

УДК 669.017:621.771:621.785.66-97

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ ФАЗ В МЕЖКРИТИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
СУХОМЛИН Г. Д.<sup>2\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ТКАЧ Т. В.<sup>3\*</sup>, *м.н.с.*,  
ЛАУХИН В. Д.<sup>4\*</sup>, *соискатель*

<sup>1\*</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов (МиОМ), Государственное высшее учебное заведение (ГВУЗ) "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры" ("ПГАСА"), ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Кафедра МиОМ, ГВУЗ "ПГАСА", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: [g\\_suhomlin@mail.ru](mailto:g_suhomlin@mail.ru) ORCID ID: 000-0001-5840-169X

<sup>3\*</sup>Кафедра МиОМ, ГВУЗ "ПГАСА", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

<sup>4\*</sup>Кафедра МиОМ, ГВУЗ "ПГАСА", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

**Аннотация.** В современных условиях требования к готовой продукции постоянно повышаются, поэтому возрастает роль технологий, повышающих комплекс механических свойств изделий. В работе рассмотрена одна из таких технологий – нагрев проката из низкоуглеродистых сталей в двухфазную область ( $\alpha+\gamma$ ) с последующим ускоренным регулируемым охлаждением или закалкой из межкритического интервала (МКИ) температур. **Методика.** Использованы методы: количественной металлографии и испытания механических свойств. Для оценки реальных удельных объемов фаз, разработан метод, основанный на выявлении межфазных ( $\alpha-\gamma$ ) границ с помощью металлографического микроскопа в отраженном свете. **Цель работы** – поиск закономерностей формирования структуры и свойств проката из низкоуглеродистых сталей в зависимости от температур нагрева в область межкритического интервала и последующего охлаждения. **Результаты.** Получены экспериментальные данные о количестве аустенита, участвующего в формировании высокопрочных составляющих компонентов конечной структуры низкоуглеродистых сталей. Предложены режимы температурной обработки, способствующие измельчению зерна и повышению ударной вязкости проката. **Научная новизна.** Разработан способ выявления границ зерен бывшего аустенита в структуре низкоуглеродистых сталей с использованием светового металлографического микроскопа, позволяющий контролировать количественное соотношение фаз на шлифах и определять положения межфазных границ при термических обработках низкоуглеродистых сталей с нагревом до температур МКИ. **Практическая значимость.** На основании анализа результатов исследований свойств образцов труб из стали 20 после закалки от различных температур МКИ с последующим отпуском, предложен новый режим прокатки из МКИ с ускоренным охлаждением листов из стали 10Г2ФБ.

**Ключевые слова:** горячая прокатка, низкоуглеродистые стали, межкритический интервал температур, закалка, межфазные границы

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ОБ'ЄМІВ ФАЗ У МІЖКРИТИЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. І.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
СУХОМЛИН Г. Д.<sup>2\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ТКАЧ Т. В.<sup>3\*</sup>, *м.н.с.*,  
ЛАУХІН В. Д.<sup>4\*</sup>, *здобувач*

<sup>1\*</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів (МиОМ), Державний вищий навчальний заклад (ДВНЗ) "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури" ("ПДАБА"), вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Кафедра МиОМ, ДВНЗ "ПДАБА", вул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: [g\\_suhomlin@mail.ru](mailto:g_suhomlin@mail.ru) ORCID ID: 000-0001-5840-169X

<sup>3\*</sup>Кафедра МиОМ, ДВНЗ "ПДАБА", вул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

<sup>4\*</sup>Кафедра МиОМ, ДВНЗ "ПДАБА", вул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

**Анотація.** В сучасних умовах вимоги до готової продукції постійно підвищуються, тому зростає роль технологій, що підвищують комплекс механічних властивостей виробів. У роботі розглянута одна з таких технологій – нагрів прокату з

низьковуглецевих сталей у двофазну область ( $\alpha$ - $\gamma$ ) з наступним прискореним регульованим охолодженням або гартуванням з міжкритичного інтервалу (МКІ) температур. **Методика.** Застосовано методи: кількісної металографії та випробування механічних властивостей. Для оцінки реальних питомих об'ємів фаз розроблено метод, заснований на виявленні міжфазних ( $\alpha$ - $\gamma$ ) границь за допомогою металографічного мікроскопу у відбитому світлі. **Мета роботи** – пошук закономірностей формування структури і властивостей прокату з низьковуглецевих сталей у залежності від температур нагріву в область міжкритичного інтервалу і наступного охолодження. **Результати.** Отримані експериментальні дані щодо кількості аустеніту, що бере участь у формуванні високоміцних складових компонентів кінцевої структури. Запропоновано режими температурної обробки, що сприяють подрібненню зерна і підвищенню ударної в'язкості прокату з низьковуглецевих сталей. **Наукова новизна.** Розроблено спосіб виявлення границь зерен початкового аустеніту в структурі низьковуглецевих сталей з використанням світлового металографічного мікроскопу, який дозволяє контролювати кількісне співвідношення фаз на шліфах і визначати положення міжфазних границь при термічних обробках з нагрівом до температур МКІ. **Практична значимість.** На основі аналізу результатів досліджень властивостей зразків труб зі сталі 20 після гартування від різних температур МКІ з наступним відпуском, запропоновано новий режим прокатки з МКІ з прискореним охолодженням листів зі сталі 10Г2ФБ.

