

УДК 620.178.7

**М.К. Скаков<sup>1</sup>, Г.К. Уазырханова<sup>1</sup>, Н.А. Попова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, email: [GUazyrkhanova@mail.ru](mailto:GUazyrkhanova@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

### **Перераспределение атомов углерода в поверхностных слоях стали 30ХГСА в результате горячей деформации**

Методами электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализа изучен характер перераспределения атомов углерода, на разных уровнях поверхностных слоев деформированного валка стана горячего проката, выполненного из стали 30ХГСА. Показано, что после деформации прокатом стали 30ХГСА на поверхностных слоях валка наблюдаются карбидные превращения и перераспределение углерода, т.е. атомы углерода из  $\alpha$ - и  $\gamma$ -твердых растворов уходят на образование частиц карбидной фазы и на дефекты кристаллического строения. Определено, что на расстоянии 2 мм от поверхности валка атомы углерода находятся в двух различных состояниях: на дефектах кристаллической решетки и в карбидных частицах, расположенных внутри, на границах и в стыках фрагментов, причем половина углерода находится на дефектах кристаллической решетки. Показано, что на расстоянии 0.5 мм от поверхности валка углерод перераспределен между позициями углерода в карбидных частицах, расположенных на границах и в стыках фрагментов, и позициями углерода в карбидных частицах, расположенных внутри фрагментов. Выявлено, что атомы углерода уходят с дефектов кристаллического строения. По мере приближения к поверхности валка интенсивность перераспределения карбидов все более усиливаются. Установлено, что на поверхности валка углерод полностью находится в частицах специальных карбидов, расположенных на границах и в стыках фрагментов и на дефектах кристаллической решетки углерод отсутствует. Таким образом, (в приповерхностной области валка) в слое 0-0.5 мм образование карбидных частиц происходит за счет углерода, находящегося на дефектах кристаллической решетки.

*Ключевые слова:* деформация, перераспределение атомов углерода, карбидная фаза, фрагментированная субструктура

#### **Введение**

Как известно [1-3], атомы углерода из  $\alpha$ - и  $\gamma$ -твердых растворов стали при термомеханической обработке интенсивно диффундируют на стоки, где преимущественно образуются карбидные частицы. В стали 30ХГСА после термообработки [4] в  $\alpha$ -твердом растворе содержание углерода не превышает 0.005 вес.%, в остаточном аустените оказывается равной 0.015 вес.%, в карбидах сосредоточено ~0.14 вес.% углерода, и почти половина углерода находится на дефектах кристаллического строения. Однако, до сих пор полностью не изучены процессы перераспределения атомов углерода, в частности и карбидные превращения в ходе горячей деформации, в целом. Атомы углерода из разрушенных деформацией карбидных частиц должны перейти в другие фазовые состояния [5].

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является изучение характера распределения атомов углерода на разных уровнях поверхностных слоев деформированного валка стана горячего проката, выполненного из стали 30ХГСА.

#### **Материал и методы исследования**

В качестве материала исследования использовали сталь 30ХГСА в горяче деформированном состоянии. Химический состав стали: 0,3 % С; 0,8-1,1% Cr; 0,8-1,1 % Mn; 0,8-1,1 % Si; 0,025 % P; 0,025 % S; остальное железо по ГОСТу 4543-71. Деформация

образцов осуществлялась горячей прокаткой со скоростью 4 м/с в промышленных условиях на прокатном стане 2000. Структурные исследования образцов стали проводили в НИИ нанотехнологий и новых материалов ВКГТУ им Д. Серикбаева и в научных лабораториях Томского Государственного архитектурно-строительного университета (Россия) методами оптической микроскопии на НЕОРНОТ – 21, электронной дифракционной микроскопии на тонких фольгах на электронном микроскопе JEOL-2100 и рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре X'Pert PRO.

