

УДК 669.1.017.3

К ВОПРОСУ О ДИСЛОКАЦИОННО-ДИФФУЗИОННОМ ГЕНЕЗИСЕ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТА В ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОМ БУНТОВОМ ПРОКАТЕ

ПАРУСОВ Э. В.¹, *к.т.н., с.н.с.*,
ГУБЕНКО С. И.², *д.т.н., проф.*,
СЫЧКОВ А. Б.³, *д.т.н., доц.*,
ЧУЙКО И. Н.^{4*}, *к.т.н.*,
САГУРА Л. В.⁵, *к.т.н.*

¹ Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, г. Днепропетровск, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4290-6498

² Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

³ Кафедра литейного производства и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, пр. Ленина, 38, г. Магнитогорск, Россия, 455000, тел. +7 (919) 348-66-84, e-mail: absyckov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

^{4*} Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, г. Днепропетровск, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: ichuyko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

⁵ Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, г. Днепропетровск, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: slv_metal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

Цель. Представляет интерес провести исследования особенности перлитного превращения в бунтовом прокате из сталей 85 и 85P с целью установления влияния дислокационных перестроек в аустените на формирование структуры перлита пластинчатой морфологии. Необходимо проанализировать особенности этих дислокационных перестроек. Необходимо также выявить возможности реализации управляемого перлитного превращения, что позволит регулировать уровень прочностных и пластических характеристик металлопродукции с прокатного нагрева. Цель работы – установить особенности влияния дислокационной структуры горячедеформированного аустенита на протекание перлитного превращения в сталях 85 и 85P, определяющих дислокационно-диффузионный генезис пластинчатого перлита. *Методика.* Материалом для исследований служили промышленные партии горячедеформированного бунтового проката из сталей 85 и 85P. Методы исследований – металлографический (оптическая, растровая микроскопия) и рентгеноструктурный анализ. *Результаты.* Установлено, что дислокационные перестройки полигонизационного характера, происходящие в субструктуре горячедеформированного аустенита в результате термопластической деформации перед перлитным превращением, а также взаимодействие дислокаций с атомами внедрения оказывают влияние на его механизм и раскрывают возможности управления процессами структурообразования бунтового проката больших диаметров из сталей марок 85 и 85P. *Научная новизна.* Установлены особенности перлитного превращения в сталях 85 и 85P, определяющие дислокационно-диффузионный генезис пластинчатой морфологии перлита. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволит разработать принципиально новые режимы высокотемпературной термомеханической обработки высокоуглеродистого бунтового проката широкого марочного сортамента и осуществить его энерго- и ресурсосберегающую переработку на метизном переделе.

Ключевые слова: перлитное превращение; дислокационно-диффузионная модель; цементит; феррит

ДО ПИТАННЯ ПРО ДИСЛОКАЦІЙНО-ДИФУЗІЙНИЙ ГЕНЕЗИС ПЛАСТИНЧАТОГО ПЕРЛИТУ В ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОМУ БУНТОВОМУ ПРОКАТІ

ПАРУСОВ Е. В.¹, *к.т.н., с.н.с.*,
ГУБЕНКО С. І.², *д.т.н., проф.*,
СИЧКОВ О. Б.³, *д.т.н., доц.*,
ЧУЙКО І. М.^{4*}, *к.т.н.*,
САГУРА Л. В.⁵, *к.т.н.*

¹ Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова. 1, м. Дніпропетровськ, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4290-6498

² Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

³ Кафедра ливарного виробництва і матеріалознавства, Магнітогорський державний технічний університет ім. Г. І. Носова, пр. Леніна, 38, м. Магнітогорськ, Росія, 455000, тел. +7 (919) 348-66-84, e-mail: absychkov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

^{4*} Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова. 1, м. Дніпропетровськ, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: ichuyko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

⁵ Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова. 1, м. Дніпропетровськ, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: slv_metal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

