

УДК 620.181.414

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРЫ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ КОМПЛЕКСНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

ОЛЕЙНИК Я. В.¹
ЕВСЮКОВ М. Ф.^{2*}, к.т.н., с.н.с.,
ЧМЕЛЕВА В. С.^{3*}, к.т.н., доц.,
ДЕМЕНТЬЕВА Ж. А.^{4*}, н.с.

¹Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: varoslav_olivnyk@ukrpost.net, ORCID ID: 0000-0003-2594-0616

^{2*}Отдел термической обработки металла для машиностроения (ОТОМ), Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. академика Стародубова, 1, 49050, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: office@isi.gov.ua

^{3*}Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

^{4*}Отдел термической обработки металла для машиностроения (ОТОМ), Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. академика Стародубова, 1, 49050, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: office@isi.gov.ua

Аннотация. *Цель.* Среднеуглеродистые стали, легированные молибденом и хромом широко используются в машиностроении. Хромомолибденовые стали имеют высокие гарантированные механические свойства прочности, пластичности и вязкости и достаточно высокую прокаливаемость. Однако, систематические результаты по кинетике превращения аустенита в процессе большого интервала скоростей охлаждения отсутствуют. Отсутствуют данные и о дополнительном влиянии никеля и марганца на кинетику бейнитного превращения в таких сталях. В связи с этим, выполнена работа по изучению кинетики превращения аустенита в большом интервале скоростей охлаждения проката стали 23MnNiMoCr5-4, легированной молибденом, никелем и хромом, с целью изучения кинетики образования игольчатых структур (бейнита) в большом интервале скоростей охлаждения. *Методика.* Исследование проводилось на прокате диаметром 24 мм, произведенном согласно DIN 17115 на предприятии TRINECKÉ ŽELEZÁRNY (Чехия). Кинетика превращения аустенита после отдельного нагрева в большом интервале скоростей охлаждения изучалась на dilatометрах АД-80 и МД-83 конструкции ИЧМ. Из проката в горячекатаном состоянии изготавливали dilatометрические образцы диаметром 3, 4 мм. Нагрев образцов в dilatометре осуществляли до 900 °С с последующей выдержкой в течение 5 мин. После этого образцы охлаждали по программе, в печах с различной тепловой инерцией, на воздухе, под вентилятором, и в масле. *Результаты.* Установлено, что повышенное содержание молибдена до 0,55% в среднеуглеродистой стали способствует образованию бейнитной структуры в большом интервале скоростей охлаждения, что позволяет использовать ее для изготовления деталей в машиностроительной, металлургической, транспортной и строительной областях с высоким комплексом механических и эксплуатационных свойств. *Научная новизна.* Исследована кинетика фазовых превращений в стали 23MnNiMoCr5-4, широко используемой в европейской промышленной практике и имеющей перспективу промышленного применения на машиностроительных предприятиях Украины. *Практическая значимость.* Данное исследование может быть востребованным для машиностроительных предприятий Украины, в частности при производстве горно-шахтного оборудования, с целью широкого применения комплекснолегированной стали 23MnNiMoCr5-4 вместо существующих аналогов.

Ключевые слова: термическая обработка; фазовые превращения; легированные стали

КИНЕТИКА ФОРМУВАННЯ БЕЙНИТНОЇ СТРУКТУРИ В НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВІЙ КОМПЛЕКСНОЛЕГОВАНИЙ СТАЛІ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ

ОЛІЙНИК Я. В.¹
ЄВСЮКОВ М. Ф.^{2*}, к.т.н., с.н.с.,
ЧМЕЛЬОВА В. С.^{3*}, к.т.н., доц.
ДЕМЕНТЬЄВА Ж. А.^{4*}, н.с.

¹Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: varoslav_olivnyk@ukrpost.net, ORCID ID: 0000-0003-2594-0616

²*Відділ термічної обробки металу для машинобудування (ВТОМ), Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49050, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: office@isi.gov.ua

³*Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

⁴*Відділ термічної обробки металу для машинобудування (ВТОМ), Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49050, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 776-53-15, e-mail: office@isi.gov.ua