### Результаты и их обсуждения

Результаты исследований свидетельствует о том, что перераспределение атомов углерода в исследуемой стали после деформации прокатом может протекать по следующим позициям. Во-первых, происходит интенсивный уход атомов углерода из  $\alpha$ -твердого раствора. Напомним, что концентрация углерода в  $\alpha$ -твердом растворе определяется по величине параметра кристаллической решетки. Параметр кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы на расстоянии 2 мм от поверхности валка оказался равным параметру кристаллической решетки чистого  $\alpha$ -Fe. Известно [2], что действие температуры приводит к быстрому уменьшению параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -твердого раствора. Деформация горячим прокатом, которая применялась в настоящей работе, приводит не только к повышению степени деформации, но и воздействию температуры. Снижение параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -твердого раствора свидетельствует о том, что атомы углерода, являющиеся атомами внедрения, уходят из  $\alpha$ -твердого раствора. А так как доля  $\alpha$ -фазы при всех исследованных в работе расстояниях до поверхности валка остается практически постоянной (изменяется в пределах 93-97%), то и уменьшение количества углерода в  $\alpha$ -твердом растворе связано исключительно с уменьшением концентрации углерода в самом  $\alpha$ -твердом растворе.

Во-вторых, вследствие интенсивного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, проходящего под действием деформации прокатом, атомы углерода уходят и из  $\gamma$ -твердого раствора.

В-третьих, освободившийся углерод идет на образование частиц карбидной фазы и на дефекты кристаллического строения, а именно, в вакансии, в ядра дислокаций, создавая структуры в виде атмосфер Коттрелла вокруг дислокаций и на границы фрагментов [6]. О количественном определении атомов углерода в твердом растворе, на дефектах кристаллической решетки и в карбидных частицах мы сообщали ранее [4].

Результаты исследований показали, что на расстоянии 2 мм от поверхности валка атомы углерода находятся на дефектах кристаллической решетки и в карбидных частицах, расположенных внутри, на границах и в стыках фрагментов. Распределение углерода по местам его локализации в деформированной прокатом стали 30ХГСА по мере удаления от поверхности валка представлено на рис.1. Из рисунка видно, что почти половина углерода находится на дефектах кристаллической решетки. При этом следует отметить, что объемная доля специальных карбидов, расположенных в стыках фрагментов выше, чем на границах (кривые 6 и 7 на рис.2 в).

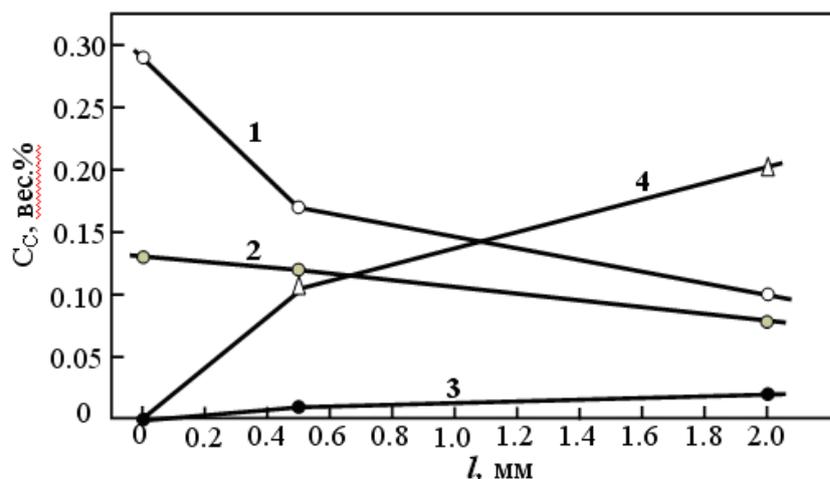


Рисунок 1. Распределение углерода в деформированной прокатом стали 30ХГСА по мере удаления от поверхности валка по местам его локализации: в карбидах, расположенных 1 – на границах фрагментов; 2 – в стыках фрагментов; 3 – внутри фрагментов; 4 – на дефектах кристаллического строения

