существует мнение и о положительном влиянии обезуглероживания поверхности бунтового проката на его потребительские свойства. Мягкая обезуглероженная поверхность обеспечивает повышенную пластичность металла при перегибах и скручиваниях из-за малой чувствительности к концентраторам напряжений, высокой сопротивляемости распространению трещин, а также повышению коррозионной стойкости [3]. Формирование в поверхностном обезуглероженном слое остаточных сжимающих напряжений приводит к повышению усталостной прочности и долговечности в процессе эксплуатации стальных канатов [4]. В бунтовом прокате с более развитым поверхностным обезуглероживанием уменьшается вероятность образования закалочных структур (мартенсита) при волочении и вызываемых появлением мартенсита поверхностных трещин и надрывов. Однако при деформации металла способом холодного волочения, путем протяжки бунтового проката через систему монолитных волок, максимальные напряжения при этом сосредоточены на поверхности проката [3–5]. В связи с такой особенностью, равномерность распределения структуры на поверхности и в приповерхностных слоях оказывает решающее воздействие. Следовательно, при изготовлении качественного сортамента высокоуглеродистого бунтового проката необходимо обеспечить минимальную и равномерную глубину обезуглероживания на поверхности металла [3–7].

В работе [11] отмечено влияние микродобавок бора на изменение величины аустенитного зерна, а соответственно и протяженность границ в высокоуглеродистых сталях при повышении температуры аустенитизации в интервале 900...1100 °С.

**Цель работы** - исследование влияния величины аустенитного зерна на глубину обезуглероживания в углеродистой (базовой) стали и стали микролегированной бором.

**Ключевые слова:** обезуглероженный слой, аустенитное зерно, бунтовой прокат, микролегирование, бор

## ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА НА РОЗВИТОК ЗНЕУГЛЕЦЬОВУВАННЯ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА БУНТОВОГО ПРОКАТУ

ПАРУСОВ Е. В.<sup>1</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
ГУБЕНКО С. І.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
СИЧКОВ О. Б.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.,  
ЛУЦЕНКО В. А.<sup>4</sup>, д. т. н., с. н. с.,  
САГУРА Л. В.<sup>5\*</sup>, к. т. н.

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4290-6498

<sup>2</sup> Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>3</sup> Магнітогорський державний технічний університет ім. Г. І. Носова, пр. Леніна, 38, Магнітогорськ, Росія, 455000, тел. +7 (919) 348-66-84, e-mail: absykhkov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

<sup>4</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 47-29-25, e-mail: lutsenko@optima.com.ua, ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

<sup>5\*</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: slv\_metal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

**Анотація. Вступ і стан проблеми.** Одним із небажаних і поширених дефектів мікроструктури, який знижує якісні показники високовуглецевого бунтового прокату (катанки) і експлуатаційні характеристики виробів, які з нього виготовляються, є знеуглецьовування поверхні. При цьому опір металу знакозміним навантаженням визначається глибиною знеуглецьованого шару, тобто фактичним розходженням мікроструктури на поверхні від структури основного металу. Відомо [1, 2], що для розвитку процесу знеуглецьовування на поверхні металу під час нагрівання в печі газова атмосфера повинна чинити не дуже сильну окисну дію. Якщо швидкість окиснення буде більша швидкості дифузії вуглецю в сталі, то інтенсифікується окалиноутворення і в цьому випадку кисень може окиснювати вже одночасно і вуглець і залізо.

У більшості випадків знеуглецьований шар вважається незадовільним фактором, однак існує думка і про позитивний вплив знеуглецьовування поверхні бунтового прокату на його споживчі властивості. М'яка знеуглецьована поверхня забезпечує підвищену пластичність металу у випадку перегинів і скручувань через малу чутливість до концентраторів напружень, високий опір поширенню тріщин, а також підвищення корозійної стійкості [3]. Формування в поверхневому знеуглецьованому шарі залишкових стискаючих напружень зумовлює підвищення втомної міцності і довговічності в процесі експлуатації сталевих канатів [4]. У бунтовому прокаті з більш розвиненим поверхневим знеуглецьовуванням зменшується ймовірність утворення структур загартування (мартенситу) під час волочіння і спричинених появою мартенситу поверхневих тріщин і надривів. Однак у разі деформації металу способом холодного волочіння, шляхом протягання бунтового прокату через систему монолітних волок, максимальні напруги при цьому зосереджені на поверхні прокату [3–5]. У зв'язку з такою особливістю, рівномірність розподілу структури на поверхні і в приповерхневих шарах здійснює вирішальний вплив. Отже, для виготовлення якісного сортаменту високовуглецевого бунтового прокату необхідно забезпечити мінімальну і рівномірну глибину знеуглецьовування на поверхні металу [3–7].