Мета. Цікавим є провести дослідження особливості перлітного перетворення в бунтову прокаті зі сталей 85 і 85P з метою встановлення впливу дислокаційних перебудов в аустеніті на формування структури перліту пластинчастої морфології. Необхідно проаналізувати особливості цих дислокаційних перебудов. Необхідно також виявити можливості реалізації керованого перлітного перетворення, що дозволить регулювати рівень міцності і пластичних характеристик металопродукції з прокатного нагріву. Мета роботи – встановити особливості впливу дислокаційної структури гарячедеформованого аустеніту на перебіг перлітного перетворення в сталях 85 і 85P, які визначають дислокаційно-дифузійний генезис пластинчастого перліту. *Методика.* Матеріалом для досліджень служили промислові партії гарячедеформованого бунтову прокату зі сталей 85 і 85P. Методи досліджень – металографічний (оптична, растрова мікроскопія) і рентгеноструктурний аналіз. *Результати.* Встановлено, що дислокаційні перебудови полігонізаційного характеру, які відбуваються в субструктурі гарячедеформованого аустеніту в результаті термопластичної деформації перед перлітним перетворенням, а також взаємодія дислокацій з атомами впровадження впливають на його механізм і розкривають можливості управління процесами структуроутворення бунтову прокату великих діаметрів зі сталі марок 85 і 85P. *Наукова новизна.* Встановлено особливості перлітного перетворення в сталях 85 і 85P, які визначають дислокаційно-дифузійний генезис пластинчастої морфології перліту. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити принципово нові режими високотемпературної термомеханічної обробки високовуглецевого бунтового прокату широкого марочного асортименту і здійснити його енерго- і ресурсозберігаючу переробку на метизному переобі.

Ключові слова: перлітне перетворення; дислокаційно-дифузійна модель; цементит; ферит

ON THE MATTER OF DISLOCATION-DIFFUSION GENESIS OF LAMELLAR PEARLITE IN HIGH-CARBON COIL-ROD MILL PRODUCTS

PARUSOV E. V.¹, *Cand. of Tech Sci., Senior Researcher*,
GUBENKO S. I.², *Doct. of Tech Sci., Professor*,
SYCHKOV A. B.³, *Doct. of Tech Sci., Assistant Professor*,
CHUIKO I. N.^{4*}, *Cand. of Tech Sci.*,
SAHURA L. V.⁵, *Cand. of Tech Sci.*

¹ Department metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4290-6498

² Department of material science, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina avenue, 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

³ Department of foundry and materials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Lenin Avenue, 38, Magnitogorsk, Russia, tel. +7 (919) 348-66-84, e-mail: absychkov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

^{4*} Department metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine 49050, tel. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: ichuyko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

⁵ Department metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine 49050, tel. +38 (0562) 33-71-63, e-mail: slv_metal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

Purpose. It is of scientific interest to carry out the research of particulars of pearlite transformation process in coil-rod mill products manufactured from steels of 85 and 85P grades in order to determine the influence of dislocation transformations in austenite to the forming of pearlite structure with lamellar morphology. The particular features of the dislocation transformations need to be analyzed. Moreover, it is necessary to reveal the capabilities to implement the controlled pearlite transformation in order to regulate the volumes of strength and plasticity of rolled metal goods from the rolling heat. The purpose of the study is to determine the particular influence of dislocation structure of hot-deformed austenite to the process of pearlite transforming in the steel of 85 and

85P grades establishing the dislocation-diffusion genesis of lamellar pearlite. *Methodology.* Industrial batches of hot-formed coil-rod mill products made of steel of 85 and 85P grades were the test material for the study. Research methods: metallography (optical, stereo-scanning microscopy) and X-ray crystal analysis. *Obtained Results.* It was determined that polygonizational dislocation transformations that occur in the sub-structure of hot-formed austenite as the result of thermoplastic deformation prior to the pearlite transformation, as well as interrelation of the dislocations with the interstitial atoms, affect its mechanism and ensure the capabilities of controlling of the structure forming processes in coil-rod rolled metal of large diameters made of steels of 85 and 85P grades. *Originality.* The particular features of pearlite transformation in steels of 85 and 85P grades which establish the dislocation-diffusion genesis of the lamellar morphology of pearlite. *Practical value.* Using of the outcomes obtained in the course of study will ensure the development of brand new modes of high-temperature thermo-mechanical treatment of high-carbon coil-rod mill products of wide grade assortment, and to fulfill its power- and resource-saving processing during the metal goods process stage.