Анотація. Мета. Середньовуглецеві сталі, леговані молібденом і хромом широко використовуються в машинобудуванні. Хромомолібденові сталі мають високі гарантовані механічні властивості міцності, пластичності і в'язкості і досить високу прогартованість. Однак, систематичні результати з кінетики перетворення аустеніту в процесі великого інтервалу швидкостей охолодження відсутні. Відсутні дані і про додатковий вплив нікелю і марганцю на кінетику бейнітного перетворення в таких сталях. У зв'язку з цим, виконана робота з вивчення кінетики перетворення аустеніту у великому інтервалі швидкостей охолодження прокату сталі 23MnNiMoCr5-4, легованої молібденом, нікелем і хромом, з метою вивчення кінетики утворення голчастих структур (бейніту) у великому інтервалі швидкостей охолодження. **Методика.** Дослідження проводилося на прокаті діаметром 24 мм, виробленим згідно DIN 17115 на підприємстві TRINECKÉ ŽELEZÁRNÝ (Чехія). Кінетика перетворення аустеніту після окремого нагріву у великому інтервалі швидкостей охолодження вивчалася на дилатометрах АД-80 та МД-83 конструкції ІЧМ. З прокату в гарячекатаному стані виготовлялися дилатометричні зразки діаметром 3, 4 мм. Нагрівання зразків у дилатометрі здійснювали до 900 °С з подальшою витримкою протягом 5 хв. Після цього зразки охолоджували за програмою, в печах з різною тепловою інерцією, на повітрі, під вентилятором, і в маслі. **Результати.** Встановлено, що підвищений вміст молібдену до 0,55% в середньовуглецевій сталі сприяє утворенню бейнітної структури у великому інтервалі швидкостей охолодження, що дозволяє використовувати її для виготовлення деталей в машинобудівній, металургійній, транспортній та будівельній галузях з високим комплексом механічних та експлуатаційних властивостей. **Наукова новизна.** Досліджено кінетику фазових перетворень в сталі 23MnNiMoCr5-4, яка широко використовується в європейській промисловій практиці і має перспективу промислового застосування на машинобудівних підприємствах України. **Практична значимість.** Дане дослідження може бути затребуваним для машинобудівних підприємств України, зокрема при виробництві гірничо-шахтного устаткування, з метою широкого застосування комплекснолегованої сталі 23MnNiMoCr5-4 замість існуючих аналогів.

Ключові слова: термічна обробка; фазові перетворення; леговані сталі

THE KINETICS OF BAINITE STRUCTURE FORMATION IN LOW-CARBON COMPLEX-ALLOYED STEEL DURING A COOLING PROCESS

OLIVNYK I. V.¹

EVSYUKOV M. F.^{2*}, *Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer*

CHMELEVA V. S.^{3*}, *Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

DEMENT'EVA ZH. A.^{4*}, *Research Officer*

¹Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin ave., 4, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: varoslav_olivnyk@ukrpost.net, ORCID ID: 0000-0003-2594-0616

²*Department of metal heat treatment for mechanical engineering, Institute of Steel and Iron NAS Ukraine, sq. academician Starodubov, 1, Dnipropetrovsk, 49050, Ukraine, tel. +38 (056) 776-53-15, e-mail: office@isi.gov.ua

³*Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin ave., 4, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

⁴*Department of metal heat treatment for mechanical engineering, Institute of Steel and Iron NAS Ukraine, sq. academician Starodubov, 1, Dnipropetrovsk, 49050, Ukraine, tel. +38 (056) 776-53-15, e-mail: office@isi.gov.ua

Abstract. Purpose. Medium-carbon steel, alloyed with molybdenum and chromium are widely used in engineering. Chromium-molybdenum steel guaranteed with high mechanical properties of strength, ductility and toughness and very high hardenability. However, the results of systematic transformation kinetics of austenite in the large range of cooling rates are not available. Also is not available information about an additional impact of nickel and manganese on the bainite transformation kinetics in such steels. That's why, was done the work to study the kinetics of austenite transformation in a large range of cooling rates in rolled steel 23MnNiMoCr5-4, alloyed with molybdenum, nickel and chromium and to study the kinetics of acicular structures (bainite) formation in a large range of cooling rates. **Methodology.** The research was conducted on 24 mm diameter rod, produced according to DIN 17115 at the company TRINECKÉ ŽELEZÁRNÝ (Czech Republic). Kinetics of austenite transformation after heating in a separate large range of cooling rates was studied with a dilatometer AD-80 and MD-83, designed by ISI. Were produced hot-rod samples with a diameters from 3 to 4 mm. Heating the samples in the dilatometer was performed to 900 °C, with the following staying during 5 min. Then samples were cooled under the program in furnaces with different thermal inertia, with air, under the fan, and with oil. **Findings.** Established that increased molybdenum content to 0.55% in medium-carbon steel promotes the bainite structure formation in a large range of cooling rates that allows it to manufacture parts in machinery, metallurgy, transportation and construction industries with high complex mechanical and performance properties. **Originality.** Studied the kinetics of phase transformations in steel 23MnNiMoCr5-4, widely used in European industrial practice and which is having the prospect of industrial use in machine-building enterprises of Ukraine.

