



УДК 669.14.018.255

Влияние избыточных карбидов на прочность горячекатанных валков из стали типа быстрорежущей

М. Эрман, Ж.-П. Брайер,
Ж. Леконт-Бекер

Льежский университет, фирма
“Марешаль Кетен”, Льеж, Бельгия

Для получения надежного валка с высокими эксплуатационными показателями необходимо не только предложить новый химический состав материала и режимы термической обработки, но и установить все параметры процесса изготовления валка, в особенностях определяющие область сопряжения между материалами рабочей поверхности и сердцевины.

На основании информации об эффективности работы валков горячей прокатки из принципиально новой стали на японских станах фирма “Марешаль Кетен” с 1992 г. начала разработку валков из высоколегированной стали типа быстрорежущей. К концу 90-х годов после многочисленных лабораторных испытаний и промышленного опробования различных составов в качестве стандартной была утверждена сталь под названием “Космос”. Для 30 станов горячей прокатки было поставлено более 600 валков, характеризующихся хорошими производственными показателями и надежностью в эксплуатации.

Главная особенность быстрорежущих сталей — наличие очень твердых эвтектических карбидов разных типов, природа, форма, размер и распределение которых определяются как сочетанием легирующих элементов, так и скоростью затвердевания.

В стали “Космос” присутствуют эвтектические карбиды MC , M_2C , M_7C_3 . Большое число очень твердых карбидов MC существенно улучшает износостойкость стали, но при чрезмерном их количестве возможны возрастание коэффициента трения и даже биение валка. Твердые карбиды M_2C также относятся к высокоизносостойким. Однако в основном при хлопьеобразной морфологии выделения карбида материал становится чрезвычайно хрупким, и аварийная безопасность стана резко ухудшается. Карбид M_7C_3 вследствие высокого содержания хрома может оказывать благотворное воздействие на стойкость валка против окисления. Однако следует иметь в виду, что этот карбид заметно мягче, чем карбиды MC и M_2C .

Изготовители валков из общепринятой стали улучшают эксплуатационные свойства своих изделий, как правило, путем применения более современного процесса изготовления или использования другого хими-

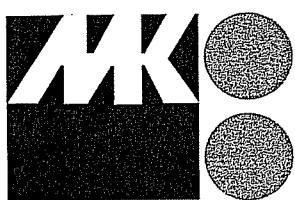
ческого состава. Именно такое положение возникло с двухслойными центробежнолитыми валками, впервые появившимися в США в 1940-х годах и все еще используемыми в качестве рабочего валка в последних чистовых клетях станов горячей прокатки и на толстолистовых станах в принципе с одним и тем же химическим составом. Тем не менее за истекший период отмечены два коренных изменения: большинство этих валков теперь производится центробежным способом вместо традиционного литья или литья через систему шиберного затвора; сегодня многие предприятия используют микролегированную сталь (называемую также улучшенной), содержащую чрезвычайно малое количество твердых карбидов MC .

Аналогично фирма “Марешаль Кетен”, не изменяя технологию изготовления, с целью улучшения эксплуатационных свойств около четырех лет назад выпустила на рынок с усовершенствованной сталью “Аврора”; в настоящее время эксплуатируется на различных станах горячей прокатки около 40 валков.

В данной статье рассматривается подбор легирующих элементов в новой стали и проводится сопоставление metallургических параметров сталей “Аврора” и “Космос”.

Многие быстрорежущие стали классифицируются по вольфрамовому эквиваленту ($W_{экв}$), рассчитываемому как сумма $W + 2Mo$. Это означает, что два атома вольфрама оказывают такое же воздействие на материал, как и один атом молибдена. В ряде публикаций [1 – 3] отмечается, что в сталях с одинаковым вольфрамовым эквивалентом, но с различным содержанием молибдена и вольфрама высокое содержание молибдена уменьшает общее количество эвтектических карбидов, тем самым увеличивая содержание легирующих элементов в металлической матрице, и, кроме того, способствует образованию первичных карбидов MC .