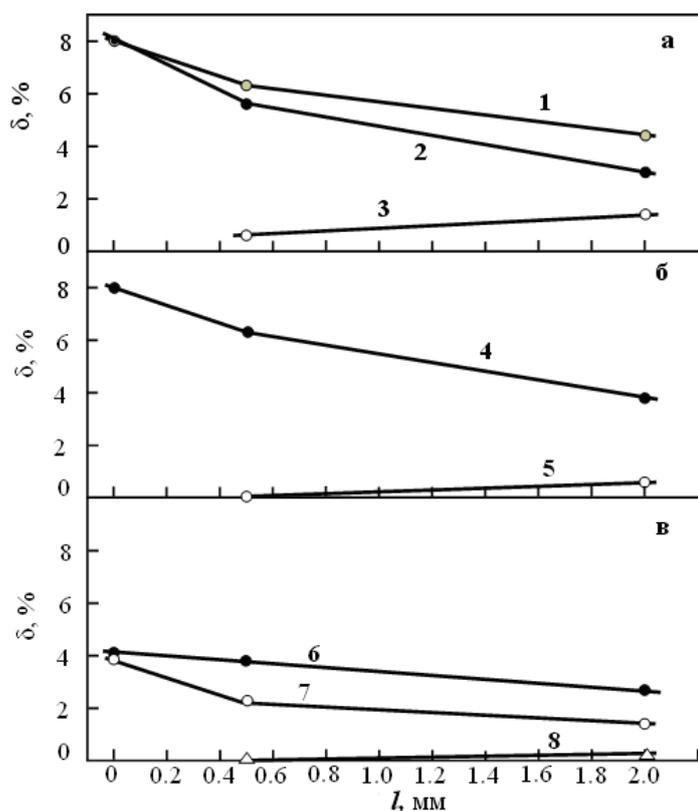


Рисунок 2. Изменение объемной доли карбидных фаз в деформированной прокатом стали 30ХГСА по мере удаления от поверхности валка: а – суммарная объемная доля карбидных фаз в материале (1); в изотропных (2) и анизотропных (3) фрагментах; б – объемная доля специальных карбидов (4) и цементита (5); в – объемная доля специальных карбидов, расположенных в стыках (6), на границах (7) и внутри (8) изотропных фрагментов

Как известно, при расчетах содержания углерода в карбидах важно знать не только объемную долю карбидной фазы, но и её стехиометрию. Методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии с использованием микродифракционных картин и темнопольных изображений было получено (Рис.3), что на границах фрагментов выделяются, в основном, карбиды типа  $M_2C$ , а в стыках –  $M_6C$ -типа.

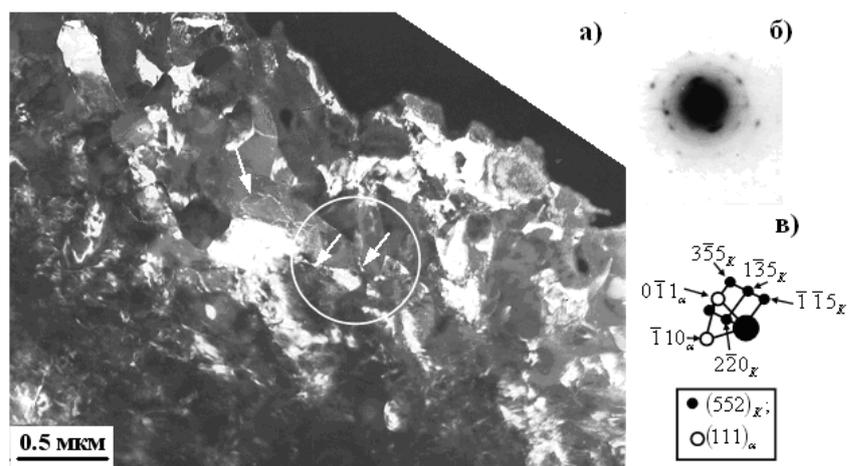


Рисунок 3. Темнопольные изображения (а) фрагментированной субструктуры в деформированной прокатом стали 30XГСА на расстоянии 2мм от поверхности валка (стрелками указаны частицы карбидов  $M_2C$ , расположенные на границах и в стыках фрагментов). Микродифракционная картина (б), полученная с участка на (а), отмеченного белой окружностью, и её индцированная схема (в)

Таким образом, видно, что на границах фрагментов и в их стыках находятся карбиды разной стехиометрии. Поэтому в карбидах  $M_2C$  (на границах фрагментов) углерода оказывается больше, чем в карбидах  $M_6C$  (в стыках фрагментов).

По мере приближения к поверхности валка происходит растворение частиц цементита (см. рис.2 б, кривая 5) и дальнейшее выделение частиц специальных карбидов на границах и в стыках фрагментов (см. рис.2 б, кривая 4). Поэтому количество углерода в карбидных частицах внутри фрагментов уменьшается (рис.2 в, кривая 8), а на границах и в стыках – увеличивается (рис.2 в, кривые 7 и 6). Количество углерода в цементите уменьшается (рис.4 б, кривые 4 и 5), что свидетельствует об уходе атомов углерода из частиц цементита, т.е. растворение цементита происходит более интенсивно, чем образование специальных карбидов на границах и в стыках фрагментов. Суммарное количество углерода, сосредоточенного в специальных карбидах, расположенных на границах и в стыках фрагментов возрастает (рис.4 а, кривые 1 и 2), что свидетельствует о том, что образование частиц на границах фрагментов, происходит более интенсивнее, чем их растворение внутри кристаллов  $\alpha$ -фазы.