**Ключові слова:** гаряча прокатка, низьковуглецеві сталі, міжкритичний інтервал температур, гартування, міжфазні границі

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SPECIFIC VOLUME PHASES IN THE INTERCRITICAL INTERVAL OF TEMPERATURES BY HEAT TREATMENT OF LOW CARBON STEEL

BOL'SHAKOV V. I.<sup>1\*</sup>, *dr. sc. (tech.), prof.*,  
SUKHOMLIN G. D.<sup>2\*</sup>, *dr. sc. (tech.), prof.*,  
TKACH T. V.<sup>3\*</sup>, *junior researcher*,  
LAUKHIN V. D.<sup>4\*</sup>, *aplikant*

<sup>1\*</sup> Department of Material Science and Treatment of Materials (MSTM), State Higher Education Establishment (SHEE) "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" ("PSACEA"), 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, no. +38 (056) 745 23 72, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Department of MSTM, SHEE "PSACEA", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, no.+38 (0562) 47-02-62, e-mail: [g\\_suhomlin@mail.ru](mailto:g_suhomlin@mail.ru) ORCID ID: 000-0001-5840-169X

<sup>3\*</sup> Department of MSTM, SHEE "PSACEA", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, no +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

<sup>4\*</sup> Department of MSTM, SHEE "PSACEA", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, no +38 (0562) 47-02-62, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

**Abstract.** In modern conditions the requirements for the finished products are constantly increasing, so the role of technologies that improve the mechanical properties of complex products increase as well. The article deals with one of these technologies – heating of low carbon steel in the two-phase region ( $\alpha$ + $\gamma$ ), followed by accelerated controlled cooling or hardening from the intercritical interval (ICI) temperatures. **Methodology.** Methods used: metallographic and tests of mechanical properties. To estimate was developed the real specific volume phase a method based on the detection of interphase ( $\alpha$ - $\gamma$ ) boundaries using metallographic microscope reflected light. **Purpose** – search for patterns of structure formation and properties of rolled low carbon steel depending on the heating temperature in the region of intercritical interval and subsequent cooling. **Findings.** Experimental data on the amount of austenite involved in the formation of high-strength components of the structure of low-carbon steels. Temperature treatment regimes proposed were promoting grain size refinement and increase toughness of steel. **Originality.** A method to identify the former austenite grain boundaries in the structure of low carbon steels using light metallographic microscope was developed. With this method it is possible to control the proportion of phases on the slices and determine the position of interphase boundaries by heat treatment of low-carbon steels by heating to temperatures of ICI. **Practical value.** A new rolling pattern in ICI with accelerated cooling of steel sheets 10G2FB was proposed.

**Keywords:** hot rolling, carbon steels, intercritical temperature interval, hardening, interphase boundaries

### Введение

Наиболее распространенным видом готовой продукции черной металлургии является прокат из низкоуглеродистых сталей, который находит применение также в строительстве.

К прокату из строительных сталей, как наиболее массовому виду готовой продукции, предъявляют ряд требований: высокая прочность, вязкость и пластичность, а также относительно невысокая цена. Наиболее распространенным методом производства

строительных сталей является горячая прокатка. Однако горячекатаный прокат из низкоуглеродистых сталей имеет низкую прочность ( $\sigma_T = 200 \dots 300$  МПа) и вязкость. В последние два десятилетия возникла необходимость получения высокопрочного проката из низкоуглеродистых сталей ( $\sigma_T \geq 400$  МПа). В связи с ужесточением требований к комплексу механических свойств стального проката, возрастает интерес к технологиям, способствующим их повышению. Одним из направлений воздействия на

механические свойства проката является температурная обработка, включающая нагрев в двухфазную область ( $\alpha+\gamma$ ) и последующее ускоренное охлаждение, то есть закалка из межкритического интервала (МКИ) температур.

Изучение закалки от температур МКИ, как заключительной операции обработки, повышающей ударную вязкость сердцевины цементированных деталей, начали в 1950 году А.С. Шейн и Т.А. Лебедев [1]. В дальнейшем исследования закалки из двухфазной области были продолжены Гладштейном Л.И., Садовским В.Д., Сазоновым Б.Г., Маковецким А.Н. и др. [2-8]. Их работы показали, что для повышения комплекса свойств проката после термомеханической обработки или горячей прокатки в ряде случаев целесообразно применять дополнительную специальную термическую обработку. Её особенность заключается в том, что сталь нагревают до температур, лежащих внутри двухфазной ( $\alpha+\gamma$ ) области, подвергают кратковременной выдержке, а затем ускоренно охлаждают; при необходимости, проводят последующий отпуск [9, 10].

