

УДК 621.771.294:629.4.001.86

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241120.30.688

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СТАЛИ К76Ф ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО СЕЧЕНИЮ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА

БАБАЧЕНКО А. И.¹, *докт. техн. наук*,
КОНОНЕНКО А. А.², *канд. техн. наук*,
ПОДОЛЬСКИЙ Р. В.^{3*}

¹ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

^{3*} Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49000, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 713-59-51; отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Аннотация. *Цель работы* – определение критических точек и исследование кинетики распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении стали для рельсов с повышенным содержанием марганца и микролегированных ванадием, для обоснованной разработки режимов термоупрочнения. **Методика.** Исследование кинетики распада аустенита нагретых образцов проводили в вакууме ($5,0 \cdot 10^{-4}$ mbar) при нагреве токами высокой частоты (2 МГц). Термический цикл определяется программой, которая основана на регулировании температуры образца во времени с помощью сваренной термопары (сплав Pt – Pt/Rh 10 %) диаметром 0,09 мм. Металлографические исследования проводили с использованием металлографического микроскопа Axio Observer и растрового электронного микроскопа РЭМ-106. Межпластиночное расстояние в перлите определяли линейным методом, секущие располагались перпендикулярно пакетам пластин. Твердость по Виккерсу при нагрузке 10 кг измеряли с помощью автоматического микротвердомера КВ 30. Количество структурных компонентов оценивали с помощью микрофотографии с использованием анализатора изображений с применением метода количественного определения фаз, реализованного в анализаторе изображений Thixomet. **Результаты.** Анализ термокинетической диаграммы (ТКД) показал, что температуры начала и завершения образования феррита, перлита и бейнита значительно снижаются с увеличением скорости охлаждения. При реализации рациональных режимов термообработки – охлаждение поверхности катания рельсов со скоростью не более 5 °С/с, центральных объемов головки рельса со скоростью не менее 2,5 °С/с возможно изготовление высокопрочных рельсов категорий ОТ370ИК, ДТ370ИК по ГОСТ Р 51685-2013 из стали марки К76Ф с содержанием 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V. В результате анализа ТКД исследуемой стали можно сделать вывод, что в стали марки К76Ф с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V невозможно добиться твердости выше 400 НВ без образования бейнита. **Научная новизна.** Построена термокинетическая диаграмма распада аустенита стали марки К76Ф с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V. **Практическая значимость.** Установлено, что на стали К76Ф с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V невозможно достичь твердости выше 400НВ без образования бейнита, поэтому для изготовления высокопрочных рельсов категории R400НТ по EN 13674-1-2011 она не может быть использована.

Ключевые слова: *железнодорожные рельсы; химический состав; межпластиночное расстояние; кинетика распада; твердость*

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕРМОКІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОХОЛОДЖЕННЯ СТАЛІ К76Ф ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТВЕРДОСТІ ПО ПЕРЕТИНУ ГОЛОВКИ РЕЙКИ

БАБАЧЕНКО О. І.¹, *докт. техн. наук*,
КОНОНЕНКО Г. А.², *канд. техн. наук*,
ПОДОЛЬСЬКИЙ Р. В.^{3*}