Key terms: pearlitic transformation; dislocation-diffusion model; cementite; ferrite

Перлитное превращение играет важную роль в формировании микроструктуры бунтового проката (катанки) из высокоуглеродистых марок сталей, в том числе и микролегированных бором, которые предназначены для изготовления высокопрочных метизных изделий: арматурная проволока для железобетонных конструкций, стальные арматурные канаты, металлокорда и др. Повышение степени дисперсности перлита способствует увеличению прочностных характеристик как горячекатаного проката, так и готовой метизной металлопродукции. Несмотря на достаточно большое количество теоретических и экспериментальных исследований особенностей механизма и кинетики перлитного превращения в сталях различных типов [4, 7, 12, 15, 17], все же остаются вопросы, связанные с особенностями протекания этого превращения в высокоуглеродистых сталях, изучение которых позволит обеспечить высокие конструкционную и эксплуатационную прочности, а также пластичность указанной металлопродукции.

Целью данной работы было изучение особенностей влияния дислокационной структуры горячедеформированного аустенита на протекание перлитного превращения в сталях 85 и 85P, определяющих дислокационно-диффузионный генезис пластинчатого перлита.

Материалами для исследований служили промышленные партии горячедеформированного бунтового проката диаметром 11,0 мм из стали марок 85 и 85P. Применяли методы исследования – металлографический (оптическая и растровая микроскопия) и рентгеноструктурный анализ. Используемые приборы: световой микроскоп Neophot 32, автоматический анализатор изображения IA-3001, электронные микроскопы EF-2, VEGA TS5130MM, дифрактометр рентгеновский ДРОН-7.

Результаты. Существующие теории образования перлита содержат физико-математические модели перлитного превращения в условиях локального равновесия, основанных на разности концентраций углерода диаграммы Fe-C, энергии активации диффузии, поверхностной энергии и других показателях [15]. Механизм образования перлита, предложенный И. Л. Миркиным, а в последующем развитый Р. Мейлом, был связан с определением цементита как ведущей фазы [17], в то же время

автор работы [12] считает, что ведущей фазой при перлитном превращении может выступать как феррит, так и цементит, а их зарождение происходит по границам аустенитных зерен. Механизм протекания перлитного превращения объясняется тем, что на фронте раздела аустенит-цементит при утолщении пластин цементита аустенит обедняется углеродом, вследствие чего происходит полиморфное превращение аустенита в феррит, а при последующем утолщении пластин феррита углерод оттесняется в аустенит и происходит образование новых пластин цементита. Следует отметить, что в работах Е. С. Девенпорта, Э. Бейна, С. С. Штейнберга, Ф. Вефера установлено, что при изотермическом распаде аустенита в сталях образование пластин феррита и цементита может полностью завершиться всего за ~ 5 секунд, что свидетельствует о скоротечности протекания процесса перлитного превращения [15]. На основании анализа существующих теорий роста перлита можно сделать вывод о том, что перлитное превращение в стали является диффузионным процессом перераспределения углерода в силу возникающей разницы концентраций, при котором происходит формирование пластин феррита и цементита как в продольном, так и поперечном фронтах.

Однако при анализе существующих теорий перлитного превращения не учитываются процессы, связанные с возникновением термических напряжений и протеканием термопластической деформации в металле, происходящей при его охлаждении до температур протекания этого превращения и возникновением впоследствии дислокационной субструктуры. В работе [16] сделана попытка показать влияние дислокационной структуры на изменение степени дисперсности перлита в процессе деформационно-изотермической обработки, в работе [5] указано, что ветвление цементита при изотермическом распаде аустенита, возможно, связано с дислокационной структурой аустенита перед фронтом распада. Дальнейшее развитие дислокационный механизм образования перлита так и не получил, за исключением научных положений, изложенных в работе [13]. В то же время в работах [4, 6, 11] обоснован механизм перлитного превращения в сталях, проходящий на базе