При нагреве до температур МКИ образование аустенита на начальных этапах происходит с большой скоростью, с постоянным затуханием во времени и выходом на предельное количество аустенита, которое зависит от температуры (рис. 1).

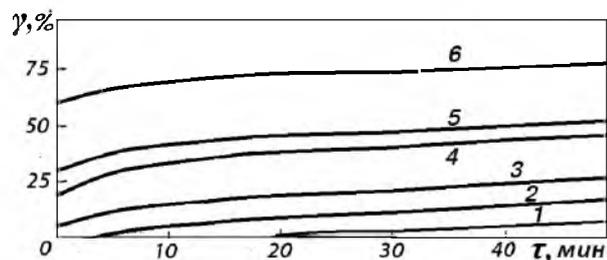


Рис. 1. Кинетика роста аустенитной фазы в Ст 3 при изотермических выдержках в МКИ температур (°C): 750 (1), 770 (2), 790 (3), 810 (4), 830 (5), 850 (6) [9] / The growth kinetics of the austenite phase in the steel St3 with isothermal soaking in the ICI temperature (°C): 750 (1), 770 (2), 790 (3), 810 (4), 830 (5), 850 (6) [9]

Это значит, что в промышленных условиях при работе с реальными металлоемкими изделиями для достижения равновесных концентраций углерода в аустенитной и ферритной составляющих стали при температурах 750...800°C, требуется значительное время выдержки (до 1 часа), тогда как при более высоких температурах (820°C и выше) этот процесс заканчивается практически за 15-20 минут, а при температурах 850...900°C оказывается достаточной выдержка 10 минут [11].

При температурах, несколько превышающих  $A_{c1}$ , содержание углерода в аустените низкоуглеродистых сталей может достигать 0,6...0,7 %, но при этом относительное содержание аустенита невелико, поэтому повышение прочностных показателей может оказаться недостаточным. Содержание углерода в

аустените с повышением температуры уменьшается в соответствии с диаграммой состояния, при этом относительный объем аустенита в структуре существенно увеличивается. Если выдержка отсутствует или кратковременна, то образующийся аустенит имеет пониженное содержание углерода. Это обстоятельство предопределяет вид и баланс структурных составляющих в стали и, соответственно, ее повышенные механические и коррозионные свойства [12-14].

### Цель работы

Целью работы явилось выявление закономерностей и особенностей формирования структуры и механических свойств проката из низкоуглеродистых сталей 20 и 10Г2ФБ в зависимости от температуры нагрева в область межкритического интервала и последующего охлаждения.

### Материалы и методики исследований

Исследовали доэвтектоидные низкоуглеродистые стали марок 20 (0,18 % C) и 10Г2ФБ (0,11% C). Образцы подвергали обработке двум режимам:

*a* – нагрев в печи до 740...840°C, выдержка 20 минут;

*б* – нагрев до температур 910...735°C, выдержка 10 минут; охлаждающая среда – масло.

Использовали качественную и количественную металлографию и испытания механических свойств на растяжение. Предложен и опробован новый металлографический метод выявления межфазных «виртуальных» границ зерен бывшего аустенита. Металлографические шлифы готовили вначале механической шлифовкой по традиционной схеме, а затем подвергали электролитической полировке в хлорноуксусном электролите в течение 4 минут для полного устранения дефектов деформационного происхождения, и травлению в 4 %-ном растворе азотной кислоты.

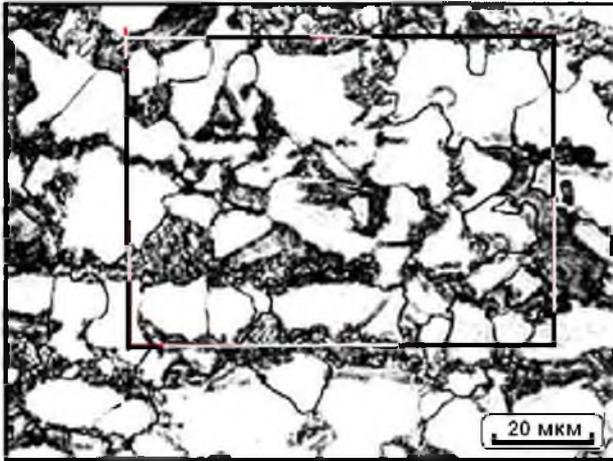
### Результаты исследований и их обсуждение

Выявление зерен бывшего аустенита после нагрева до температур МКИ в низкоуглеродистых сталях представляет, как теоретический, так и практический интерес, но является непростой технической задачей. Для его реализации в работе был разработан металлографический метод выявления тех положений межфазных  $\gamma/\alpha$  границ, которые они занимают при выдержке в МКИ. Его основная составляющая – обнажение неискажённой тонкой структуры металла путём электролитической полировки и создание рельефа при последующем травлении.