Здесь необходимо отметить, что, по-видимому, растворение частиц специальных карбидов, расположенных внутри кристаллов  $\alpha$ -фазы, не происходит. По мере приближения к поверхности валка происходит интенсивное формирование изотропных дислокационных фрагментов. Вновь образованные границы фрагментов содержат частицы специальных карбидов. Чем более развита фрагментация, т.е. чем больше образовано границ фрагментов, тем больше оказывается карбидов на их границах и тем меньше внутри. Это хорошо подтверждают данные объемных долей специальных карбидов, представленные на рис.2 в. Данные о размерах карбидных частиц, расположенных внутри и на границах фрагментов и кристаллов  $\alpha$ -фазы, также подтверждают предположение – размеры частиц внутри структурных составляющих всегда меньше. Вместе с тем, известно [5], что размеры карбидных частиц, находящихся внутри субструктурных образований (фрагментов), всегда меньше, чем размеры частиц, находящихся на их границах. Отсюда следует, что атомы углерода не уходят из частиц специальных карбидов, расположенных внутри структурных составляющих  $\alpha$ -фазы, а оказываются в карбидных частицах, локализованных теперь в других местах – на границах фрагментов.

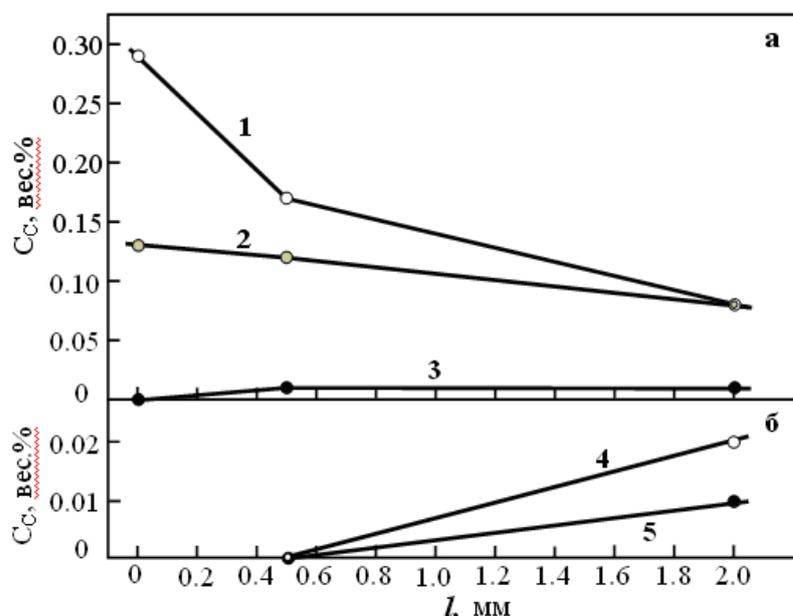


Рисунок 4. Распределение углерода в деформированной прокатом стали 30ХГСА по мере удаления от поверхности валка: а – в карбидах специального типа (1 – на границах, 2 – в стыках, 3 – внутри фрагментов); б – в цементите (4 – на границах, 5 – внутри фрагментов)

Таким образом, при приближении к поверхности валка до 0.5 мм полностью растворяются только частицы цементита. Освобожденный при этом углерод частично диффундирует к дефектам кристаллической решетки, и частично идет на образование карбидов специального типа. Это приведет к изменению стехиометрического состава карбидной фазы, а именно:  $Fe_3C$  (цементит)  $\rightarrow M_2C + M_6C$  (специальные карбиды). На рисунке 5 показаны примеры наблюдения карбидов типа  $M_6C$ .