У праці [11] відзначено вплив мікродобавок бору на зміну величини аустенітного зерна, і відповідно протяжність кордонів у високовуглецевих сталях у випадку підвищенні температури аустенітизації в інтервалі 900...1100 С.

**Мета роботи** - дослідження впливу величини аустенітного зерна на глибину знеуглецьовування у вуглецевій (базовій) сталі і сталі, мікролегованій бором.

**Ключові слова:** знеуглецьований шар, аустенітне зерно, бунтовий прокат, мікролегування, бор

## INFLUENCE OF AUSTENITE GRAIN SIZE TO DEVELOPMENT OF DECARBONIZATION IN PRODUCTION OF ROLLED STEEL

PARUSOV E. V.<sup>1</sup>, Ph. D, senior researcher,

GUBENKO S. I.<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

SYCHKOV A. B.<sup>3</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

LUTSENKO V. F.<sup>4</sup>, Dr. Sc. (Tech.), senior researcher,

SAHURA L. V.<sup>5\*</sup>, Ph. D.

<sup>1</sup> Iron and Steel Institute named Z.I. Nekrasov of the National Academy of Science of Ukraine, sq. Ac. Starodubov, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4290-6498

<sup>2</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Lenin avenue, 38, Magnitogorsk, Russia, 455000, tel. +7 (919) 348-66-84, e-mail: absykhkov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

<sup>4</sup> Iron and Steel Institute named Z.I. Nekrasov of the National Academy of Science of Ukraine, sq. Ac. Starodubov, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 47-29-25, e-mail: lutsenko@optima.com.ua, ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

<sup>5\*</sup> Iron and Steel Institute named Z.I. Nekrasov of the National Academy of Science of Ukraine, sq. Ac. Starodubov, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: slv\_metal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

**Summary. Introduction and current state of the problem.** Common and undesirable defects in microstructures include surface decarburization which compromises the quality of HC wire rods hot-wound into coils (coil rod) and performance of products made there from. Resistance of metal to alternating loads is determined by the depth of the

decarburized layer, i.e. actual difference between surface microstructure and base metal structure. As we know [1, 2], for decarburization process to occur on the metal surface when heated in a furnace, the gaseous atmosphere shall not produce a very strong oxidizing effect. If the rate of oxidation is higher than that of carbon diffusion in steel, it enhances scale build-up whereby oxygen can oxidize both carbon and iron.

Although decarburized layer is mostly deemed to be detrimental, it has been argued that decarburization of wire rod surface can be advantageous to useful qualities of wire rods. Soft decarburized surface ensures improved flexural (bending) or torsional (twisting) ductility of metal resulting from low sensitivity to stress concentration factors, high resistance to crack propagation and higher corrosion resistance [3]. Compressive residual stresses occurring in a decarburized skin improve the fatigue life and increase the durability of steel-wire ropes [4]. Wire rods with more pronounced surface decarburization are less likely to form the hardened structures (martensite) in drawing operations due to surface cracking and cupping of the martensitic layer. However, in the process of cold drawing whereby metal is deformed by pulling wire rods through a series of drawing dies (monolithic system), maximum stresses develop on the surface of rolled products [3–5]. Therefore uniform distribution of structure on the surface and in the boundary layers is essential. This means that minimum and uniform depth of decarburization on the metal surface is a prerequisite for the production of high-quality HC rolled stock [3–7].

The paper [11] acknowledges the influence of micro-additives of boron on changes in the austenite grain size and accordingly the length of borders in high-carbon steels with austenitizing temperature increase within the range of 900...1100°C.