регулярных дислокационных построений, связанных с термопластической деформацией, возникающей в процессе охлаждения аустенита как в областях температур превышающих, так и совпадающих с перлитным превращением. Формирование перлитной колонии связано с наличием избытка дислокаций одного знака вследствие термопластической деформации аустенита из-за тепловых напряжений; перераспределением дислокаций, приводящим к образованию дислокационных стенок и разделению аустенитных зерен на субзерна-полигоны; упругим взаимодействием атомов углерода с дислокациями, находящимися в полигональных стенках [2, 8, 10, 13]. Описанный механизм формирования пластинчатого перлита по своей природе является дислокационным и устанавливает генетическую связь между субструктурой переохлажденного аустенита и морфологией перлита при температурах перлитного превращения. Расстояние между плоскими дислокационными стенками определяется температурой процесса полигонизации, снижение которой способствует уменьшению расстояния между ними. Кроме того, высказано предположение, что плотность дислокаций, вблизи которых образуются углеродные атмосферы Коттрелла, влияет на степень пересыщения твердого раствора (аустенита) углеродом. В то же время, согласно данным работы [9] количество углерода, связанного с дефектами кристаллического строения аустенита, весьма мало и не влияет на состав аустенита. Проведенный эксперимент позволяет утверждать, что изменения концентраций углерода в аустените с повышенной и пониженной плотностью дефектов все же являются достаточными для проявления различий в структурообразовании при его превращениях. Необходимо отметить, что при проведении описанного в работах [10, 13] эксперимента, было выявлено несоответствие ранее установленным научным положениям работы [1], согласно которой авторы считают, что в случае протекания перлитного превращения при малых степенях переохлаждения в микроструктуре стали образуется зернистый перлит.

Как известно, в процессе охлаждения металлопроката по его сечению возникает градиент температур, который обусловлен неодинаковой скоростью изменения температуры, что вызывает неравномерное тепловое сжатие последовательно расположенных объемов стали и приводит к образованию тепловых напряжений и деформации [14]. Важной особенностью данного вида термопластической деформации является ее необратимость при любых видах тепловой обработки. Следовательно, в стали при непрерывном охлаждении после горячей деформации, либо нагретой до температур аустенитизации и подвергнутой охлаждению ниже критической точки A_{c1} , происходят процессы термопластической деформации. При этом необходимо отметить, что с увеличением скорости охлаждения повышаются как величина тепловых напряжений, так и их градиенты

и, следовательно, возрастает уровень термопластической деформации, что может быть предопределяющим фактором, который формирует межпластиночное расстояние в перлите.

В литературе приведен достаточный экспериментальный материал, описывающий влияние термопластической деформации на формирование субструктуры аустенита. При этом следует учитывать влияние дефектов кристаллического строения, возникших в процессе горячей деформации [6]. Известно, что характер горячедеформированной субструктуры аустенита определяется соотношением скоростей горячего наклепа и динамического разупрочнения, определяемого температурой, скоростью и степенью деформации. В ходе деформации аустенита его субструктура постоянно изменяется и в ней есть признаки деформационного упрочнения и динамического разупрочнения – это как бы субструктура двух порядков. В ходе горячей деформации дислокационная структура стенок ячеек и разориентировка субзерен постоянно изменяются: наблюдается образование и их рост в результате миграции или «рассыпания» субграниц (динамическая полигонизация), что приводит к наличию внутри субзерен повышенного количества дислокаций. Перестройка дислокационной структуры внутри субзерен способствует их повороту относительно соседей, а это стимулирует миграцию субграниц. В случае протекания динамического возврата по механизму коалесценции субзерен возможно образование устойчивой полигональной субзеренной структуры, характеризующейся равновесной конфигурацией стыков субграниц. Для горячедеформированных сталей плотность дислокаций находится в интервале $\sim 10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ [6]. В горячедеформированных сталях 85 и 85Р, подвергнутых ускоренному охлаждению, эта величина по результатам рентгеноструктурного анализа составила $2,14 \times 10^{10}$ и $1,93 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответственно, что на 1...2 порядка выше и позволяет предположить о дополнительном вкладе термопластической деформации, происходящей в процессе охлаждения аустенита до начала перлитного превращения. Очевидно, градиенты термических напряжений, возникающие в процессе охлаждения стали после горячей деформации, вызывают локальные микропластические сдвиги и перераспределение дислокаций путем скольжения, поперечного скольжения и переползания [6]. При этом в результате полигонизационных процессов возникают не только дислокационные стенки, состоящие из дислокаций одного знака либо из сеток дислокаций разного знака [6], но, в случае наличия горячедеформированной субструктуры, происходит перераспределение дислокаций в стенках ячеек. Следует отметить, что подвижность дислокаций в процессе термопластической деформации определяется возможностью динамического их закрепления при горячей деформации атмосферами