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 713-59-51; відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Анотація. Мета роботи – визначення критичних точок і дослідження кінетики розпаду переохолодженого аустеніту за безперервного охолодження сталі для рейок із підвищеним умістом марганцю і мікролегованих ванадієм, для обґрунтованого розроблення режимів термозміцнення. **Методика.** Дослідження кінетики розпаду аустеніту нагрітих зразків проводили у вакуумі ($5,0 \cdot 10^{-4}$ mbar) з нагріванням струмами високої частоти (2 МГц). Термічний цикл визначається програмою, яка заснована на регулюванні температури зразка в часі за допомогою звареної термомпарі (сплав Pt – Pt / Rh 10 %) діаметром 0,09 мм. Металографічні дослідження проводили з використанням металографічного мікроскопа Axio Observer і растрового електронного мікроскопа РЕМ-106. Міжпластинчасту відстань у перліті визначали лінійним методом, січні розташовувалися перпендикулярно пакетам пластин. Твердість за Віккерсом під час навантаження 10 кг вимірювали за допомогою автоматичного мікротвердоміра КВ 30. Кількість структурних компонентів оцінювали за допомогою мікрофотографії з використанням аналізатора зображень із застосуванням методу кількісного визначення фаз, реалізованого в аналізаторі зображень Thixomet. **Результати.** Аналіз термодинамічної діаграми (ТКД) показав, що температури початку і завершення утворення фериту, перліту і бейніту значно знижуються зі збільшенням швидкості охолодження. У разі реалізації раціональних режимів термообробки – охолодження поверхні кочення рейки зі швидкістю не більше 5 °С/с, центральних обсягів головки рейки зі швидкістю не менше 2,5 °С/с можливе виготовлення високоміцних рейок категорій ОТ370ИК, ДТ370ИК по ГОСТ Р 51685-2013 із сталі марки К76Ф з умістом 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V. У результаті аналізу ТКД досліджуваної сталі можна зробити висновок, що в сталі марки К76Ф з 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V неможливо досягти твердості вище 400 НВ без утворення бейніту. **Наукова новизна.** Побудовано термодинамічну діаграму розпаду аустеніту сталі марки К76Ф з 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V. **Практична значимість.** Установлено, що на сталі К76Ф з 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V неможливо досягти твердості вище 400НВ без утворення бейніту, тому для виготовлення високоміцних рейок категорії R400НТ по EN 13674-1- 2011 вона не може бути використана.

Ключові слова: залізничні рейки; хімічний склад; міжпластинчаста відстань; кінетика розпаду; твердість

SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF THERMOKINETIC PARAMETERS OF COOLING OF STEEL K76F TO INCREASE THE HARDNESS OVER THE SECTION OF THE RAIL HEAD

BABACHENKO O.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.)*,
KONONENKO H.A.², *Cand, Sc. (Tech.)*,
PODOLSKYI R.V.^{3*}

¹ Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K.F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

^{3*} Department of heat treatment of metals, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 713-59-51; Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Abstract. Purpose. Determination of critical points and study of the kinetics of decomposition of supercooled austenite during continuous cooling of steel for rails with an increased content of manganese and microalloyed with vanadium, for substantiated development of thermal hardening modes. **Methodology.** The study of the kinetics of decomposition of austenite of heated samples was carried out in vacuum ($5.0 \cdot 10^{-4}$ mbar) with heating by high-frequency currents (2 MHz). The thermal cycle is determined by the program, which is based on the control of the sample temperature

over time using a welded thermocouple (Pt–Pt/Rh 10 % alloy) with a diameter of 0,09 mm. Metallographic studies were carried out using an Axio Observer metallographic microscope and an PCM-106 scanning electron microscope. The interplate spacing in pearlite was determined by a linear method, the secant lines were located perpendicular to the plate packs. The Vickers hardness at a load of 10 kg was measured using a KB 30 automatic microhardness tester. The amount of structural components was assessed by micrograph using an image analyzer using the phase quantification method implemented in the Thixomet image analyzer. **Results.** The thermokinetic diagram analysis showed that the temperatures of the beginning and the end of the formation of ferrite, pearlite, and bainite decrease significantly with an increase in the cooling rate. With the implementation of rational heat treatment modes - cooling the surface of the steel rolling rails of no more than 5 °C/sec, the central volumes of the rail head at a rate of at least 2.5 °C/sec, it is possible to manufacture high-strength rails of the ОТ370ИК, ДТ370ИК categories according to GOST R 51685-2013 from steel grade K76Ф with a content of 0.80 % C, 0.25 % Si, 0.97 % Mn, 0.055 % V. As a result of the analysis of the thermokinetic diagram of the investigated steel, it can be concluded that in the investigated steel grade K76F with 0.80 % C, 0.25 % Si, 0.97 % Mn, 0.055 % V it is impossible to achieve hardness above 400 HB without the formation of bainite. **Scientific novelty.** A thermokinetic diagram of the decomposition of austenite of steel grade K76F with 0.80 % C, 0.25 % Si, 0.97 % Mn, 0.055 % V is constructed. **Practical significance.** It was found that on steel K76F with 0.80 % C, 0.25 % Si, 0.97 % Mn, 0.055 % V, it is impossible to achieve a hardness higher than 400HV without the formation of bainite, therefore, for the manufacture of high-strength rails of category R400HT according to EN 13674-1-2011 it cannot be used.