Practical value. This research can be applied to engineering enterprises of Ukraine, including the production of mining equipment, with the aim of applying complex-alloyed 23MnNiMoCr5-4 steel instead of existing analogs.

Keywords: heat treatment; phase transformations; alloyed steel

Состояние вопроса

Для изготовления высокопрочных сварных цепей в мировой практике используют стали, содержащие Cr, Mn, Ni, Mo, B, Si в различных сочетаниях. Изучение влияния легирующих элементов на структуру и свойства цепей изучено в работах [8], [9].

Кинетика распада аустенита в сталях, содержащих Mn, Cr, Ni, Mo изучена недостаточно. Одна из работ на эту тему [4] изучает кинетику превращения аустенита низкоуглеродистой стали Св-08ГНМ для изготовления сварочной проволоки.

Среднеуглеродистые стали, легированные молибденом и хромом, такие как 38ХМ, выпускаемые по ГОСТ 4543-88, широко используются в машиностроении. Хромомолибденовые стали имеют высокие гарантированные механические свойства прочности, пластичности и вязкости и достаточно высокую прокаливаемость [5]. Однако, систематические результаты по кинетике превращения аустенита в интервале различных скоростей охлаждения отсутствуют. В работе [2], в которой результаты исследования стали 35ХМ представлены в виде термокинетической диаграммы, построенной после отдельного нагрева до 860 °С, не оговорены технология выплавки, отсутствуют сведения о неконтролируемых примесях с одной стороны, а с другой стороны не приводится методика построения диаграмм. Отсутствует также подробное описание морфологии продуктов распада и их твердость. Это не позволяет использовать имеющиеся справочные данные [1] для описания кинетики распада и морфологии продуктов превращения в качественных молибден и хром содержащих среднеуглеродистых сталях. Отсутствуют данные и о дополнительном влиянии никеля и марганца на кинетику бейнитного превращения в данной стали.

Цель работы

В связи с этим, выполнена работа по изучению кинетики превращения аустенита в большом интервале скоростей охлаждения проката стали 23MnNiMoCr5-4, легированной молибденом, никелем и хромом, с целью изучения кинетики образования игольчатых структур бейнита в большом интервале скоростей охлаждения. Данная марка стали применяется при производстве высокопрочных сварных цепей для горного оборудования. Так, в диссертационной работе на соискание ученой степени PhD. была проведена работа по изучению микроструктуры и механических свойств стали 23MnNiMoCr5-4 при производстве высокопрочных круглозвенных сварных цепей [12]. Схожие исследовательские работы также были представлены в источниках [11], [13]. В низкоуглеродистых сталях

молибден относится к элементам резко повышающим устойчивость аустенита в процессе распада по диффузионной кинетике, сдвигая распад аустенита вправо в область существенно меньших скоростей охлаждения. При этом область распада аустенита по промежуточной кинетике с образованием бейнита по сравнению с углеродистой сталью практически не изменяется. Это обусловлено тем, что бейнитное превращение не сопровождается перераспределением легирующих элементов. Происходит перераспределение только углерода и поэтому влияние легирующих элементов на скорость бейнитного превращения невелико [6, с. 356-357]. При этом молибден способствует образованию бейнита зернистого строения [7]. Другие легирующие элементы, такие как никель и марганец, повышают устойчивость аустенита, сдвигая его распад в интервал более низких температур. Ферритообразующий элемент, такой как хром, наоборот повышает температуру распада аустенита в интервал более высоких температур. В результате этого температурный интервал распада аустенита по диффузионной кинетике отделен температурной областью от температурного интервала распада аустенита по смешанной кинетике. Такое влияние легирующих элементов установлено в ранее выполненной работе [3]. В соответствии с целью работы показано, что область распада аустенита по диффузионной кинетике на феррит и перлит смещена в область распада только при малых скоростях охлаждения и отделена от температурной области распада аустенита на бейнит. При этом температурно-временной интервал распада аустенита по промежуточной кинетике, по сравнению с углеродистой сталью, в большом интервале скоростей охлаждения изменился мало.

Материал и методика исследования

Исследование проводилось на прокате диаметром 24 мм, плавка Т18808, выпущенном по DIN 17115 производителем – TRINECKÉ ŽELEZÁRNY (Чехия), следующего химического состава: 0,23%С, 0,14%Si, 1,23%Mn, 0,012%P, 0,008%S, 0,52%Cr, 0,98%Ni, 0,545%Mo, 0,004%V, 0,0012%Ti, 0,0004В, 0,003%Nb, 0,25%Al, 0,04%Cu.

Кинетика превращения аустенита после отдельного нагрева в большом интервале скоростей охлаждения изучалась на дилатометрах АД-80 и МД-83 конструкции Института черной металлургии. Нагрев образцов в дилатометре осуществляли до 900 °С с последующей выдержкой в течение 5 мин.