*The purpose of work* is to research the effect of austenite grain size on the decarburization depth in carbon (base) steel and boron micro-alloyed steel.

**Keywords:** decarbonized layer, austenite grain, rolled steel, microalloying, boron

**Постановка проблеми.** Одним из нежелательных и распространенных дефектов микроструктуры, который снижает качественные показатели высокоуглеродистого бунтового проката (катанки) и эксплуатационные характеристики изготавливаемых из него изделий, является обезуглероживание поверхности. При этом сопротивление металла знакопеременным нагрузкам определяется глубиной обезуглероженного слоя, то есть фактическим различием микроструктуры на поверхности от структуры основного металла. Известно [1; 2], что для развития процесса обезуглероживания на поверхности металла при нагреве в печи газовая атмосфера должна оказывать не очень сильное окислительное воздействие. Если скорость окисления будет больше скорости диффузии углерода в стали, то интенсифицируется окисление, и в этом случае кислород может окислять уже одновременно и углерод и железо.

В большинстве случаев обезуглероженный слой считается неудовлетворительным фактором, однако существует мнение и о положительном влиянии обезуглероживания поверхности бунтового проката на его потребительские свойства. Мягкая обезуглероженная поверхность обеспечивает повышенную пластичность металла при перегибах и скручиваниях из-за малой чувствительности к

концентраторам напряжений, высокой сопротивляемости распространению трещин, а также повышению коррозионной стойкости [3]. Формирование в поверхностном обезуглероженном слое остаточных сжимающих напряжений приводит к повышению усталостной прочности и долговечности в процессе эксплуатации стальных канатов [4]. В бунтовом прокате с более развитым поверхностным обезуглероживанием уменьшается вероятность образования закалочных структур (мартенсита) при волочении и вызываемых появлением мартенсита поверхностных трещин и надрывов. Однако при деформации металла способом холодного волочения путем протяжки бунтового проката через систему монолитных волок, максимальные напряжения сосредоточены на поверхности проката [3 - 5]. В связи с такой особенностью равномерность распределения структуры на поверхности и в приповерхностных слоях оказывает решающее воздействие. Следовательно, при изготовлении качественного сортамента высокоуглеродистого бунтового проката необходимо обеспечить минимальную и равномерную глубину обезуглероживания на поверхности металла [3–7].

Нагрев стальных заготовок перед горячей прокаткой в печах вызывает интенсивное развитие окисления, обеднение поверхностных слоев углеродом и пере-

распределение легирующих элементов в поверхностных слоях [8]. Обезуглероживание при нагреве происходит в результате взаимодействия окисляющих газов с углеродом, который находится в твердом растворе или связан в карбиды железа. Скорость обезуглероживания определяется главным образом процессом двусторонней диффузии, происходящей под воздействием разности градиента сред. С одной стороны, обезуглероживающие газы поступают к поверхностным слоям металла, а с другой, – образующиеся газообразные продукты, содержащие углерод, движутся в обратном направлении. При этом углерод из внутренних слоев металла диффундирует в поверхностный слой [9].

Поэтому обезуглероживание и окалинообразование, происходящие на

поверхности металла, в большинстве случаев рассматриваются совместно. При нагреве в печи металл окисляется кислородом, который входит в состав продуктов сгорания топлива. При нагреве стали выше температуры  $1\ 100^{\circ}\text{C}$  в обычной слабоокислительной атмосфере окалинообразование на поверхности металла происходит быстрее, чем обезуглероживание [1; 2; 10].

В работе [1] показано, что глубина обезуглероженного слоя зависит от температуры нагрева стали в окислительной среде. В соответствии с работой [2] (рис. 1) обезуглероживание стали начинается при температуре  $\sim 650^{\circ}\text{C}$  и интенсивно протекает до температуры  $\sim 850^{\circ}\text{C}$ .