Keywords: railway rails; chemical composition; interplate distance; decay kinetics; hardness

Введение

В Украине железнодорожные рельсы изготавливаются в соответствии с требованиями ДСТУ 4344: 2004 «Рельсы обычные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия» [1].

Рельсы в соответствии с ДСТУ 4344: 2004 [1] изготавливаются из углеродистых сталей мартеновского (маркировка М), конвертерного (маркировка К) или электросталеплавильного (маркировка Е) способов производства с содержанием углерода 0,69...0,80 % и 0,71...0,82 % без микролегирования или с введением ванадия или титана в количестве 0,03...0,07 % и 0,007...0,0025 % соответственно. При этом в нормативном документе не оговаривается, какая категория рельсов соответствует тому или иному химическому составу и для каких условий эксплуатации используется каждая категория рельсов.

Главный критерий долговечности рельсов – их износостойкость. Как показали многочисленные исследования, характеристикой, определяющей износостойкость, является твердость изделия [2; 3].

По требованиям к твердости на поверхности катания (374...401 НВ для рельсов высшей категории) нормативная документация Украины занимает средние позиции среди стандартов других стран. Требования к твердости области качения ДСТУ 4344 превышают требования стандартов Австралии, Японии, Канады и

США. Однако они уступают требованиям ГОСТ Р 51685-2013 (верхний предел 405...409 НВ для рельсов ОТ370ИК и ДТ370ИК) [4] и EN 13674-1: 2011 (верхний предел 390...440 НВ для рельсов R400HT) [5].

Еще одна отличительная черта отечественного нормативного документа от российских и европейских стандартов – это глубина измерения твердости по сечению головки рельса. Максимальная глубина, определенная ДСТУ 4344, составляет 11 мм, а уровень твердости в этой точке для рельсов высшей категории должен быть не менее 321 НВ. В то время как ГОСТ Р 51685-2013 регламентирует максимальную глубину измерения твердости в головке рельса 22 мм и уровень твердости в этой точке – не менее 352 НВ для рельсов ОТ370ИК и ДТ370ИК, а EN 13674-1: 2011 – глубиной 20 мм при твердости более 370 НВ.

По уровню значений твердости исследуемый рельс является рельсом высшей категории по ДСТУ 4344: 2004. В то же время данная категория рельсов по показателям твердости на глубине 11 мм не соответствует минимальным значениям для рельсов из стали марки R350, обеспечивающей наименьшую твердость для термического упрочнения рельсов согласно EN 13674-1-2011.

Таким образом, необходимо изучить возможность достижения в стали марки

К76Ф для рельсов уровня твердости, отвечающего требованиям зарубежных стандартов.

Цель работы

Определение критических точек и исследование кинетики распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении стали для рельсов с повышенным содержанием марганца и микролегированных ванадием, для обоснованной разработки режимов термоупрочнения, повышающих их эксплуатационную надежность.

Материалы и методы исследований

Химический состав стали рельсов представлен в таблице 1. По массовой доле элементов эту сталь можно отнести к стали марки К76Ф с повышенным содержанием углерода в пределах марочного состава и пониженным количеством кремния.

Для исследования кинетики распада аустенита нагрев образцов в dilatометре DIL 805 A проводили в вакууме ($5,0 \cdot 10^{-4}$ mbar) токами высокой частоты (2 МГц) с использованием индуктора, состоящего из двух медных катушек. Эти катушки представляют собой полые медные трубки. Внутри внешней катушки циркулирует вода, необходимая для охлаждения индуктора, внутренние отверстия второй катушки используются для подачи газа (гелий, газообразный азот), предназначенного для ускоренного охлаждения образцов с заданной скоростью. Образец расположен горизонтально, а изменение геометрических размеров образца определяется с помощью высокоточного датчика LVDT (линейный дифференциальный трансформатор с переменным коэффициентом передачи), измеряющего линейное увеличение.