При одинаковом содержании углерода и ванадия в сталь “Аврора” введено меньше хрома, чем в сталь “Космос”, с целью уменьшения содержания карбида хрома M_7C_3 , а показатели как вольфрамового эквивалента, так и соотношения $Mo/(Mo + W)$ у нее выше:



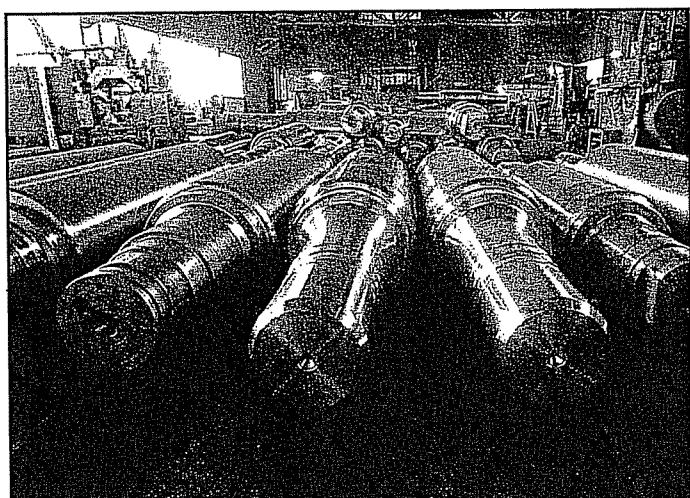
MARICHAL KETIN

Ваш выбор в пользу качества

Марешаль Кетен (Бельгия) - признанный изготовитель валков для предприятий Западной Европы

Рабочие валки массой до 40 т

толстолистовых
и широкополосных станов
горячей прокатки



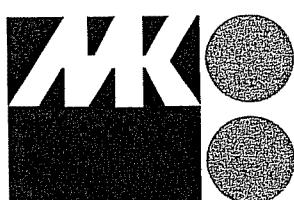
Материал поставляемых валков

чугун ICDP - для последних клетей чистовой группы

высокохромистый литой чугун - для первых клетей чистовой группы

высокохромистая литая сталь - для черновых клетей

быстрорежущая сталь валков нового поколения для станов горячей прокатки



MARICHAL KETIN

S.A. DES FONDERIES
J. MARICHAL KETIN & CIE
Rue Ernest Solvay, 372
B-4000 Liège (Sclessin)
Belgium

Tel.: +32.4.234.72.06

Fax.: +32.4.234.72.51

E-mail: rolls@mkb.be

Internet: <http://www.mkb.be>

Представительство в СНГ Brightwell Engineering & Trading Ltd.
197136, Санкт-Петербург, ул. Ленина, д. 33, оф. 1
Тел./факс: +7 (812) 336 36 10, 336 36 09, 230 13 89
E-mail: brightwell@sovintel.ru

реклама

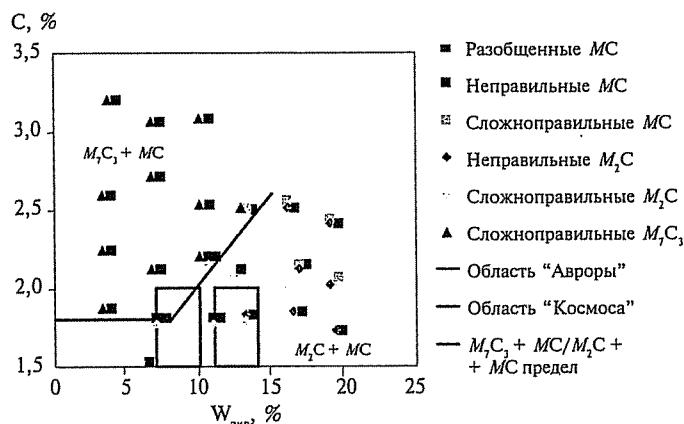


Рис. 1. Влияние содержания углерода и вольфрамового эквивалента на тип и морфологию эвтектических карбидов [4]

| Сталь | C | Cr | W _{экв} | Mo/(Mo + W) | V |
|----------|-----------|-----------|------------------|-------------|-----------|
| "Космос" | 1,5 – 2,0 | 5,0 – 7,0 | 7,0 – 10,0 | 0,6 – 0,7 | 4,0 – 6,0 |
| "Аврора" | 1,5 – 2,0 | 3,0 – 5,0 | 11,0 – 14,0 | 0,9 – 1,0 | 4,0 – 6,0 |

Из рис. 1 видно, что такое различие химического состава служит причиной смещения поля "Авроры" из области $M_7C_3 - MC$ в область $M_2C - MC$.

Валки из высоколегированной стали подвергаются термической обработке с целью получения твердости в диапазоне 78 – 83 по Шору (шкала C), которая обеспечивает наилучшее сочетание их износостойкости и эксплуатационной надежности валка.

Из-за высокой твердости аустенитно-мартенситной структуры требуемый уровень твердости стали "Космос" достигается лишь посредством отпуска. В стали "Аврора" благодаря более низкому содержанию хрома образуется более мягкая аустенитно-бейнитная структура, и для получения нужной твердости перед отпуском валки следует подвергать нормализации (аустенизации и охлаждению на воздухе).