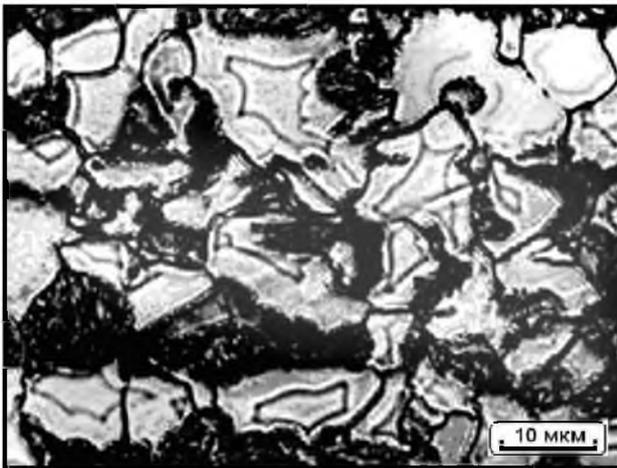
Травимость границ зерен, существовавших в бывшем аустените, который распался при охлаждении, основано на различиях в химических составах исходной и новообразовавшейся при закалке из МКИ  $\alpha$ -фазы. Разница в уровнях рельефа между

ними может быть выявлена методами световой микроскопии.

На рисунке 2а, б показаны снимки одного и того же места на шлифе стали 20 после охлаждения на спокойном воздухе от температуры 860°C.



а



б

Рис. 2. Выявление границ зерен бывшего аустенита в стали 20 после охлаждения на воздухе от температур МКИ:

а – обычная фокусировка; б – площадка, показанная на рис. 2а после специальной дефокусировки /

Identification of the former austenite grain boundaries in steel 20 after air cooling from temperatures ICI:

а – common focusing; б – ground shown fig. 2а after special defocusing

При обычных условиях освещения границы между исходным и перекристаллизованным ферритом практически не видны (рис. 2а). Если создать небольшую перефокусировку, то следы бывших границ становятся видимыми вследствие интерференционного контраста (рис. 2б). Образование аустенитных зародышей при нагреве выше  $A_{c1}$  происходит в перлитных колониях (рис. 3а), поскольку в них концентрация углерода достигает максимальных значений (0,8 %) и перлитные зёрна становятся аустенитом. При дальнейшем повышении температуры растущие аустенитные зёрна захватывают прилегающие

ферритные кристаллы (рис. 3б). Около разных колоний зарождаются кристаллы аустенита разных кристаллографических ориентаций, так что зерно феррита поглощается несколькими аустенитными зёрнами, границы между которыми могут проявляться на дефокусированных снимках (рис. 2б).

Контраст на бывших межфазных границах очень низкий, так как во время снижения температуры исходные зерна феррита начинают расти в обратном направлении (в аустенит) уже в качестве нового доэвтектоидного феррита. При этом первичный феррит служит готовым зародышем для избыточного феррита при обратном  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении и новообразующий феррит ( $\alpha'$  на рисунке 3в) имеет такую же кристаллографическую ориентацию, как и первичный. Таким образом, остатки феррита восстанавливаются частично или полностью, в зависимости от скорости охлаждения, а места, где находились межфазные границы, оказываются внутри восстановившихся ферритных зёрен (рис. 3).

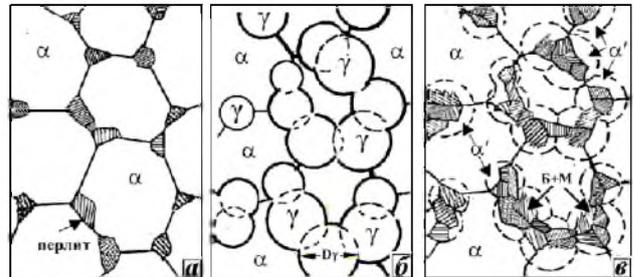


Рис. 3. Схема процесса структурообразования при нагреве низкоуглеродистой стали до температур средней области МКИ и последующего ускоренного охлаждения:

а – исходная феррито-перлитная структура;

б – образование аустенитных зародышей в перлите и рост сфероподобных  $\gamma$ -зерен путём миграции межфазных границ в исходном феррите;

в – частичное восстановление феррита и образование структур закалки /

Scheme of the process of structure formation at heating low carbon steel up to temperatures average area ICI and subsequent accelerated cooling:

а – initial ferrite-pearlite structure; б – the formation of austenite in the pearlite nucleation and growth of sphere-like  $\gamma$  grains by the migration of phase boundaries in the initial ferrite; в – partial recovery ferrite and structures formation hardening

Количественными методами световой металлографии установлено, что после нагрева и последующего охлаждения в низкоуглеродистых сталях количество аустенитной фазы, рассчитанное методом конодных отрезков, существенно выше значений, полученных по предложенному методу (рис. 4а, б). Для температур нижней области МКИ (ниже 800°C) метод даёт хорошую точность (до 2 %), а в верхней части (выше 800°C) точность снижается (до 10 %). Такое расхождение может быть обусловлено концентрационной неоднородностью в исходных и вновь образовавшихся структурах.