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали для рельсов, масс. доля, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
0,80	0,25	0,97	0,011	0,007	0,04	0,03	0,03	0,006	0,005	≤0,01	0,055

Термический цикл определяется программой, которая основана на

регулировании температуры образца во времени с помощью сваренной термопары (сплав Pt – Pt/Rh 10 %) диаметром 0,09 мм. Программа представлена в виде таблицы с указанием температуры и времени. Устройство поддерживает заданную температуру в заданное время. Скорость охлаждения определяется скоростью подачи охлаждающего газа.

Термокинетическую диаграмму (ТКД) строили после различных скоростей охлаждения dilatометрических образцов, нагретых в режиме, близком к режиму нагрева, при закалке рельсов в индукционной установке на участке термообработки ПАО «МК Азовсталь»: скорость нагрева образцов в индукторе составляла 30 °С/мин. После нагрева до аустенитной области образцы выдерживали в течение 5 минут и охлаждали гелием с разными скоростями: 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 30 °С/с.

Металлографические исследования проводили с использованием металлографического микроскопа с инвертированным кодовым названием Axio Observer. Д1м с моторизованным предметным столом и растрового электронного микроскопа РЭМ-106. Микрошлифы изготавливали посередине dilatометрических образцов в сечении, перпендикулярном их оси.

После стандартной методики приготовления металлографических шлифов исследуемую поверхность травили в 2...4 % спиртовом растворе азотной кислоты для выявления конечной структуры. Твердость по Виккерсу при нагрузке 10 кг измеряли с помощью автоматического измерителя микро-твердости КВ 30. Количество структурных компонентов оценивали с помощью микрофотографии с применением анализатора изображений с использованием метода количественного определения фаз, реализованного в анализаторе изображений Thixomet.

Результаты исследований

На первом этапе исследований были определены критические точки для исследуемой стали. Dilатометрические

исследования показали, что при нагревании образцов со скоростью 30 °С/мин в стали для железнодорожных рельсов полиморфное $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение начинается при температуре ~735 °С (Ac1), заканчивается при ~760 °С (Ac3). Для построения ТКД образцы были нагреты до температуры 900 °С (примерно на ~50 °С выше температуры Ac3 для этой стали), что соответствует термообработке, принятой в производстве железнодорожных рельсов.

На ТКД (рис. 1) для каждой скорости охлаждения наносятся значения твердости по Виккерсу и объемные доли структурных компонентов, выраженные в процентах. Анализ ТКД показывает, что температуры начала и завершения образования феррита, перлита и бейнита значительно снижаются с увеличением скорости охлаждения. При увеличении скорости охлаждения наблюдается тенденция к увеличению значений твердости из-за структурных изменений, происходящих в стали: увеличение дисперсности структурных составляющих, уменьшение количества феррита и перлита в структуре, увеличение объемной доли бейнита и мартенсита.

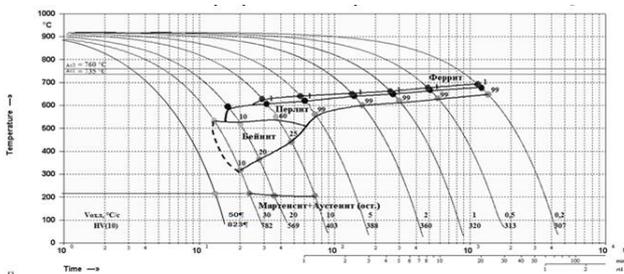


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении стали: 0,80 % C, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V

При скоростях охлаждения 0,2...5 °С/с структура исследуемой стали состоит из перлита и небольшого количества феррита (~1 %), образующегося по границам аустенитного зерна и имеющего вид очень тонкой рваной сетки (рис. 2 а–е).

По мере увеличения скорости охлаждения изменяется морфология и увеличивается дисперсность перлита: от среднего перлита до высокодисперсных структур сорбита и троостита закалки.