Строение продуктов распада изучали на дилатометрических образцах после различных скоростей охлаждения микроструктурным методом на микроскопе Неофот-2 после травления 4% ниталем.

Объемное содержание структурных составляющих в дилатометрических образцах определяли расчетным методом по дилатограммам, записанным при различных скоростях охлаждения. Контроль микроструктуры проката проводили по ГОСТ 8233-56.

Результаты исследования кинетики фазовых превращений аустенита стали 23MnNiMoCr5-4 после различных скоростей охлаждения и микроструктурных исследований обобщены и представлены в виде термокинетической диаграммы (рис.1).

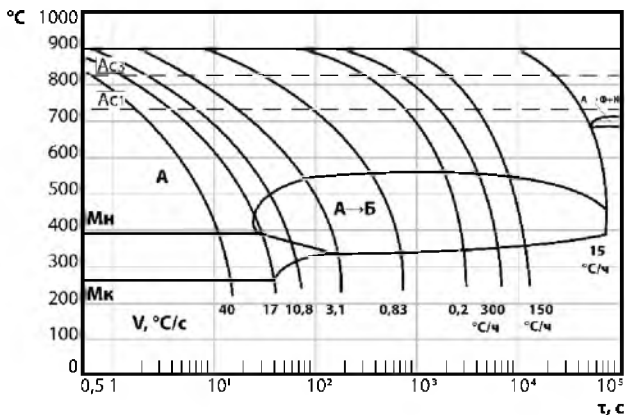


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма стали 23MnNiMoCr5-4 /

Thermokinetic chart of steel 23MnNiMoCr5-4

Результаты исследования

Исследования исходного металла в поперечном сечении проката показали, что микроструктура горячекатаного металла состоит, в основном, из бейнита и небольшого количества мартенсита. Бейнит присутствует, в основном, в виде пакетов различной формы и размеров. Кроме этого, в отдельных местах наблюдаются участки зернистого бейнита. Подробнее морфология образования бейнита в сталях описана в работе [10]. Мартенситные участки после травления 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте протравливаются очень слабо и видны как светлые участки, в основном, в ликвационных областях, обогащенных легирующими элементами.

Критические точки исследованной стали 23MnNiMoCr5-4 с 0,23%С, определенные на образцах диаметром 4 мм при нагреве со скоростью 400 °С/ч, как среднее значение двух измерений равны: Ас1 – 735 °С и Ас3 – 825 °С. При этом, образование аустенита в процессе равномерного нагрева протекает с различной скоростью. Так, при нагреве от 735 до 775 °С превращение протекает равномерно и образуется только 65% аустенита. При дальнейшем нагреве до 800 °С скорость образования аустенита уменьшается. В этом случае общее содержание аустенита составляет 90%. При дальнейшем нагреве до 825 °С последние 8-10% остаточного аустенита наблюдаются в виде отдельных изолированных зерен, резко

уменьшается протяженность межфазных границ, скорость распада уменьшается до нуля. Различная скорость превращения исходной структуры (аустенита) свидетельствует о наличии как структурной (перлит и феррит), так и о химической неоднородности (ликвация металлургического происхождения) металла проката.

Анализ термокинетической диаграммы и микроструктурные исследования образцов после различных скоростей охлаждения показали следующие результаты. При максимально исследованной скорости охлаждения, равной 40 °С/с, переохлажденный аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. Температура начала мартенситного превращения Мн равна 390 °С, конец распада аустенита Мк зафиксирован при температуре 260 °С. При уменьшении скорости охлаждения до 17 °С/с переохлажденный аустенит начинает распадаться при температуре 445 °С с образованием бейнита (рис. 2). Однако при дальнейшем охлаждении ниже 390 °С переохлажденный аустенит продолжает распадаться по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. При температуре 260 °С распад аустенита на мартенсит заканчивается.