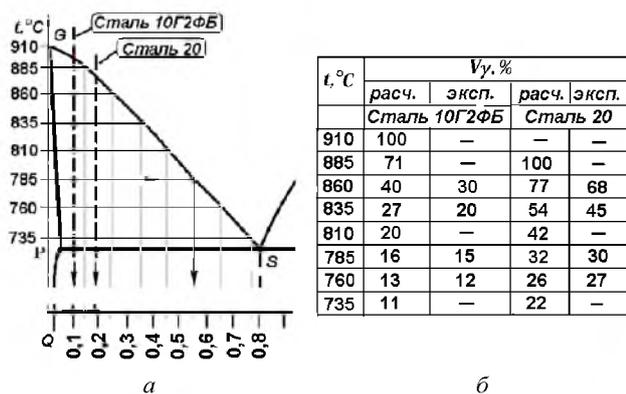


Рис. 4. Определение количества аустенита при нагреве низкоуглеродистых сталей до температур МКИ и охлаждения на воздухе:

a – часть диаграммы железо-цементит с указанием исследованных температур; б – таблица расчётных и экспериментальных определений удельных объёмов аустенита /

Fig. 4. Determination the amount of austenite in low carbon steel heated to temperatures ICI and cooling in air:

a – part of the diagram iron-cementite indicating the investigated temperatures; b – table of calculated and experimental determination of the specific volume of austenite

Таким образом, наблюдения показывают, что в стали 20 и 10Г2ФБ количество образовавшихся продуктов ускоренного охлаждения  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения (мартенсита, бейнита) не соответствует количеству образовавшегося аустенита, так как некоторая его часть успевает превратиться в доэвтектоидный  $\alpha'$ -феррит.

Ускоренное охлаждение стали, нагретой до температур МКИ, приводит к образованию набора различных структурных составляющих, имеющих существенные различия в строении, что связано, как со спецификой структурообразования, как при нагреве до температур МКИ, так и при последующем охлаждении. При этом на количественное соотношение удельных объёмов структурных составляющих преимущественно влияют температура нагрева, время выдержки и скорость охлаждения. Образующиеся структуры имеют различную плотность дислокаций (от  $10^8 \text{ см}^{-2}$  в доэвтектоидном феррите до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$  в мартенсите), различный фазовый состав и морфологию: феррит, цементит, специальные карбиды, пластинчатый и реечный мартенсит, бейнит, игольчатый феррит.

Разнообразие структурных составляющих продуктов распада аустенита связано с неоднородным распределением углерода по всему объёму металла, концентрация которого в аустените при нагреве в МКИ может колебаться в широких пределах: от 0,1 до 0,75 % (рис. 4a).

На рисунке 5 показана стрелкой (указывает направление перемещения межфазной границы) узкая полоска феррита, которая свидетельствует о высокой скорости роста ферритной фазы при обратном  $\gamma \rightarrow \alpha'$

переходе, поскольку для этого не требуется активации зародышеобразования.

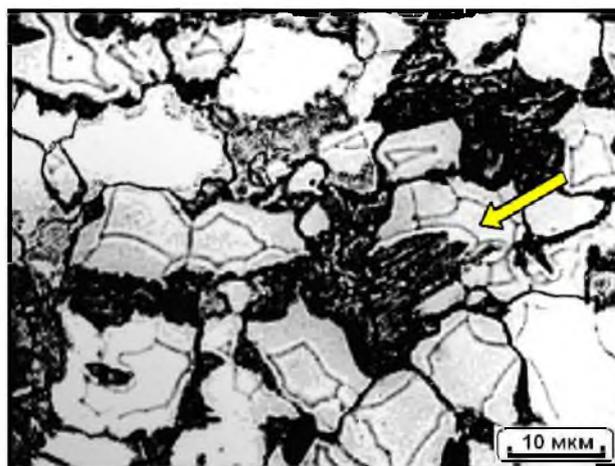


Рис. 5. Структуры распада аустенита в образцах труб из стали 20 при охлаждении на воздухе от температур 860°C /

The structure of austenite decomposition in samples of pipe steel 20 while cooling in air from temperatures 860°C

В стали 20 со средним значением концентрации углерода 0,17...0,22 % и в стали 10Г2ФБ с 0,09...0,12% С в зависимости от температуры нагрева может происходить процесс образования структур по тому же механизму, что и в любой из доэвтектоидных сталей, содержащих 0,1...0,8 % С.