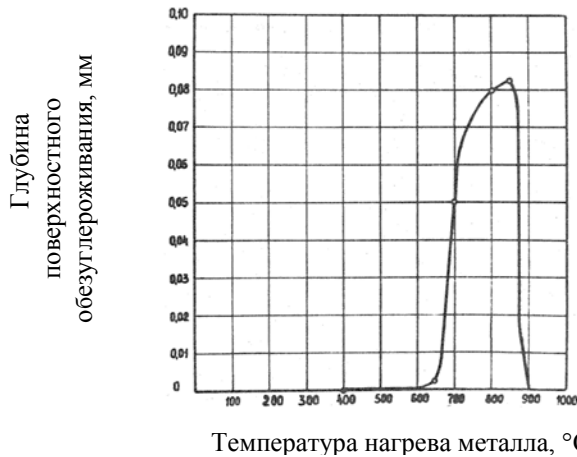


Рис. 1. Зависимость глубины обезуглероживания от температуры нагрева стали У6 [2]

Уменьшение глубины обезуглероженного слоя происходит в интервале температур  $850\text{...}900^{\circ}\text{C}$ , что соответствует началу интенсивного развития окалинообразования. Наряду с рассмотренными особенностями имеются данные о влиянии границ зерен на диффузионные процессы в стали, к которым относится и обезуглероживание, в частности, в работе [10] показан значительный вклад границ зерен в процессы диффузии.

В работе [11] отмечено влияние микродобавок бора на изменение величины аустенитного зерна, а соответственно и протяженность границ в высокоуглеродистых сталях при повышении температуры аустенитизации в интервале  $900\text{...}1\ 100^{\circ}\text{C}$ .

Ввиду изложенного *целью работы* являлось исследование влияния величины аустенитного зерна на глубину обезуглерожи-

вания в углеродистой (базовой) стали и стали микрелегированной бором.

#### Материал и методика исследований.

Материалом для исследований служили промышленные партии бунтового проката из сталей марок С80D (диаметр 6,5 мм) и С86D (диаметр 10,0 мм), химический состав которых соответствовал требованиям европейского стандарта EN ISO 16120-2:2011 (табл. 1). Используемые приборы: нагревательная печь с защитной атмосферой «MF1600A», нагревательная печь «МПМ-02», световой оптический микроскоп «Axiovert 200 M MAT». Аустенитное зерно выявляли методом травления микрошлифов в травильном растворе при температуре  $50^{\circ}\text{C}$ , который содержал поверхностно-активные вещества и пикриновую кислоту.

Таблиця 1

*Химический состав исследуемого бунтового проката*

Марка стали	Химический состав стали, % по масс.									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	B
C80D	0,81	0,57	0,18	0,009	0,002	0,05	0,03	0,12	0,008	-
C80D	0,82	0,55	0,17	0,010	0,003	0,04	0,05	0,13	0,009	0,0017
C86D	0,88	0,68	0,18	0,010	0,003	0,03	0,06	0,12	0,007	0,0012

**Результаты исследований и их обсуждение.** Проведение сравнительных исследований было разделено на два этапа:

- этап № 1: моделирование благоприятных температурно-временных параметров для развития и протекания обезуглероживания на поверхности проката из стали марки C80D;

- этап № 2: выпуск промышленных партий бунтового проката из стали марки C86D при варьировании параметров деформационно-термической обработки.

Для проведения экспериментов (этап № 1) от промышленных партий бунтового проката диаметром 6,5 мм отбирали по два образца длиной 50,0 мм для каждой из температур аустенитизации. Для исключения

влияния на результаты исследований глубины обезуглероженного слоя, сформированного с прокатного нагрева, предварительно произвели обточку всех образцов до диаметра 5,5 мм. Затем образцы подвергали аустенитизации в муфельной печи с защитной атмосферой «MF1600A» до температур 900...1100°C с интервалом 50°C. При достижении заданной температуры аустенитизации осуществляли выдержку в течение ~ 300 с. Первую партию образцов в количестве пять штук подвергали закалке, с последующим отпуском в течение 1 часа при температуре 230°C. Общее количество исследуемых образцов на этапе № 1 составляло 10 штук.