Коттрелла (углеродными в сталях 85 и боронитридами, карбоборонитридными в сталях 85P). В то же время, указанные атмосферы могут возникать в процессе перестройки дислокационной субструктуры при термопластической деформации, что способствует стабилизации регулярных дислокационных построений.

На рис. 1 приведена микроструктура перлита в горячедеформированных сталях 85 (а) и 85P (б). Следует отметить, что перлит в сталях с бором отличается большей степенью дисперсности.

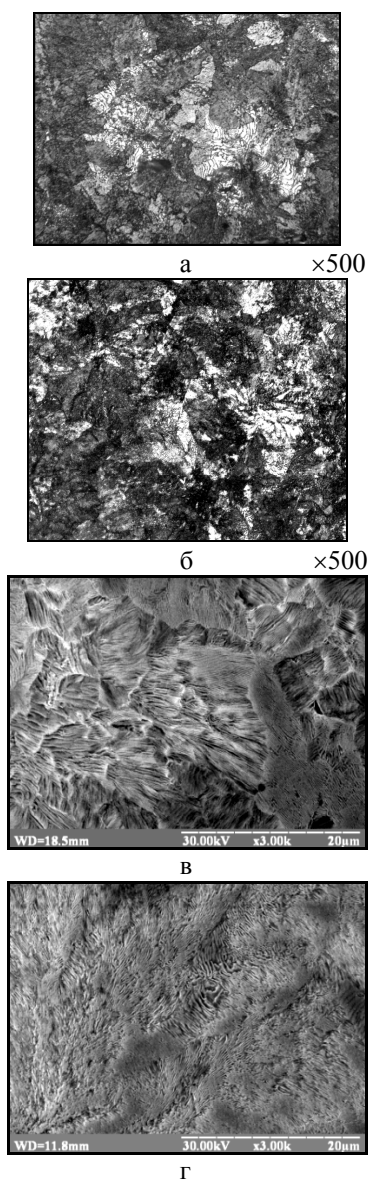


Рис. 1. Микроструктура перлита в горячедеформированных сталях 85 (а, б) и 85P (б, г) / Pearlite microstructure in the hot-rolled steels 85 (a, б) and 85P (б, г)

Детальный анализ микроструктуры стали 85P, охлажденной от температуры аустенитизации 970 °С до температуры $A_{c1} + 20$ °С, выдержанной на воздухе в течение 5 секунд с последующей закалкой, позволил выявить субколонии грубодисперсного

перлита (рис. 2). Это дает основание утверждать, что в верхней области субкритических температур (вблизи линии A_{c1}) перлитное превращение начинается с зарождения отдельных субзерен грубопластинчатого перлита, прилегающих к границе аустенитного зерна. Процесс перлитного превращения происходит последовательно, чем объясняется сравнительно большая продолжительность такого превращения в области верхних субкритических температур.