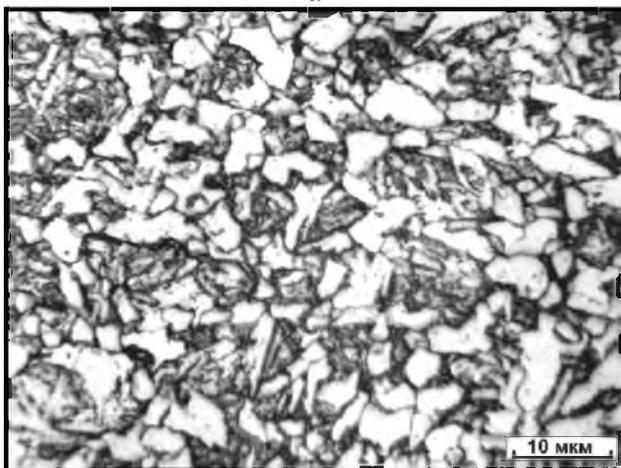
Поэтому, например, после нагрева до температур верхней части МКИ, деформации и закалки основными составляющими в стали 10Г2ФБ являются дисперсный низкоуглеродистый мартенсит, игольчатый феррит, т. е., низкоуглеродистый бейнит, и некоторое количество феррита (рис. 6a). Нагрев до температур средней части МКИ и последующее ускоренное охлаждение приводят к образованию полиэдрического феррита и бейнитно-мартенситных пакетов. При нагреве до более низких температур в микроструктуре преобладает мелкозернистый феррит, а в ликвационных полосках, обогащённых легирующими элементами, – среднеуглеродистый мартенсит и бейнит (рис. 6b).

Механические свойства проката стали 10Г2ФБ после нагрева до различных температур МКИ, деформации и ускоренного охлаждения представлены в таблице 1.

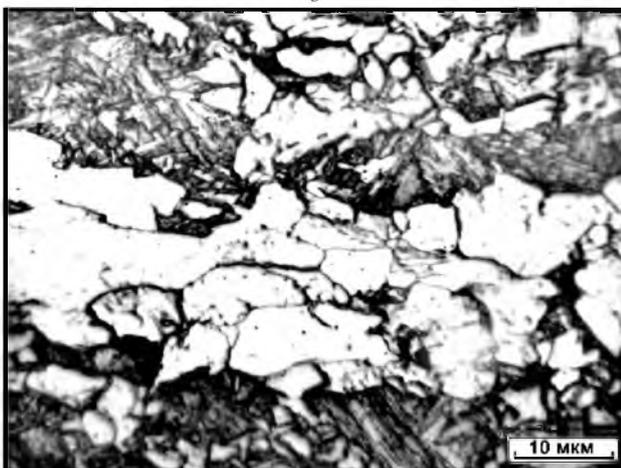
Приведенные данные указывают на реальную возможность корректировки технологического процесса прокатки и управления свойствами изделий, прошедших операцию закалки от температур МКИ.



*a*



*б*



*в*

*Рис. 6. Продукты распада аустенита при закалке от температур МКИ стали 10Г2ФБ:*

*а – 860°С; б – 785°С; в – 735°С /*

*Products decomposition of austenite by hardening from temperatures ICI steel 10G2FB:*

*а – 860°С; б – 785°С; в – 735°С*

Сталь 10Г2ФБ, закаленная после деформации при температурах верхней и нижней двухфазной области, показывает высокую прочность, а вязкость повышается при закалке от пониженных температур. Охрупчивание стали при 860°С объясняется большим

содержанием в структуре мартенсита и бейнита, а при охлаждении от 735°С – укрупнением зерен феррита. Наилучшие показатели вязкости достигнуты после закалки из среднего интервала температур, в результате образования в структуре 70...80 % полигонизованного феррита и 30...20 % бейнита.

*Таблица 1*

**Механические свойства листов из стали 10Г2ФБ после деформации и закалки от различных температур МКИ /**

**Mechanical properties of steel sheets 10G2FB after deformation and hardening at different temperatures from ICI**

t нагрева, °С	σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
				+20 °С	-40 °С
860	777	640	15,75	100	56
785	772	539	16,5	104	79
735	790	631	14,25	59	53

*Таблица 2*

**Механические свойства труб из стали 20 после закалки от различных температур МКИ /**  
**The mechanical properties of steel pipes 20 after hardening from different Temperature ICI**

t нагрева, °С	σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	
				+20 °С	-60 °С
730-750	630	440	22	90	40
760-790	670	460	22	107	39
800-830	730	510	20	125	56

Результаты испытаний механических свойств образцов труб из стали 20 после термических обработок по различным режимам показали (табл. 2), что при повышении температуры нагрева под закалку происходит относительно плавный, без резких перепадов, рост прочностных характеристик.