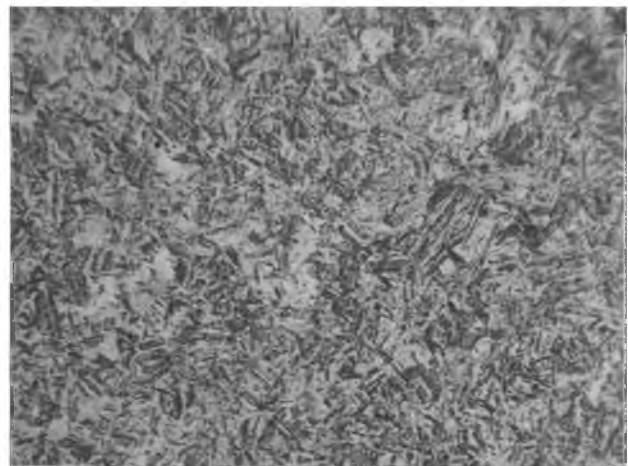


Рис. 2. Микроструктура стали 23MnNiMoCr5-4 после нагрева 900 °С и охлаждения со скоростью 17 °С/с, x400 /

Microstructure of the steel 23MnNiMoCr5-4 after heating 900 °С and cooling with rate 17 °С/с, x400

При дальнейшем понижении скорости охлаждения до 10,8 °С/с устойчивость аустенита понижается. В этом случае температура начала бейнитного превращения повышается до 500 °С. Бейнит имеет пакетное строение с разной степенью травимости, что обусловлено химической неоднородностью металла. При температуре 370 °С и ниже остаточный аустенит продолжает распадаться по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. При этом, температура конца распада аустенита на мартенсит при дальнейшем охлаждении повышается до 315 °С. Дальнейшее понижение скорости охлаждения до 3,1

$^{\circ}\text{C}/\text{с}$ приводит к дальнейшему повышению температурного интервала неоднозначно. При указанном понижении скорости охлаждения, температура начала распада аустенита повышается значительно и равна 550°C . При этом конец распада аустенита повышается только на 15°C и равен 330°C .

Однако, при дальнейшем понижении скорости охлаждения до $0,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температурный интервал распада аустенита практически не изменяется. Так, при скорости охлаждения $0,83^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температурный интервал распада аустенита практически не изменился и равен $560\text{-}340^{\circ}\text{C}$. При скорости охлаждения $0,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$ бейнитное превращение также начинается при температуре 560°C . Конец распада аустенита повысился на 10°C и равен 350°C . Микроструктура стали такая же как и после охлаждения со скоростью $10,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (рис. 3).

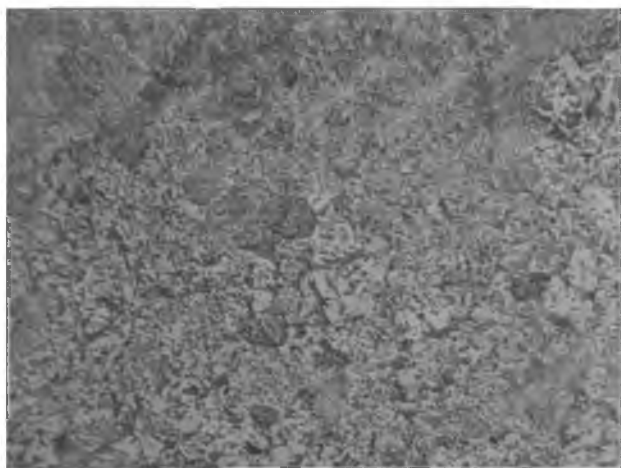


Рис. 3. Микроструктура стали 23MnNiMoCr5-4 после нагрева 900°C и охлаждения со скоростью $0,2^{\circ}\text{C}/\text{с}$, $\times 400$ /

Microstructure of the steel 23MnNiMoCr5-4 after heating 900°C and cooling with rate $0,2^{\circ}\text{C}/\text{sec}$, $\times 400$

При скорости охлаждения $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ($300^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) температурный интервал распада аустенита не изменяется и равен $560\text{-}350^{\circ}\text{C}$. С дальнейшим понижением скорости охлаждения до $0,04^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ($150^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) температура начала распада переохлажденного аустенита понижается до 550°C , а температура конца распада аустенита наоборот повысилась на 10°C и равна 360°C . Это, по нашему мнению, обусловлено ростом величины зерна и перераспределением легирующих элементов и примесей между зерном и границами и дефектами кристаллического строения аустенита. Это подтверждают дальнейшие микроструктурные исследования. Структура образца состоит из бейнитных участков со слабо выраженным пакетным строением и зернистым строением бейнита (рис. 4).