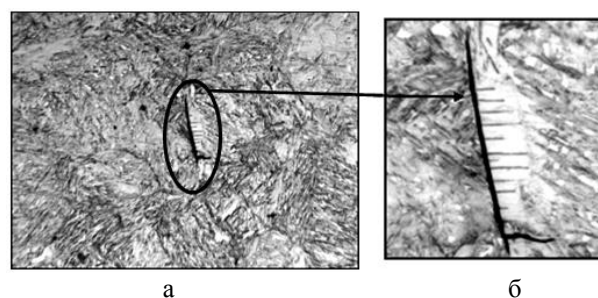


Рис. 2. Участки зарождающихся перлитных колоний в стали 85P: а – $\times 500$; б – $\times 1700$ / Incipient sites of the pearlite colonies in the steel 85P: а – $\times 500$; б – $\times 1700$

На основании обобщенных научных положений, а также проведенных исследований, связанных с особенностями структурообразования в сталях перлитного класса, представляется возможным предложить модель перлитного превращения, схема которой приведена на рис. 3. Суть предложенной модели заключается в следующем: в процессе непрерывного охлаждения происходит термопластическая деформация переохлажденного аустенита, в результате чего в субструктуре аустенита образуются полигональные стенки, сформированные дислокациями одного знака, разных знаков либо преобразованные в результате полигонизации стенки деформированной ячеистой структуры. При этом упругое взаимодействие дислокаций с атомами углерода, бора, азота (образование атмосфер Коттрелла) обеспечивает мгновенное образование плоских зародышей цементита и феррита, т. е. продольного фронта формирования перлитной колонии.

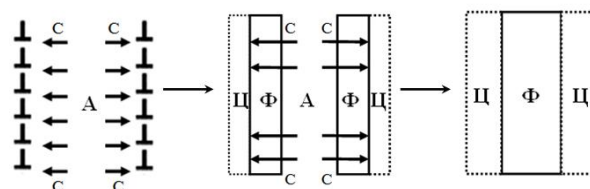


Рис. 3. Схема модели перлитного превращения: А – аустенит; Ф – феррит; Ц – цементит; С – углерод / Scheme of the pearlite transformation model: А – austenite; Ф – ferrite; Ц – cementite; С – carbon

При этом расстояния между предварительно сформированными дислокационными стенками определяют межпластиночное расстояние в колонии

перлита. Очевидно, важную стабилизирующую роль для дислокационных стенок играет взаимодействие дислокаций с атомами внедрения (углеродом, бором, азотом). Превращение аустенита в перлит происходит путем образования на зародышах пластин цементита зародышей феррита и последующим раздельным ростом этих фаз за счет аустенита, граничащего с близлежащими ферритными зародышами. Раздельное формирование цементитных и ферритных пластин происходит за счет диффузии углерода от аустенита к цементиту через ферритную пластину и объясняется тем, что коэффициент диффузии углерода в феррите на два порядка выше, чем в аустените [3], а разность концентраций углерода в пластине феррита на границе феррит/цементит и феррит/аустенит при поперечном росте перлита превышает разность концентраций этого элемента, возникающую между фазами цементит/аустенит и феррит/аустенит при продольном росте перлита. Предложенная модель по своей природе является дислокационно-диффузионной, она объединяет в себе все известные в настоящий момент научные положения и разъясняет причину скоротечности перлитного превращения при распаде гомогенного аустенита. Так, согласно предложенной модели образование продольного фронта роста колонии происходит практически мгновенно (за счет образования дислокационных построений), а поперечный фронт развития колонии обеспечивает дальнейший рост пластин феррита и цементита. Так как диффузия углерода проходит одновременно (в обе стороны) по направлениям к предварительно сформированным дислокационными стенками зародышам цементита, а максимальная скорость диффузии, скорость роста и зарождения центров кристаллизации при распаде аустенита соответствует интервалу температур 560...530 °С [2], то представляется возможным именно этими факторами объяснить скоротечность протекания перлитного превращения. Дополнительным подтверждением предложенного механизма превращения аустенита в перлит может быть работа [4], в которой механизм прохождения эвтектоидного превращения связан с перепадом концентраций углерода в переохлажденном

аустените. Вследствие возникающего перепада концентраций углерод переносится в аустените от феррита к цементиту. При совместном росте феррита и цементита, цементит изолирован от аустенита прослойкой феррита и эвтектоидный распад аустенита связан с диффузией углерода через ферритный слой. Такого же мнения в своих работах придерживался и Фишер [15], который предположил, что самым высоким коэффициентом диффузии обладает феррит, в связи с чем основной диффузионный поток атомов углерода протекает в α -фазе от фронта раздела аустенит/феррит к границе феррит/цементит.