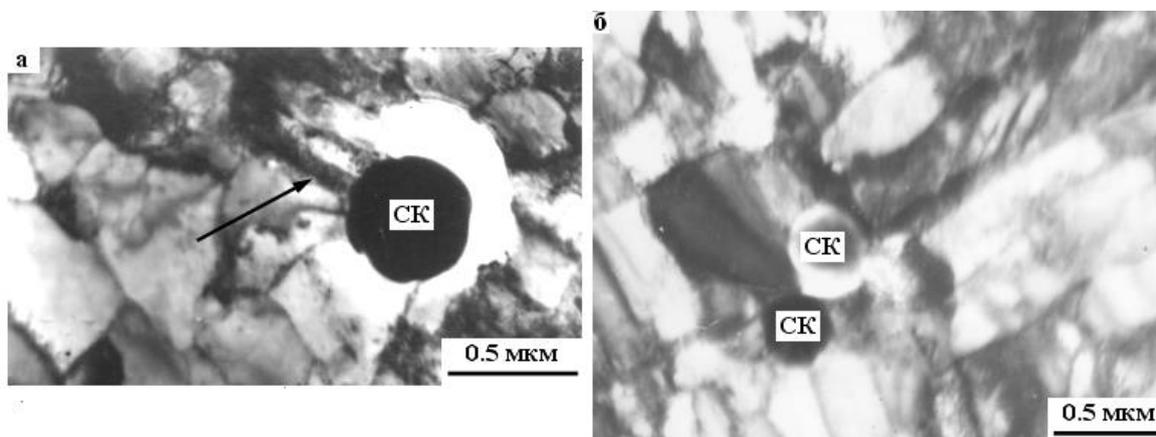


Рисунок 5. Фрагментированная структура (а,б) стали 30ХГСА после деформации прокатом (0.5 мм от поверхности валка). СК – частицы специального карбида  $M_6C$

Из сопоставления графиков на рис.2 б-в с графиками на рис.3 видно, что горячая деформация прокатом привела к растворению цементита, т.е. к уменьшению его на величину  $\sim 0.6\%$ . При этом концентрация освободившегося углерода составила величину  $\sim 0.04$  вес.%. На образование специальных карбидов идет существенно большее количество углерода. Недостающая часть углерода для образования карбидов поступает с дефектов кристаллической решетки. Т.е. проведенный ранее теоретический расчет [2], показавший,

что для образования более стойких специальных карбидов (изменение стехиометрического состава карбидов) требуется большее количество углерода, подтвержден здесь экспериментально.

Следует подчеркнуть, что уход углерода из карбидных частиц происходит вследствие разрезания и растворения частиц. Основываясь на данных [5,6], можно предположить, что разрезание частиц происходит путем движения дислокаций, а растворение – путем захвата атомов углерода ядрами решеточных дислокаций и переноса их на большие расстояния.

Рассмотрим распределение атомов углерода на поверхности валка. По мере приближения к поверхности валка интенсивность перераспределения карбидов все более усиливается. Ранее мы отмечали [7], что на поверхности валка дислокационная структура полностью фрагментирована, причем в структуре присутствуют только изотропные фрагменты, средний размер которых составляет 220 нм. На границах фрагментов и в их стыках присутствуют только карбиды специального типа ( $M_2C$  – на границах и  $M_6C$  – в стыках). На рисунке 6 показаны примеры наблюдения карбидов типа  $M_2C$ . Средние размеры карбидных частиц  $M_2C$  – 55 нм,  $M_6C$  – 70 нм. Объемные доли карбидов на границах и в стыках фрагментов практически одинаковы (см. рис.2). Это означает, что весь углерод находится в карбидных частицах, на дефектах кристаллической решетки углерод отсутствует. Таким образом, (в приповерхностной области валка) в слое 0-0.5 мм образование карбидных частиц происходит за счет углерода, находящегося на дефектах кристаллической решетки.