Структура троостита на микрофотографиях имеет наиболее темный цвет и отличается повышенной твердостью среди других продуктов диффузионного превращения. При скорости охлаждения 10 °С/сек на дилатометрической кривой фиксируется бейнитное (промежуточное) превращение (рис. 2 f). При последующем увеличении скорости охлаждения морфология бейнита изменяется: от перистого (верхний) до игольчатого (нижний) (рис. 2 g).

В исследуемой стали полностью подавляется образование доэвтектоидного феррита и перлита при скорости охлаждения более 15 °С/с. Дальнейшее увеличение скорости охлаждения до 30 °С/с приводит к уменьшению структуры объемной доли бейнита и увеличению количества мартенсита (рис. 2 h). При скорости охлаждения 50 °С/с образуется мартенсит.

Из таблицы видно, что при скоростях охлаждения 0,2...5 °С/с фазовый состав не меняется, но, как следует из рисунка 1, с увеличением скорости охлаждения твердость увеличивается. Причина этого – изменение дисперсности перлита.

Межпластиночное расстояние в перлите определяли линейным методом, секущие располагались перпендикулярно пакетам пластин. Микроструктура, сформированная при различных скоростях охлаждения, представлена на рисунке 3, результаты измерений графически показаны на рисунке 4.

Таблица 2

Фазовый состав экспериментальной стали при различных скоростях охлаждения

Скорость охлаждения, °С/с	Фазовая доля, % об.			
	Мартенсит + аустенит остаточн.	Бейнит	Перлит	Феррит
0,2	–	–	99	1
0,5	–	–	99	1
1	–	–	99	1
2	–	–	99	1
5	–	–	99	1
10	14	25	60	1
20	70	20	10	–
30	90	10	–	–
50	100	–	–	–

По мере увеличения скорости охлаждения изменяется морфология и

повышается дисперсность перлита: от тонкостенного к сорбитообразному перлиту 1 балла в соответствии с ГОСТ 8233. Это приводит к увеличению твердости (рис. 5).