**Научная новизна и практическая значимость работы**

Разработан способ выявления границ зерен бывшего аустенита с использованием светового металлографического микроскопа, который позволяет частично или полностью контролировать количественное соотношение фаз на шлифах и определять бывшие положения межфазных границ в случае применения термических обработок с нагревом низкоуглеродистых сталей до температур МКИ. Метод может быть также полезен при экспертных оценках технологических процессов неизвестного происхождения.

На основании анализа результатов исследований свойств образцов после закалки от различных температур МКИ с последующим отпуском, предложен улучшенный режим прокатки листов из стали 10Г2ФБ по схеме: деформация при Ас<sub>1</sub> + 50°С со степенью 30...50 % → ускоренное охлаждение до 400...500°С.

### Выводы

1. Показано, что дополнительным инструментом для управления свойствами проката из низкоуглеродистых и микролегированных сталей может служить регулируемое ускоренное охлаждение, позволяющее управлять соотношением структурных составляющих в остаточном аустените в МКИ путем регулирования температуры конца деформации.

2. Применение закалки от температур средней и верхней части МКИ с последующим отпуском повышает прочностные свойства и ударную вязкость стали 20.

3. Деформация листов из стали 10Г2ФБ при температурах верхней области МКИ с последующей закалкой способствует повышению прочностных свойств, но снижению вязкости. После ускоренного охлаждения от температур средней части МКИ повышается вязкость, при сохранении удовлетворительной прочности и пластичности.

4. Дальнейшее углублённое изучение процессов, происходящих при деформации (прокатке) в диапазоне температур от 770°C до 730°C и последующем ускоренном охлаждении, является перспективным направлением повышения комплекса прочностных и пластических свойств проката из низкоуглеродистых сталей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Шейн А.С. Структура и ударная вязкость стали, закаленной из критического интервала / А.С. Шейн, Т.А. Лебедев // Термическая обработка металлов. Сб. материалов конференции. Свердловск, – Mashgiz, – 1950, – С. 166–177.

Shein A.S., Lebedev T.A. Struktura i udarnaya vyazkost' stali, zakalenoj iz kriticheskogo intervala [The structure and toughness of steel, hardened of critical interval]. Heat treatment of metals. Coll. conference materials. Sverdlovsk, – Mashgiz, – 1950, – P. 166–177.

2. Сазонов, Б.Г. Влияние вторичной закалки из межкритического интервала на склонность стали к обратной отпускной хрупкости / Б.Г. Сазонов // Митом. – 1957. – № 4. – С. 31–34.

Sazonov B.G. Vliyanie vtorichnoi zakalki iz mezhkriticheskogo intervala na sklonnost' stali k obratimoi otpusnoi khрупкости [Influence of secondary hardening of the intercritical interval on the propensity of steel to reversible temper brittleness]. Митом [Metallurgy and heat treatment of metals]. – 1957. – No. 4 – P. 31–34.

3. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С.С. Дьяченко. – М.: Металлургия, 1982. – 127 с.

D'yauchenko S.S. Obrazovanie austenita v zhelezouglерodistykh splavakh [Formation of austenite in the iron-carbon alloys]. Moscow. Metallurgy, 1982. – 127 p.

4. Гладштейн Л.И. Кинетика полиморфного превращения в феррито-перлитных сталях при нагреве в межкритическом интервале температур / Л.И. Гладштейн, Т.Н. Риваненок // Сталь. – 2008. – № 4. – С. 64–68.

Gladstein L.I., Rivanenko T.N. Kinetika polimorfного prevrashcheniya v ferrito-perlitnykh stalyakhv pri nagreve v mizhkriticheskom intervale temperatur [The kinetics of polymorphic transformation in ferritic-pearlitic steel during heating in the intercritical temperature interval]. Steel. – 2008. – No. 4. – P. 64–68.

5. Околович Г.А. Межкритическая закалка / Г.А. Околович, А.Е. Сизова, Т.В. Мустафина // Ползунковский вестник. – 2012. – №1/1 – С. 228–231.

Okolovich G.A., Sizova A.E., Mustafina T.V. Mezhkriticheskaya zakalka [intercritical hardening]. Polzunkovsky Bulletin. – 2012. – No. 1/1 – P. 228–231.

6. Беликов С.В. Влияние температуры нагрева на формирование субзеренной структуры в предварительно закаленных низколегированных сталях / С.В. Беликов, К.И. Сергеев, М.С. Карабаналов и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.

Belikov S.V., Sergeev K.I., Karabanalov M.S. Vliyanie temperatury nagreva na formirovanie subzerennoy struktury v predvaritel'no zakalennykh nizkolegировannykh stalyakh [Effect of heating temperature on the formation of subgrain structure in the pre-hardened alloy steels]. Modern problems of science and education. – 2013. – No 2.