Научная новизна и практическая значимость.

Получила дальнейшее развитие модель перлитного превращения в сталях 85 и 85P, определяющая дислокационно-диффузионный генезис пластинчатой морфологии перлита. Установлено, что дислокационные перестройки полигонизационного характера, происходящие в субструктуре горячедеформированного аустенита в результате термопластической деформации перед перлитным превращением, а также взаимодействие дислокаций с атомами внедрения оказывают влияние на его механизм и раскрывают возможности управления процессами структурообразования бунтового проката из сталей марок 85 и 85P. Использование полученных результатов позволит разработать принципиально новые режимы высокотемпературной термомеханической обработки высокоуглеродистого бунтового проката широкого марочного сортамента и осуществить его экономно- и ресурсосберегающую переработку на метизном переделе.

Выводы. На основании обобщенных научных положений и проведенных исследований, предложена модель перлитного превращения, которая объясняет скоротечность его протекания. Установлены основные процессы, определяющие характер полигонизационных перестроек, а также взаимодействие дислокаций с атомами внедрения в горячедеформированном аустените при термопластической деформации до момента начала перлитного превращения в сталях марок 85 и 85P. Показаны особенности зарождения колоний перлита в области верхних субкритических температур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бернштейн М. Л. *Металловедение и термическая обработка стали*. Т. 1 / М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт. – 2 изд. – Москва : Металлуриздат, 1961. – С. 445.
2. Бернштейн М. Л. *Термомеханическая обработка стали* / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. – Москва : Металлургия, 1983. – 480 с.
3. Бокштейн Б. С. *Диффузия в металлах* / Б. С. Бокштейн. – Москва : Металлургия, 1978. – 248 с.
4. Бунин К. П. *Металлография* / К. П. Бунин, А. А. Баранов. – Москва : Металлургия, 1970. – 256 с.
5. Бунин К. П. *О зарождении и строении перлита* / К. П. Бунин, Ю. К. Бунина, В. И. Мазур // *МиТОМ*. – Москва : Металлургия, 1971. – № 10. – С. 6–7.
6. Губенко С. И. *Деформация металлических материалов* / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2006. – 316 с.
7. Гуляев А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1986. – 542 с.
8. Дьяченко С. С. *Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах* / С. С. Дьяченко. – Москва : Металлургия, 1983. – 231 с.

9. Капуткина Л. М. Состояние мартенсита после высокотемпературной термомеханической обработки / Л. М. Капуткина, М. Л. Бернштейн, М. А. Штремель // ФХОМ. – 1974. – №1. – С. 71–78.
10. Механізм перлітного перетворення у вуглецевій сталі [Електронний ресурс] / Е. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, І. М. Чуйко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 2. – С. 1–5. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/4005>.
11. Новиков И. И. Дефекты кристаллического строения металлов / И. И. Новиков. – Москва : Metallurgiya, 1983. – 231 с.
12. Новиков И. И. Теория термической обработки / И. И. Новиков. – Москва : Metallurgiya, 1978. – 392 с.
13. Развитие теоретических представлений о перлитном превращении в стали / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, О. В. Парусов, Л. В. Сагура, И. Н. Чуйко, А. И. Сивак // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : Сб. научн. тр. – Днепропетровск : Візiон, 2013. – Вып. 27. – С. 200–204.
14. Стародубов К. Ф. Термическое упрочнение проката / К. Ф. Стародубов, И. Г. Узлов, В. Я. Савенков. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 368 с.
15. Счастливец В. М. Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливец, Д. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева. – Екатеринбург : УрО РАН, 2006. – 311 с.
16. Тушинский Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л. И. Тушинский. – Новосибирск : Наука, 1990. – 306 с.
17. Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали / Р. И. Энтин. – Москва : Metallurgizdat, 1960. – 252 с.