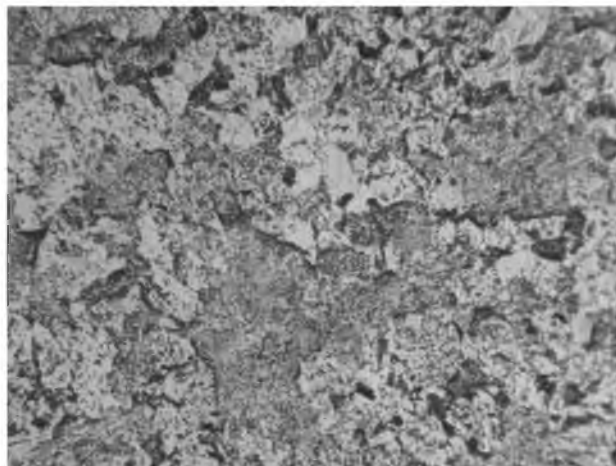


Рис. 4. Микроструктура стали 23MnNiMoCr5-4 после нагрева 900°C и охлаждения со скоростью $150^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, $\times 400$ /

Microstructure of the steel 23MnNiMoCr5-4 after heating 900°C and cooling with rate $150^{\circ}\text{C}/\text{hour}$, $\times 400$

Возможность распада переохлажденного аустенита по диффузионной кинетике с образованием феррита и перлита оценивали в изотермических условиях при температуре 700°C , соответствующей температуре минимальной устойчивости для сталей с аналогичным легированием. Начало распада аустенита обнаружено после выдержки в течение 18000 с (5 часов). С увеличением выдержки до 24 часов распад аустенита протекает с очень малой скоростью и не до конца. Так как устойчивость аустенита при непрерывном охлаждении, по сравнению с изотермической выдержкой, по данным А. П. Гуляева [6] в $1,5$ раза выше, то можно ожидать, что распад аустенита по диффузионной кинетике с образованием феррита и перлита в интервале $710\text{-}680^{\circ}\text{C}$ будет наблюдаться только при скорости охлаждения $15^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. При этом при дальнейшем охлаждении распад остаточного аустенита на бейнит наблюдается в интервале температур $470\text{-}390^{\circ}\text{C}$.

Микроструктурные исследования охлажденных образцов показали, что структура образца состоит из полиэдрического феррита, сорбитообразного перлита в виде отдельных зерен и небольшого ($10\text{-}15\%$) количества бейнита. Это свидетельствует о том, что в процессе выдержки при 700°C переохлажденный аустенит очень устойчив и в процессе выдержки в течение 24 часов распадается, в основном, по диффузионной кинетике на феррит и перлит. Остаточный аустенит распадается только в процессе последующего охлаждения в интервале температур $470\text{-}390^{\circ}\text{C}$ с образованием промежуточной структуры – бейнита. Это свидетельствует о том, что при скоростях охлаждения ниже $17^{\circ}\text{C}/\text{с}$ переохлажденный аустенит в исследуемой стали распадается, в основном, на структуру промежуточного типа – бейнит. Феррит и перлит в структуре не наблюдаются. При этом в процессе изотермической выдержки

происходит обезуглероживание поверхностного слоя проката.

Выводы

Исследован прокат диаметром 24 мм, плавка T18808, выпущенный по DIN 17115 производителем – TRINECKÉ ŽELEZÁRNY (Чехия), следующего химического состава: 0,23%С, 0,14%Si, 1,23%Mn, 0,012%P, 0,008%S, 0,52%Cr, 0,98%Ni, 0,545%Mo, 0,004%V, 0,0012%Ti, 0,0004B, 0,003%Nb, 0,25%Al, 0,04%Cu.

Микроструктура исходного горячекатаного металла проката диаметром 24 мм состоит, в основном, из бейнита и небольшого количества мартенсита. Бейнит присутствует в основном в виде пакетов различной формы и размеров. Кроме этого в отдельных местах наблюдается участки зернистого бейнита. Мартенситные участки после травления 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте протравливаются очень слабо и видны как светлые участки, в основном, в ликвационных участках обогащенных легирующими элементами.

Критические точки исследованной стали 23MnNiMoCr5-4 с 0,23%С, определенные на образцах диаметром 4 мм при нагреве со скоростью 400 °С/ч, как среднее значение двух измерений равны: Ас1 – 735 °С и Ас3 – 825-830 °С.

Кинетика фазовых превращений изучалась после отдельного нагрева 900 °С – 5 мин в интервале скоростей охлаждения от 40 °С/с до 150 °С/ч и в изотермических условиях при 700 °С с выдержкой в течение 24 часов. Результаты исследований обобщены и представлены в виде термокинетической диаграммы распада аустенита при непрерывном превращении для стали 23MnNiMoCr5-4.

Анализ термокинетической диаграммы и микроструктурные исследования образцов при максимально исследованной скорости охлаждения, равной 40 °С/с, переохлажденный аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. Температура начала мартенситного превращения равна 390 °С, конец распада аустенита зафиксирован при температуре 260 °С.

При уменьшении скорости охлаждения до 17 °С/с переохлажденный аустенит начинает распадаться при температуре 440 °С с образованием бейнита. Однако при дальнейшем охлаждении ниже 390 °С переохлажденный аустенит продолжает распадаться по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. При температуре 260 °С распад аустенита на мартенсит заканчивается.