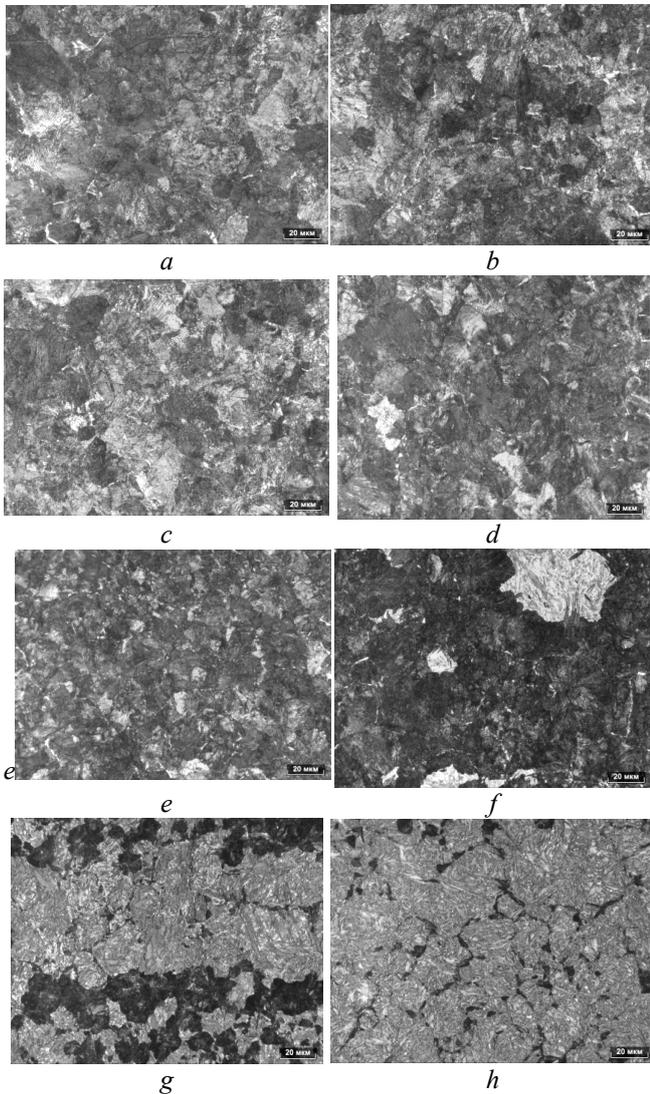


Рис. 2. Микроструктура образцов стали с 0,80 % C, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V, охлаждаемых с разными скоростями: a – 0,2 °C/c; b – 0,5 °C/c, c – 1 °C/c, d – 2 °C/c, e – 5 °C/c, f – 10 °C/c, g – 20 °C/c, h – 30 °C/c

Для однофазных сплавов и низкоуглеродистых сталей основным структурным элементом является размер зерна. Зависимость границы текучести достаточно хорошо описывается соотношением Холла – Петча:

$$\sigma_T = \sigma_i + K_y \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_i – деформация кристаллической решетки; K_y – величина, которая оценивает сопротивление зерен процессу

распространения пластической деформации; d – размер зерна феррита.

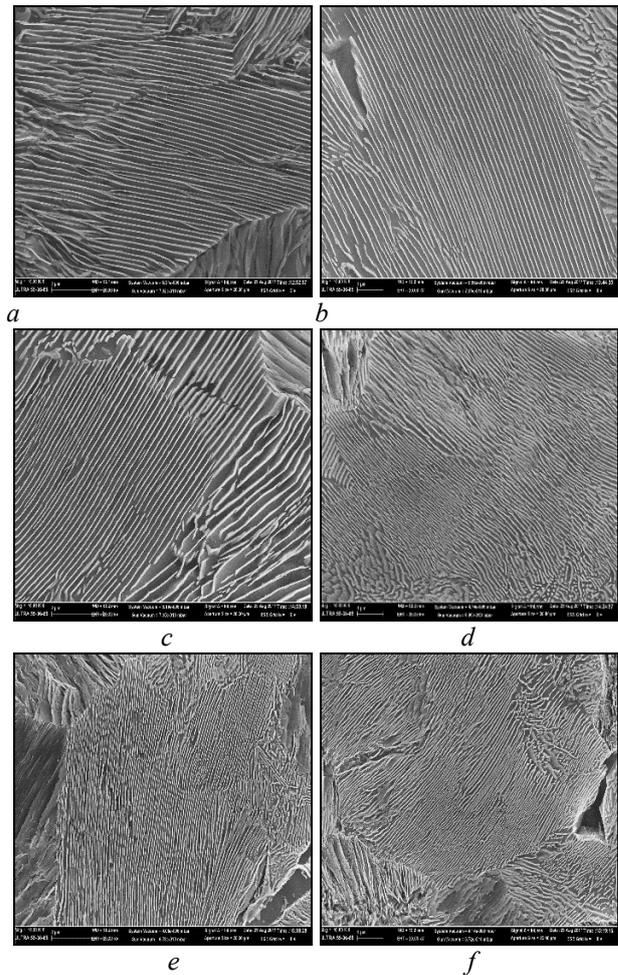


Рис. 3. Микроструктура стали с 0,80 % C, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V, охлажденной со скоростью 0,2 °C/c (a), 0,5 °C/c (b), 1 °C/c (c), 2 °C/c (d), 5 °C/c (e), 10 °C/c (f) $\times 10\,000$

Для высокоуглеродистых сталей, где основным структурным компонентом является перлит, в уравнении (1) вместо d можно использовать ΔS – межплоскостное расстояние, поскольку оно описывает ширину свободного пробега дислокаций, которая связана с шириной ферритных пластин. Поскольку увеличение скорости охлаждения уменьшает межпластиночное расстояние, эти изменения приводят к увеличению твердости и прочности при постоянном фазовом составе.