REFERENCES

1. Bernstein M.L. and Rahshtadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka stali. T.1* [Metal science and heat treatment of steel. Vol. 1]. Moscow: Metallurizdat, 1961, 2 ed., 445 p. (in Russian).
2. Bernshtein M.L., Zaimovsky V.A. and Kaputkina L.M. *Termomechanicheskaja obrabotka stali* [Thermomechanical processing of steel]. Moscow: Metallurgy, 1983, 480 p. (in Russian).
3. Bokshstein B.S. *Diffuzija v metallah* [Diffusion in metals]. Moscow: Metallurgy, 1978, 248 p. (in Russian).
4. Bunin K.P. and Baronov A.A. *Metallografija* [Metallography]. Moscow: Metallurgy, 1970, 256 p. (in Russian).
5. Bunin K.P., Bunina Y.K. and Mazur V.I. *O zarozhdenii i stroenii perlita* [About the origin and structure of pearlite]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgy, 1971, no. 10, pp. 6-7 (in Russian).
6. Gubenko S.I. and Parusov V.V. *Deformatsija metallicheskih materialov* [Deformation of metallic materials]. Dnipropetrovsk: Art-press, 2006, 316 p. (in Russian).
7. Guljaev A.P. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow: Metallurgy, 1986, 542 p. (in Russian).
8. Dijachenko S.S. *Obrazovanie austenita v zhelezouglerodistykh splavah* [Formation of austenite in the iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgy, 1983, 231 p. (in Russian).
9. Kaputkina L.M., Bernstein M.L. and Shtremel M.A. *Sostojanie martensita posle vysokotemperaturnoi termomechanicheskoi obrabotki* [Martensite condition after high-temperature thermomechanical processing]. FХОМ, 1974, no. 1, pp. 71-78 (in Russian).
10. Parusov E.V., Parusov V.V., Sahura L.V. and Chuyko I.N. *Mehanizm perlitnogo peretvorennja u vugletsevii stali* [Mechanism of the pearlitic converting into carbon steel]. *Naukovi pratsi VNTU* [Scientific works of the Vinnytsya national technical university]. 2015, no. 2, pp. 1-5. Available at: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/4005> (in Ukrainian).
11. Novikov I.I. *Defekty kristallicheskogo stroenija metallov* [Defects of crystalline structure of metals]. Moscow: Metallurgy, 1983, 231 p. (in Russian).
12. Novikov I.I. *Teorija termicheskoy obrabotki* [Theory of heat treatment]. Moscow: Metallurgy, 1978, 392 p. (in Russian).
13. Parusov V.V., Parusov E.V., Parusov O.V., Sahura L.V., Chuyko I.N. and Sivak A.I. *Razvitie teoreticheskikh predstavlenij o perlitnom prevraschenii v stali* [Development of theoretical ideas about the pearlitic converting into steel]. *Fundamentalnie i prikladnie problemy cherno metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. Dnipropetrovsk: Vizion, 2013, vol. 27, pp.200-204 (in Russian).
14. Starodubov K.F., Uzlov I.G. and Savenkov V.Y. *Termicheskoe uprochnenie prokata* [Thermal hardening bars]. Moscow: Metallurgy, 1970, 368 p. (in Russian).
15. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A. and Yakovleva I.L. *Perlit v uglerodistykh staljah* [Pearlite in carbon steels]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 311 p. (in Russian).
16. Tushinskiy L.I. *Teorija i tehnologija uprochnenija metallicheskih splavov* [Theory and technology of work-hardening of metallic alloys]. Novosibirsk: Science, 1990, 306 p. (in Russian).
17. Entin I. *Prevraschenija austenita v stali* [Converting of austenite into steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1960, 252 p. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Левченко Г. В. (Украина) и д.т.н., с.н.с. Бабаченко А. И. (Украина)