При дальнейшем понижении скорости охлаждения до 10,8 °С/с степень распада аустенита на бейнит резко повышается. В этом случае температура начала бейнитного превращения повышается до 500 °С. При температуре 370 °С и ниже остаточный аустенит распадается на мартенсит. Температура конца распада аустенита при дальнейшем охлаждении повышается до 315 °С.

Дальнейшее понижение скорости охлаждения до 3,1 °С/с приводит к дальнейшему расширению температурного интервала распада переохлажденного аустенита неоднозначно. Температура начала распада аустенита повышается значительно и равна 550 °С. Конец распада аустенита повышается только на 15 °С и равен 330 °С.

Однако, при дальнейшем понижении скорости охлаждения до 0,2 °С/с температурный интервал распада аустенита практически не изменяется. Так при скорости охлаждения 0,83 °С/с температурный интервал распада аустенита не изменяется и равен 560-340 °С. При скорости охлаждения 0,2 °С/с бейнитное превращение также начинается при температуре 560 °С. Конец распада аустенита повысился на 10 °С и равен 350 °С.

При скорости охлаждения 0,08 °С/с (300 °С/ч) температурный интервал распада аустенита не изменился и равен 560-350 °С/с. С дальнейшим понижением скорости охлаждения до 0,04 °С/с (150 °С/ч) температура начала распада переохлажденного аустенита понижается до 550 °С, а температура конца распада аустенита наоборот повысилась на 10 °С и равна 360 °С.

В изотермических условиях при температуре 700 °С распад переохлажденного аустенита по диффузионной кинетике начинается после выдержки 18000 с (5 часов). Можно ожидать, что распад аустенита при непрерывном охлаждении в интервале температур распада аустенита по диффузионной кинетике в этом случае будет наблюдаться только через 27000 с (7,5 часов). В процессе дальнейшей выдержки до 24 часов в структуре сохраняется 5-10% остаточного аустенита. В этом случае распад аустенита по диффузионной кинетике с образованием феррита и перлита в интервале 710-680 °С будет наблюдаться только при скорости охлаждения 15 °С/ч. При этом при дальнейшем охлаждении распад остаточного аустенита на бейнит наблюдается в интервале температур 470-390 °С.

Это свидетельствует о том, что при всех реально возможных скоростях охлаждения (до 150 °С/ч) переохлажденный аустенит в исследуемой стали распадается в основном на структуру промежуточного типа – бейнит. Феррит и перлит в структуре наблюдаются только при скоростях охлаждения 15 °С/ч и ниже, которые практически не реализуются в процессе производства проката.

Исследованная сталь относится к группе сталей бейнитного класса с большой прокаливаемостью и высоким комплексом механических свойств в больших сечениях даже при охлаждении на воздухе.

Заключение

Таким образом, повышенное содержание молибдена до 0,55% в среднеуглеродистой стали способствует образованию бейнитной структуры в большом интервале скоростей охлаждения, что

позволяет использовать ее для изготовления деталей в машиностроительной, металлургической, транспортной и строительной областях с высоким

комплексом механических и эксплуатационных свойств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Попова, Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: справочник термиста / Л. Е. Попова, А. А. Попов. – Москва: Металлургия, 1991. – 196 с.

Popova L. E., Popov A. A. Diagrammy prevrashcheniya austenita v stalyakh i beta-rastvora v splavakh titana: spravochnik termista [Diagrams of austenite transformation in steels and beta titanium alloys in solution: a handbook of thermistor]. Moscow, Metallurgy Publ., 1991. – 196 p.

2. Попов, А. А. Изотермические и термокINETические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А. А. Попов, А. Е. Попова. – Москва-Свердловск: Mashgiz, 1961.

Popov A. A., Popova A. E. Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereokhlazhdenogo austenita [Isothermal and Thermokinetic charts of supercooled austenite dissolution]. Moscow-Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961.

3. Евсюков, М. Ф. Кинетика бейнитного превращения в среднеуглеродистой стали, легированной молибденом / М. Ф. Евсюков, И. А. Кривошеева // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов. ИЧМ НАН Украины. К.: Наукова Думка, 2009. – Вып. 20, 265 с.

Evsyukov M. F., Krivosheeva I. A. Kinetika beynitnogo prevrashcheniya v sredneuglerodistoy stali, legirovannoy molibdenom [The kinetics of bainite transformation in medium carbon steel, alloyed with molybdenum] // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific works. Institute of Steel and Iron NAS Ukraine. Kyiv: Scientific Idea Publ., 2009. Vol. 20, 265 p.