Таблиця 2

*Изменение величины зерна стали C80D различного химического состава при различных температурах аустенитизации*

Температура аустенитизации, °C	Исследуемый показатель			
	базовая сталь		сталь с бором	
	средний условный диаметр зерна, мм	номер зерна	средний условный диаметр зерна, мм	номер зерна
900	0,023	8	0,015	9
950	0,028	7	0,041	6
1000	0,034	7	0,067	5
1050	0,062	5	0,112	3
1100	0,088	4	0,172	2

Анализ полученных данных по определению величины аустенитного зерна (табл. 2) показывает, что при повышении температуры аустенитизации с 900 до 1150°C величина условного диаметра аустенитного зерна для базовой стали возрастает с 0,023 до 0,088 мм (номер зерна 8...4). В стали, микролегированной бором, средний условный диаметр аустенитного зерна вырос с 0,015 мм до 0,172 мм (номер зерна 9...2). В целом можно отметить, что при достижении температуры аустенитизации

950°C рост зерна в стали с бором происходит более интенсивно и на два номера превышает этот параметр в сравнении с базовой сталью. Такие результаты не противоречат ранее полученным [11; 12].

Для исследования развития поверхностного обезуглероживания вторую партию образцов в количестве пять штук помещали в муфельную печь с обычной атмосферой «МПМ-02», предварительно разогретую до температуры 800°C, выдерживали в течение 1 часа и далее охлаждали с печью.

Металлографический анализ (рис. 2) показал, что в исследуемых образцах с мелкозернистой структурой (номер зерна 8, 9) по всему периметру как для базовой, так и для стали с бором возникает обезуглероживание глубиной 0,060 и 0,050 мм, а частичное со-

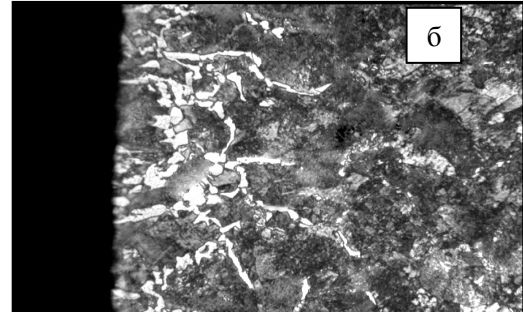
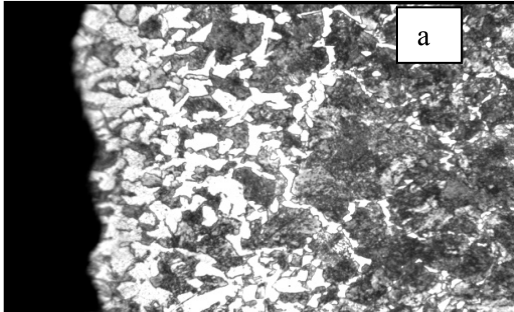


Рис. 2. Структура ( $\times 200$ ) поверхности исследуемых образцов диаметром 5,5 мм из стали S80D с бором после проведения обезуглероживающей термической обработки: а – мелкозернистая структура, температура аустенитизации 900 °С; б – крупнозернистая структура, температура аустенитизации 1100 °С

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что с целью уменьшения глубины обезуглероженного слоя на поверхности металлопроката необходимо повышать величину аустенитного зерна (средний условный диаметр).

В работах [13; 14] показано, что размер аустенитного зерна в бунтовом прокате повышается при увеличении температуры виткообразования, что способствует формированию перлитной структуры с высокой степенью дисперсности (межпластиночное расстояние в перлите менее 0,20 мкм). Следовательно, для получения эффективной структуры металла из высокоуглеродистых сталей, которая характеризуется равномерным распределением дисперсного перлита в поперечном сечении проката и минимальной глубиной обезуглероженного слоя, целесообразно повышать температуру раскладки проката на витки с последующим ускоренным воздушным охлаждением.

Дальнейшие промышленные эксперименты (этап № 2) осуществляли на бунтовом прокате диаметром 10,0 мм из стали марки S86D (см. табл. 1). С целью проведения сравнительного анализа температуру на виткообразователе варьировали от 900 до 1030 °С. Результаты металлографических исследований представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Полученные результаты исследований на промышленных партиях бунтового про-

ката свидетельствуют о том, что при повышении температуры на виткообразователе наблюдается аналогичная тенденция (этап № 1): средний условный диаметр зерна повышается от 0,021 до 0,056 мм, а средняя глубина обезуглероженного слоя уменьшается более чем в 2 раза.