<http://www.science-education.ru/108-8873>

7. Маковецкий А.Н. Роль предварительной термической обработки в формировании структуры и свойств трубных сталей после закалки из межкритического интервала температур / А.Н. Маковецкий, Д.А. Мирзаев // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 39. – С. 71–78.

Makovetskii A.N., Mirzaev D.A. Rol' predvaritel'noi termicheskoi obrabonki v formirovanii struktury i svoistv trubnykh staley posle zakalki iz mezhkriticheskogo intervala temperatur [The role of thermal pretreatment in determining the structure and properties of the pipe steel after hardening of intercritical temperature interval]. Bulletin YUUrGU. – 2012. – No. 39. – P. 71–78.

8. Малинов Л.С. Способы термообработки сталей с нагревом в межкритический интервал температур (МКИТ) для повышения их механических свойств / Л.С. Малинов, О.А. Васенко, Д.В. Малинова // Металлы и литье Украины. – 2012. – №1. – С. 18–22.

Malinov L.S., Vasenko O.A., Malinova D.V. Sposoby termoobrabotki staley s nagrevom v mezhkriticheskii interval temperatur (MKIT) dlya povysheniya ikh mekhanicheskikh svoistv [Methods for the heat treatment of steel with heating in the intercritical temperature interval to improve their mechanical properties]. Metal and casting of Ukraine. – 2012. – No.1. – P. 18–22.

9. Irani J.J. Tither G. Quenched and tempered carbon steels, The Iron and Steel Inst., Spec. Report № 140, 1967, P.135-149.

10. Маковецкий А.Н. Формирование структуры низколегированной трубной стали при нагреве в межкритическом интервале температур / А.Н. Маковецкий, Т.И. Табачикова, И.Л. Яковлева и др. // ФММ. – 2012. – № 7. – С. 744–755.

Makevetskii A.N., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L. Formirovanie struktury nizkolegированной trubnoi stali pri nagreve v mezhkriticheskom intervale temperatur [Forming structure alloyed steel pipe heated in the intercritical temperature interval]. FMM [The Physics of Metals and Metallography]. – 2012. – No. 7. – P. 744–755.

11. Превращения при нагреве стали. Структурная наследственность / В.Д. Садовский // Металловедение и термическая обработка стали: Справочник под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – Т. 2. – С. 83–92.

Sadovskii V.D., Prevrashcheniya pri nagreve stali. Strukturnaya nasledstvennost' [The transformations by heating of steel. Structural heredity]. Metallurgy and heat treatment of steel: Handbook for. Ed. M.L. Bernshteina, A.G. Rakhshadta. – Moscow. Metallurgy, 1983. – Т. 2. – Р. 83–92.

12. Садовский В.Д. Межкритическая закалка конструкционных сталей / В.Д. Садовский, А.М. Полякова // МиТОМ. – 1970. – № 1. – С. 5–8.

Sadovskii V.D., Polyakova A.M. Mezhkriticheskaya zakalka konstrukzionnykh staley [Intercritical hardening of structural steels]. MiTOM [Metallurgy and heat treatment of metals]. – 1970. – No. 1. – P. 5–8.

13. Маковецкий А.Н. Влияние термической обработки на хладостойкость стали для нефтяных трубопроводов / А.Н. Маковецкий, Д.А. Мирзаев // ФММ. – 2010. – Т. 110, № 4. – С. 417–423.

Маковецкий А.Н., Мирзаев Д.А. Vliyanie termicheskoi obrabotki na khladostoičnost' stali dlya neftyanykh

truboprovodov [Effect of heat treatment on the cold resistance of steel for oil pipelines]. FMM [The Physics of Metals and Metallography]. – 2010. – Т. 110, No. 4. – P. 417–423.

14. Садовский В.Д. Структурная наследственность стали / В.Д. Садовский. – М.: Metallurgy, 1973. – 205 с.

Sadovskii V.D. Strukturnaya nasledstvennost' stali [Structural steel heredity]. Moscow. Metallurgy, 1973. – 205 p.

15. Безбах В.Д. Закалка стали 09Г2С из межкритического температурного интервала с использованием скоростной аустенитизации / В.Д. Безбах, Ю.А. Гарасим, Е.И. Якушечкин // МиТОМ. – 1994. – № 8. – С. 15–17.

Bezbakh V.D., Garasim Yu.A., Yakushechkin E.I. Zakalka stali 09G2S iz mezhkriticheskogo intervala s ispol'zovaniem skorosnoi austenitizatsii [Hardening steel 09G2S of intercritical temperature interval using a high-speed austenitizing]. MiTOM [Metallurgy and heat treatment of metals]. – 1994. – No. 8. – P. 15–17.

*Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. С. Вахрушевой (Украина); докт. техн. наук, проф. Л. Н. Дейнеко (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015