Согласно требованиям ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» [4], твердость на поверхности для высокопрочных рельсов должна быть 370...409 НВ, а на глубине

22 мм от поверхности области качения головки по вертикальной оси рельса – не менее 352 НВ. Из диаграммы видно, что при скорости охлаждения 5 °С/с твердость составляет 403 НВ (385 НВ), а структура не содержит бейнита. При скорости охлаждения 2 °С/с твердость составляет 360 НВ (348 НВ). Это несколько ниже минимально допустимого значения, но методом интерполяции можно определить, что скорость охлаждения должна быть не менее 2,5 °С/с для достижения твердости не менее 352 НВ. То есть при реализации рациональных режимов термообработки – охлаждение поверхности качения рельса со скоростью 5 °С/с, центральных объемов головки рельса со скоростью не менее 2,5 °С/с – могут быть изготовлены высокопрочные рельсы категорий ОТ370ИК, ДТ370ИК по ГОСТ Р 51685-2013 из стали марки К76Ф с содержанием 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V.

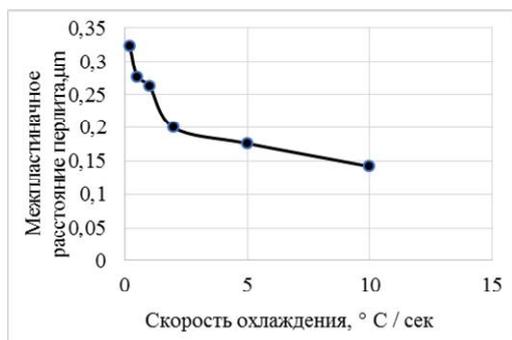


Рис. 4. Зависимость межпластинчатых расстояний перлита от скорости охлаждения стали с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V

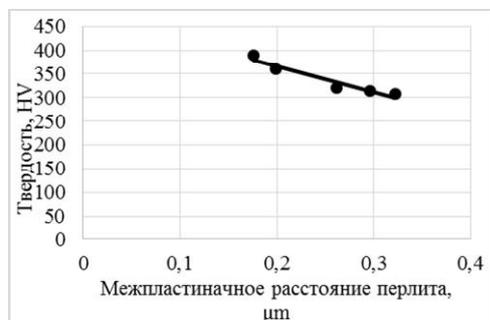


Рис. 5. Зависимость твердости стали с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V межпластинчатых расстояний перлита

В соответствии с требованиями стандарта EN 13674-1-2011 «Железные дороги – Рельсы – Рельсы – Часть 1: Рельсы Vignole 46 кг/м и более» [5] твердость на поверхности качения рельсов категории R400НТ должна составлять 400...440 НВ, а на глубине 20 мм от поверхности качения головки по вертикальной оси рельса – не менее 370 НВ. В результате анализа ТКД исследуемой стали (рис. 1) можно сделать вывод, что в исследуемой стали марки К76Ф с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V невозможно добиться твердости выше 400 НВ без образования бейнита. Для изготовления высокопрочных рельсов категории R400НТ EN 13674-1-2011 необходимо создание стали нового химического состава.

Выводы

1. При реализации рациональных режимов термообработки – охлаждение поверхности качения рельсов со скоростью 5 °С/с, центральных объемов головки рельса со скоростью не менее 2,5 °С/с – возможно изготовление высокопрочных рельсов категорий ОТ370ИК, ДТ370ИК по ГОСТ Р 51685-2013 из стали марки К76Ф с содержанием 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V.

2. Установлена закономерность изменения межпластинчатого расстояния в перлите в зависимости от скорости охлаждения стали марки К76Ф с содержанием 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V.

3. Установлена закономерность изменения твердости в зависимости от межпластинчатого расстояния в перлите стали марки К76Ф с содержанием 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V.