Общеизвестно, что металл с более крупным аустенитным зерном имеет меньшую протяженность зеренных границ [15], которые являются активными «каналами» для протекания диффузионных процессов. Это, в свою очередь, уменьшает интенсивность зернограницной диффузии углерода к поверхности металла, что в конечном итоге приводит к наблюдаемому эффекту – уменьшению глубины обезуглероженного слоя с ростом величины зерна. Указанная закономерность характерна как для лабораторных, так и промышленных условий.

Дополнительным стимулом, при прочих равных условиях, который обеспечивает повышение величины аустенитного зерна, является целенаправленный ввод бора в сталь.

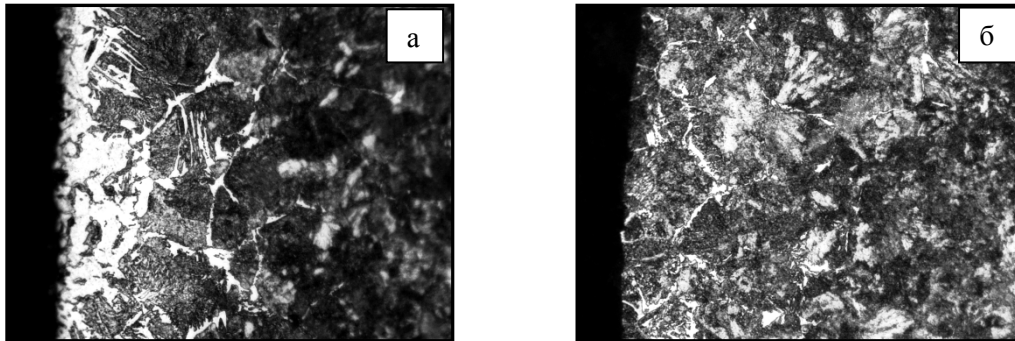
Следовательно, получено еще одно доказательство позитивного влияния бора не только на повышение степени дисперсности перлитной структуры в высокоуглеродистых сталях, а и на уменьшение глубины обезуглероженного слоя бунтового проката в процессе высокотемпературной деформационно-термической обработки.

Таблиця 3

**Величина зерна и глубина обезуглероженного слоя в бунтовом прокате стали С86D диаметром 10,0 мм при изменении температуры виткообразования**

Температура виткообразования, °С	Средний условный диаметр зерна, мм	Номер зерна	Глубина обезуглероженного слоя <sup>1</sup> , %
900	0,021	8	$\frac{1,23...1,51}{1,44}$
1 030	0,056	5	$\frac{0,49...0,88}{0,67}$

*Примечание:* 1 – в числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.



*Рис. 3. Структура ( $\times 500$ ) поверхности бунтового проката стали С86D диаметром 10,0 мм после охлаждения от различных температур виткообразования: а – температура виткообразования 900 °С, глубина обезуглероженного слоя 1,4 %; б – температура виткообразования 1 030 °С, глубина обезуглероженного слоя 0,63 %*

**Выводы.** Показана взаимосвязь между величиной аустенитного зерна и формирующейся глубиной обезуглероженного слоя, как с отдельного, так и с прокатного нагрева. С целью уменьшения обезуглероживания на поверхности высокоуглеродистого бунтового проката целесообразно увеличивать величину зерна, что достигается путем целенаправленного ввода микродобавок бора в сталь и повышения температуры виткообразования

перед ускоренным воздушным охлаждением проката на линии Стелмор.