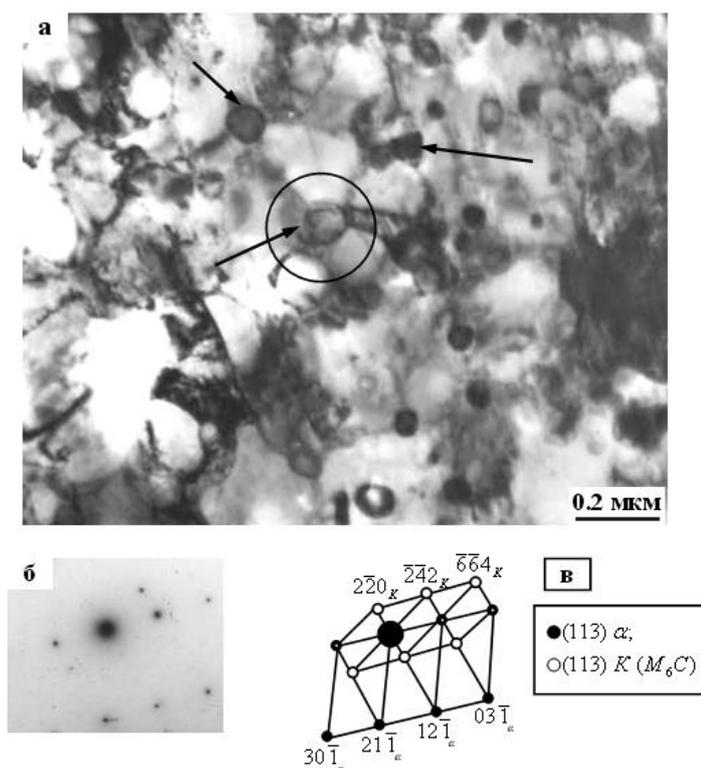


Рисунок 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 30ХГСА, сформированной на поверхности валка после деформации прокатом. В стыках фрагментов (на (а) отмечены стрелками) находятся третичные карбиды типа  $M_6C$ :  
а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина, полученная с участка, отмеченного на (а) окружностью; в – индцированная схема.

### **Заключение**

Таким образом, на основании анализа полученных результатов исследования характера распределения атомов углерода на разных уровнях поверхностных слоев горяче деформированного валка стали 30ХГСА можно сделать следующие выводы:

- установлено, что на расстоянии 2 мм от поверхности валка атомы углерода находятся в двух различных состояниях: на дефектах кристаллической решетки и в карбидных частицах, расположенных внутри, на границах и в стыках фрагментов, причем половина углерода находится на дефектах кристаллической решетки;

- показано, что на расстоянии 0.5 мм от поверхности валка в результате деформации происходит перераспределение углерода, во-первых, между цементитом и специальными карбидами, во-вторых, между позициями углерода в карбидных частицах, расположенных на границах и в стыках фрагментов, и позициями углерода в карбидных частицах, расположенных внутри фрагментов. В-третьих, происходит растворение цементита и, в-четвертых, уход углерода с дефектов кристаллического строения;

- определено, что по мере приближения к поверхности валка интенсивность перераспределения карбидов все более усиливаются и на поверхности валка углерод полностью находится в частицах специальных карбидов, расположенных на границах и в стыках фрагментов.

*Настоящая работа выполнена на основании Договора о сотрудничестве между Восточно-Казахстанским Государственным Техническим университетом им Д. Серикбаева, и Томским Государственным архитектурно-строительным университетом от 2009 года и при финансовой поддержке АО "НАТР" РК, договор №475/189-209-11.*

### **References**

1. Zheng H., Ye X.N., Li J.D., Jiang L.Z., Liu Z.Y., Wang G.D., Wang B.S. Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of hot-rolled low carbon 12 Cr-Ni stainless steel // Materials Science and Engineering A. – 2010. –№8 (527).- P. 7407-7412.
2. Kozlov E.V., Popova N.A., Kabanina O.V. Evolyuciya fazovogo sostava, defektnoi struktury, vnutrennih napryazhenii i pereraspredelenie ugleroda pri otpuske litoi konstrukcionnoi stali. – Novokuzneck: Izdatelstvo SibGIU, 2007. – 177s.
3. Y. Nechaev. The distribution of carbon in steels // Physics-Uspekhi.- 2011.-№5 (54). - P.456-471.
4. Skakov M.K., Kozlov E.V., Scheffler M., Uazyrkhanova G.K. Vliyanie termicheskoi obrabotki i deformacii na dislokacionnuyu strukturu stali 30 CrMnSiA // Vestnik KazNTU im. K. Satpaeva -2012.-№2 (90). -S. 91-98.
5. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N. Vliyanie tipa substruktury na pereraspredelenie ugleroda v stali martensitnogo klassa v hode plasticheskoi deformacii // Izvestiya vuzov. Fizika. – 2002. - №3. – S.72-86.
6. Baharev O.G., Gavrilyuk V.G., Nadutov B.M. Raspredelenie atomov ugleroda pri deformacii i posleduyushem nagreve Fe - C martensita // FMM. - 1990. - №11. - S.196-198.
7. Skakov M.K., Uazyrkhanova G.K., Popova N.A., Scheffler M. Influence of Heat Treatment and Deformation on the Phase-Structural State of Steel 30CrMnSiA // Key Engineering Materials. – 2013. -(531-532). - P. 13-17.