4. Парусов, В. В. Кинетика фазовых превращений в катанке из непрерывнолитой электростали Св-08ГНМ при непрерывном охлаждении / В. В. Парусов, И. Н. Чуйко, М. Ф. Евсюков, А. Б. Сычков, А. И. Сивак // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов. ИЧМ НАН Украины. К.: Наукова Думка, 2007. – Вып. 14, 228 с.

Parusov V. V., Chuyko I. N., Evsyukov M. F., Sychkov A. B., Sivak A. I. Kinetika fazovykh prevrashcheniy v katanke iz nepreryvno litoy elektrostali Sv-08GNM pri nepreryvnom okhlazhdenii [The kinetics of phase transformations in wire rod from continuously-cast electrosteel Sv-08GNM continuously cooled] // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific works. Institute of Steel and Iron NAS Ukraine. Kyiv: Scientific Idea Publ., 2007. Vol. 14, 228 p.

5. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали. Справочник для конструкторов / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – Москва-Свердловск: Mashgiz, 1962. – 82 с.

Zhuravlev V. N., Nikolaeva O. I. Mashinostroitel'nye stali. Spravochnik dlya konstruktorov [Machine steel. A Handbook for Designers]. Moscow-Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1962. 82 p.

6. Гуляев, А. П. Металловедение, 5-е издание / А. П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1977. – 350-351 с.

Gulyaev A. P. Metallovedenie, 5-e izdanie [Metallography, 5th Edition]. Moscow: Metallurgy Publ., 1977. 350-351 p.

7. Металлография железа. Том 2: структура сталей (с атласом микрофотографий) / под ред. Ф. Н. Тавадзе. – М: Металлургия, 1972.

Metallografiya zheleza. Tom 2: struktura staley (s atlasom mikrofoto grafiy) [Metallography of iron. Volume 2: steel structure (with atlas of micrographs)]. Edited by Tavazde F. N. Moscow: Metallurgy Publ., 1972.

8. Поисковые работы по созданию круглозвенных сварных цепей класса «100». Отчет о НИР по теме № 67.07.26/053 / ВНИИПТУГЛЕМАШ. М., 1968.

Poiskovyte raboty po sozdaniyu kruglozvennykh svarnykh tsepey klassa «100». Otchet o NIR po teme № 67.07.26/053 [Exploration works on the creation of round welded chains class "100". Research report № 67.07.26/053]. Moscow: VNIPTUGLEMASH Publ., 1968.

9. Разработка оптимальных температурных режимов прокатки и охлаждения проката из легированных марок стали на стане 250/150 и последующей калибровки его без предварительного отжига с целью расширения сортамента и объемов производства на комбинате «Криворожсталь». Отчет о НИР. ИЧМ им. З. И. Некрасова НАН Украины. Днепропетровск, 2002.

Razrabotka optimal'nykh temperaturnykh rezhimov prokatki i okhlazhdeniya prokata iz legirovannykh marok stali na stane 250/150 i posleduyushchey kalibrovki ego bez predvaritel'nogo otzhiga s tsel'yu rasshireniya sortamenta i ob'emov proizvodstva na kombinatе «Krivorozhstal'». Otchet o NIR. [Development of optimal temperature conditions of rolling and cooling rolled alloyed steel on rolling 250/150 and its subsequent calibration without annealing in order to expand the assortment and production at the plant "Krivorozhstal'"]. Dnepropetrovsk, Institute of Steel and Iron NAS Ukraine, 2002.

10. Bhadeshia J. W. Bainite in Steel HKDH. Christian Metall. Trans Actions. – V.21A, 1990.

11. FENG Xiu-min, WANG Bao-qi, GU Nan-ju, MA Xiao-li. Effect of Moderate Temperature Deformation on Microstructure of Link Chain Steel 23MnNiCrMo54. JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, Year 2005, Issue 3, Page 42-46.

http://caod.oriprobe.com/articles/8919493/Effect_of_Moderate_Temperature_Deformation_on_Microstructure_of_Link_C.htm

12. FengXiuMin. Study on Microstructure and Mechanical Properties of the 23MnNiCrMo54 Link-Chain Steel. PhD dissertation. Hebei University of Technology, 2004, Beichen.

<http://www.dissertationtopic.net/doc/1230727>

13. Henryk Kania, Piotr Liberski. The Structure and Growth Kinetics of Zinc Coatings on Link Chains Produced of the 23MnNiCrMo5-2 Steel. Solid State Phenomena (Volume 212), Technologies and Properties of Modern Utility Materials XXI, December 2013, Page 145-150.

<http://www.scientific.net/SSP.212.145>

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром.техн.наук, проф. С. И. Губенко (Украина);

д-ром.техн.наук, проф. Г. В. Левченко (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015