Установлено, что ввод микролегирующей добавки бора в сталь повышает величину аустенитного зерна (на 2 номера), что способствует уменьшению протяженности границ зерен и снижает интенсивность диффузионного массопереноса углерода к поверхности раздела металл – окислительная среда.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кайстров Е. А. Борьба с обезуглероживанием в прокатных цехах / Е. А. Кайстров // Сталь. – 1950. – № 12. – С. 1106–1108.
2. Губинский В. И. Уменьшение окалинообразования при производстве проката / В. И. Губинский, А. Н. Минаев, Ю. В. Гончаров. – Київ : Техніка, 1981. – 135 с.
3. Изготовление высококачественных метизов (научный и практический опыт Белорецкого металлургического комбината) : коллектив. монография / науч. ред. и сост. В. А. Кулеша ; отв. ред. Н. А. Клековкина. – Белорецк : [б. и.], 1999. – 328 с.
4. Белалов Х. Н. Формирование свойств канатной проволоки / Х. Н. Белалов // Стальные канаты : сб. науч. тр. / Междунар. ассоциация исследователей стал. канатов. – Одесса, 2001. – Вып. 2. – С. 105–116.
5. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2012. – 376 с.
6. Глубина обезуглероженного слоя на углеродистой катанке различных заводов-изготовителей / В. В. Парусов, В. А. Луценко, А. Б. Сычков, В. А. Тищенко, А. И. Сивак // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 5. – С. 61–64.

7. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. Ю. Столяров, М. А. Шекшеев, С. Ю. Жукова, С. О. Малашкин ; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова. – Магнитогорск : Магн. гос. техн. универ. им. Г. И. Носова, 2014. – 257 с.
8. Луценко В. А. Окалинообразование при термомеханической обработке катанки в потоке высокоскоростного стана / В. А. Луценко // Черная металлургия : бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2006. – № 12. – С. 54–57.
9. Луценко В. А. Влияние параметров высокоскоростной термомеханической обработки на процессы окалинообразования углеродистой стали / В. А. Луценко // Литье и металлургия. – 2005. – № 2, ч. 2. – С. 96–98.
10. Физическое металловедение / под ред. Р. Кана. – Москва : Мир, 1968. – Вып. 2 : Фазовые превращения. Металлография. – 492 с.
11. Влияние величины зерна и других факторов на дисперсность перлита углеродистых сталей / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, О. В. Парусов, И. Н. Чуйко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. / Приднестр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 73. – С. 186–190.
12. Влияние вида обработки на величину аустенитного зерна высокоуглеродистой стали / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, А. И. Сивак // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Украины, Ин-т черной металлургии им. З. И. Некрасова. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 28. – С. 296–299.
13. Разработка режима термомеханической обработки катанки из стали 85, микролегированной бором, на основе закономерностей превращений аустенита при непрерывном охлаждении / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, А. И. Сивак, А. П. Клименко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 3. – С. 54–58.
14. К вопросу о дислокационно-диффузионном генезисе пластинчатого перлита в высокоуглеродистом бунтовом прокате / Э. В. Парусов, С. И. Губенко, А. Б. Сычков, И. Н. Чуйко, Л. В. Сагура // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. / Приднестр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 89. – С. 137–143.
15. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 542 с.