## **30 ХГСА БОЛАТЫН ЫСТЫҚ ДЕФОРМАЦИЯЛАУ НӘТИЖЕСІНДЕ БЕТТІК ҚАБАТТАРЫНДАҒЫ КӨМІРТЕГІ АТОМДАРЫНЫҢ ТАРАЛУЫ**

М.К. Скаков, Г.К. Уазырханова, Н.А. Попова

Электронды-микроскопиялық зерттеу әдісі көмегімен 30ХГСА болатынан жасалған ыстық прокаттау станының деформацияланған валының беттік қабатындағы (беті және бетінен 0,5 мм, 2 мм қашықтықтығы қабаты) көміртегі атомдарының таралу сипаты зерттелген. Прокатпен деформацияланған 30ХГСА болатының беттік қабаттарында карбидтік ауысулар және көміртегі атомдарының таралуы байқалатыны көрсетілген. Көміртегі атомдары  $\alpha$ - және  $\gamma$  қатты ерітінділерінен карбид фазаларының бөлшектерінің пайда болуына жұмсалады және кристалдық тор ақауларына өтеді. Валдың бетінен 2 мм қашықтықтағы көміртегі атомдары екі түрлі күйде, яғни кристалдық тор ақаулары мен фрагменттердің шекарасы мен тораптарында орналасқан арнайы карбид бөлшектерінде және көміртегінің жартысы кристалдық тор ақауларында орналасқаны көрсетілген. Валдың бетінен 0,5 мм қашықтықта көміртегі атомдары фрагменттердің шекарасы мен тораптарында орналасқан арнайы карбид бөлшектері мен фрагменттердің ішінде орналасқан карбид бөлшектері арасында бөлініп таралған. Валдың бетіне жақындаған сайын көміртегі атомдарының таралуы үдей түседі. Валдың беткі қабатындағы көміртегі атомдары фрагменттердің шекарасы мен тораптарында орналасқан арнайы карбид бөлшектерінде орналасқаны көрсетілген және кристалдық тордың ақауларында көміртегі атомдары кездеспейді. Осыдан 0-0.5 мм қабатында кристалдық тордың ақауларынан кеткен көміртегі атомдары карбид бөлшектерінің пайда болуына жұмсалады.

*Түйін сөздер:* деформациялау, көміртегі атомдарының таралуы, карбидтік фаза, фрагменттелген сұбқұрылым

## **REDISTRIBUTION CARBON ATOMS IN THE SURFACE LAYERS OF 30CrMnSiA STEEL AFTER HOT DEFORMATION**

Skakov M.K., Uazyrkhanova G.K., Popova N.A

By electron microscopic analysis investigated character of distribution carbon atoms on different levels of 30CrMnSi steel surface layers (on surface, and at distance of 0.5 mm and 2 mm from surface) after deformation. 30CrMnSiA steel used as material of the rolling mill. It is shown that after rolling deformation of 30CrMnSi steel on the roll surface layers carbide transformations and carbon redistributions are observed. The carbon atoms from  $\alpha$  and  $\gamma$  solid solutions go to formation of carbide phase particles and defects of crystal structure. Determined, that at distance of 2 mm from the roll surface carbon atoms in two different states: on defects of crystal lattice and carbide particles, which are located inside on boundaries and joints of fragments. Half of carbon is located on lattice defects. It is shown that at distance of 0.5 mm from roller surface between positions redistributed of carbon in carbide particles are located at boundaries and fragments joints. Also, between positions of carbon in the carbide particles are positioned inside fragments. Carbon atoms leave the crystal defects. As it approaches roll surface redistribution intensity of carbides ever more amplified. Established, that on roll surface carbon is entirely located in particles of special carbides, which are arranged at fragments boundaries and junctions and on lattice defects carbon absent. Thus (in the near-surface region of roll) in layer formation 0-0.5 mm carbide particles occurs due to carbon situated at lattice defects.

*Keywords:* deformation, carbon atoms redistribution, carbide phase, fragmented substructure.