4. В результате анализа ТКД исследуемой стали можно сделать вывод, что в исследуемых сталях марки К76Ф с 0,80 % С, 0,25 % Si, 0,97 % Mn, 0,055 % V невозможно достичь твердости выше 400НВ без образования бейнита. Для изготовления высокопрочных рельсов категории R400НТ по EN 13674-1-2011 необходимо создание стали нового химического состава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДСТУ 4344:2004. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови. [Чинний від 2005-10-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 31 с. (Національний стандарт України). URL : (https://ugmk.ua/dbs.8.files/gosts/d4344-20041_305.pdf).
2. Узлов И. Г., Сухомлин Г. Д., Узлов К. И., Кныш А. В. Оптимизация параметров отпуска цельнокатаных железнодорожных колес повышенной прочности и износостойкости на основании электронномикроскопического анализа. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. ИЧМ НАНУ. Днепропетровск : ВИЗИОН, 2006. Вып. 13. С. 143–148. URL : (<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/21681/17-Uzlov.pdf?sequence=1>).
3. Узлов И. Г., Узлов К. И., Кныш А. В., Хулин А. Н. Исследование механических характеристик локомотивных бандажей из микролегированной углеродистой стали повышенной твердости и износостойкости. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2008. Вып. 45, ч. 1. С. 164–169. URL : (file:///C:/Users/%D0%BE%D0%BA3/Downloads/smmit_2008_47_119.pdf).
4. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (EN 13674-1:2011, NEQ). [Дата введения 2014-07-01]. Москва : Стандартинформ, 2014. 96 с. (Национальный стандарт Российской Федерации). URL : (<http://gostexpert.ru/data/files/51685-2013/68407.pdf>).
5. Railway applications – Track – Rail – Part 1 : Vignole railway rails 46 kg/m and above : EN 13674-1:2011 (E). - [With effect from 2011-08-01]. Brussels. : European Committee For Standardization, 2011. 108 p. (CEN National Members). URL : (<https://www.nfnorm.cz/en/ehn/1599>).

REFERENCES

1. DSTU 4344:2004. *Rejki zvyčajni dlja zaliznic' shirokoï kolïi. Zagal'ni tehnični umovi [Chinnij vid 2005-10-01]*. [DSTU 4344: 2004. Rails are common for wide gauge railways. General technical conditions [Valid from 2005-10-01]. Kyiv : Derzhspozhivstandart Ukrainy, 2005, 31 p. (Nacional'nyj standart Ukraini). URL : (https://ugmk.ua/dbs.8.files/gosts/d4344-20041_305.pdf). (in Ukrainian).
2. Uzlov I.G., Suhomlin G.D., Uzlov K.I. and Knysh A.V. *Optimizacija parametrov otpuska cel'nokatanyh zheleznodorozhnyh koles povyshennoj prochnosti i iznosostojkosti na osnovanii jelektronnomikroskopicheskogo analiza* [Optimization of the tempering parameters of solid-rolled railway wheels of increased strength and wear resistance on the basis of electron microscopic analysis]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoï metallurgii : sb. nauchn. tr. IChM NANU* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy : sat. scientific. tr. HMI NANU]. Dnipropetrovsk : VIZION, 2006, no. 13, pp. 143–148. URL : (<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/21681/17-Uzlov.pdf?sequence=1>). (in Russian).
3. Uzlov I.G., Uzlov K.I., Knysh A.V. and Hulin A.N. *Issledovanie mehanicheskikh harakteristik lokomotivnyh bandazhej iz mikrolegirovannoj uglerodistoj stali povyshennoj tvjordosti i iznosostojkosti* [Investigation of the mechanical characteristics of locomotive tires made of microalloyed carbon steel with increased hardness and wear resistance]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. 2008, no. 45, part 1, pp. 164–169. URL : (file:///C:/Users/%D0%BE%D0%BA3/Downloads/smmit_2008_47_119.pdf). (in Russian).
4. GOST R 51685–2013. *Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshhie tehničeskie uslovija (EN 13674-1:2011, NEQ. [Data vvedeniya 2014-07-01]* [GOST R 51685–2013 Railway rails. General Specification (EN 13674-1: 2011, NEQ). [Date of introduction 2014-07-01]. Moscow : Standartinform, 2014, 96 p. (Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii). URL : (<http://gostexpert.ru/data/files/51685-2013/68407.pdf>). (in Russian).
5. Railway applications – Track – Rail – Part 1 : Vignole railway rails 46 kg/m and above : EN 13674-1:2011 (E). [With effect from 2011-08-01]. Brussels : European Committee For Standardization, 2011, 108 p. (CEN National Members). URL : (<https://www.nfnorm.cz/en/ehn/1599>).

Поступила в редакцию: 14.10.2020.