## REFERENCES

1. Kajstrov E.A. *Borba s obezuglerozhivaniem v prokatnykh tsekhakh* [Fighting with decarbonization in rolling mills]. *Stal'* [Steel]. 1950, no 12, pp. 1106-1108. (in Russian).
2. Gubinskij V.I., Minaev A.N. and Goncharov Yu.V. *Umen'shenie okalinoobrazovaniya pri proizvodstve prokata* [Scaling decrease in the production of rolled products]. Kiev: Tekhnika, 1981, 135 p. (in Russian).
3. Kulesha V.A. and Klekovkina N.A., eds. *Izgotovlenie vysokokachestvennykh metizov* [Production of high-quality hardware]. Beloretsk: [s.n.], 1999, 328 p. (in Russian).
4. Belalov Kh.N. *Formirovanie svoystv kanatnoj provoloki* [Properties formation of the cable wire]. *Stal'nye kanaty* [Steel ropes]. Mezhdunar. assotsiatsiya issledovatelej stal. kanatov [The International Association of researchers of steel ropes]. Odessa, 2001, iss. 2, pp. 105-116. (in Russian).
5. Parusov V.V., Sychkov A.B. and Parusov E.V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva vysokoefektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological bases of the production of highly effective types of wire rod]. Dnipropetrovsk: Art-press, 2012, 376 p. (in Russian).
6. Parusov V.V., Lutsenko V.A., Sychkov A.B., Tyshchenko V.A., and Sivak A.I. *Glubina obezuglerozhennogo sloya na uglevodistoy katanke razlichnykh zavodov-izgotoviteley* [The depth of decarbonized layer on the carbon wire rod of various manufacturers]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metal and mining industry]. 2003, no 5, pp. 61-64. (in Russian).
7. Sychkov A.B., Zhygarev M.A., Stolyarov A.Yu., Sheksheev M.A., Zhukova S.Yu. and Malashkin S.O. *Metallurgicheskie i metallovedcheskie aspekty proizvodstva vysokouglerodistoy katanki* [Metallurgical and metallographic aspects of the production of high-carbon wire rod]. Magnitogorsk: MNTU im. G. I. Nosova, 2014, 257 p. (in Russian).
8. Lutsenko V.A. *Okalinoobrazovanie pri termomekhanicheskoy obrabotke katanki v potoke vysokoskorostnogo stana* [Scaling with the thermomechanical treatment in a stream of high-speed wire rod mill]. *Chernaya metallurgiya: byul. nauch.-tekhn. i ekon. inform.* [Ferrous metallurgy: Bulletin of scientific-engineering and economical information]. 2006, no 12, pp. 54-57. (in Russian).
9. Lutsenko V.A. *Vliyanie parametrov vysokoskorostnoy termomekhanicheskoy obrabotki na protsessy okalinoobrazovaniya uglevodistoy stali* [Parameters influence of high thermo-mechanical treatment process on carbon steel scaling]. *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2005, no 2, iss. 2, pp. 96-98. (in Russian).
10. Kan R. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical metallurgy]. Moskva: Mir, 1968, iss. 2, 492 p.
11. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Parusov O.V. and Chuyko I.N. *Vliyanie velichiny zerna i drugikh faktorov na dispersnost perlita uglevodistykh staley* [Influence of grain size and other factors on the dispersibility of carbon steels perlite]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Machine Building].



- Mechanical Engineering]. Pridnepr. gos. akad. str-va i arhitektury [Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2014, no. 73, pp. 186-190. (in Russian).
12. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V. and Sivak A.I. *Vliyanie vida obrabotki na velichiny austenitnogo zerna vysokouglerodistoy stali* [Influence of the treatment type on the value of the austenite grain of the high carbon steel]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii* [Fundamental and applied problems of the ferrous metallurgy]. Nats. akad. nauk Ukrainy, In-t chernoj metallurgii im. Z. I. Nekrasova [National Academy of Science of Ukraine, Institute of Ferrous Metallurgy named after Nekrasov Z.I.]. Dnepropetrovsk, 2014, no 28, pp. 296-299. (in Russian).
  13. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Sivak A.I. and Klimenko A.P. *Razrabotka rezhima termomekhanicheskoy obrabotki katanki iz stali 85, mikrolegirovannoy borom, na osnove zakonomernostey prevraschenij austenita pri nepreryvnom okhlazhdenii* [Development of thermomechanical processing mode of steel rod 85, microalloyed boron, based on austenite patterns under continuous cooling transformation]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2015, no 3, pp. 54-58. (in Russian).
  14. Parusov E.V., Gubenko S.I., Sychkov A.B., Chuyko I.N. and Sagura L.V. *K voprosu o dislokatsionno-diffuzionnom genезise plastinchatogo perlita v vysokouglerodistom buntovom prokate* [On the matter of dislocation-diffusion genesis of lamellar pearlite in high-carbon coil-rod mill products]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Pridnepr. gos. akad. str-va i arhitektury [Prydniprovs'ka State Academy of Civil Construction and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2016, no. 89, pp. 137-143.
  15. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal Science]. Moskva: Metallurgiya, 1986, 542 p. (in Russian).

*Рецензент: д-р т. н., проф. Большаков В. И.*

Надійшла до редколегії: 24.07.2016 р.

Прийнята до друку: 29.07.2016 р.