Исследованы образцы, соответствующие рабочим валкам диам. 700 – 800 мм первых чистовых клетей стана горячей прокатки. Промышленные валки были изготовлены по технологии вертикального центробежного литья с вращением в вертикальной плоскости. Образцы отбирали от поверхности валка в состоянии поставки по разной глубине рабочего слоя и использовали их для изучения микроструктуры и испытания механических свойств. Комплексное исследование включало дифференциальный термический анализ с целью изучения последовательности затвердевания; сканирующую электронную микроскопию для определения химического состава карбидов и анализ изображений для определения объемной доли карбидов и размера зерна. Кроме того, проводили испытание на сжатие и твердость в горячем состоянии (красностойкость).

Дифференциальный термический анализ (DTA) обычно применяют для изучения последовательности затвердевания, и в особенности выпадения карбидов в осадок. При DTA образец нагревается (или охлаждается) согласно температурному графику, и

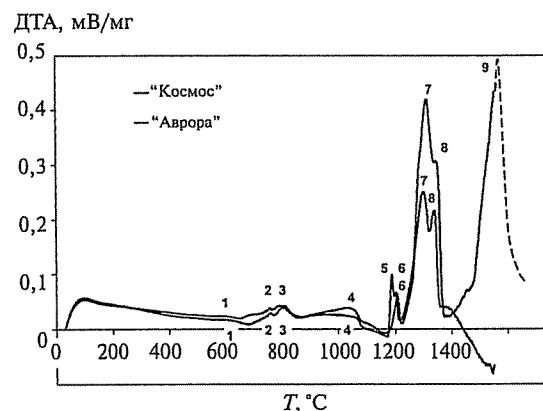


Рис. 2. Кривая ДТА в ходе нагрева образцов сталей "Космос" и "Аврора" (пояснения — в табл. 1)

любое преобразование эндотермического или экзотермического типа вызывает колебание температуры образца.

В ходе испытания одно преобразование фазы дает, как правило, один пик при данной температуре. Если при близкой температуре происходят два преобразования, то возникшие в результате два пика могут слиться, что затрудняет разделение преобразований. Наличие накладывающихся один на другой пиков часто наблюдается у высоколегированных сталей, в частности при расплавлении и растворении карбидов [5].

В настоящем исследовании образцы нагревали от комнатной температуры до 1620 °C со скоростью 5 °C/мин, близкой к скорости нагрева в промышленных условиях. Предельная температура нагрева ограничивалась возможностями прибора ДТА.

В ходе экспериментов на кривых ДТА наблюдались различные пики при высоких температурах (рис. 2, табл. 1). Любой пик, в том числе накладывающийся, соответствовал одному преобразованию.

В течение нагрева обнаружили обратное аустенитное преобразование (пики 1, 2 и 3), растворение карбидов $M_{23}C_6$, присутствующих в претерпевшей отпуск матрице (пик 4) и эвтектических карбидов (пики 5, 6 и 7), а, кроме того, либо растворение аустенитной матрицы (пик 8 для "Космоса"), либо обратное перитек-

Таблица 1. Температуры пиковых преобразований марок "Космос" и "Аврора" в ходе нагрева

| Пик | Сталь "Космос" | | Сталь "Аврора" | | |
|-----|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------|------------------------------------|
| | максимальная темпера- тура, °C | преобразование | максимальная темпера- тура, °C | преобразование | |
| 1 | 595 | Обратное аустенитное | 1 | 610 | Обратное аустенитное |
| 2 | 752 | преобразование | 2 | 755 | преобразование |
| 3 | 790 | | 3 | 805 | |
| 4 | 1029 | $\gamma + M_{23}C_6 \rightarrow L$ | 4 | 1027 | $\gamma + M_{23}C_6 \rightarrow L$ |
| 5 | 1186 | $\gamma + M_7C_3 \rightarrow L$ | 5 | — | — |
| 6 | 1201 | $\gamma + M_2C \rightarrow L$ | 6 | 1205 | $\gamma + M_2C \rightarrow L$ |
| 7 | 1298 | $\gamma + MC \rightarrow L$ | 7 | 1344 | $\gamma + MC \rightarrow L$ |
| 8 | 1338 | $\gamma \rightarrow L$ | 8 | 1311 | $\gamma \rightarrow \delta + L$ |
| — | — | — | 9 | > 1550 | $\delta \rightarrow L$ |

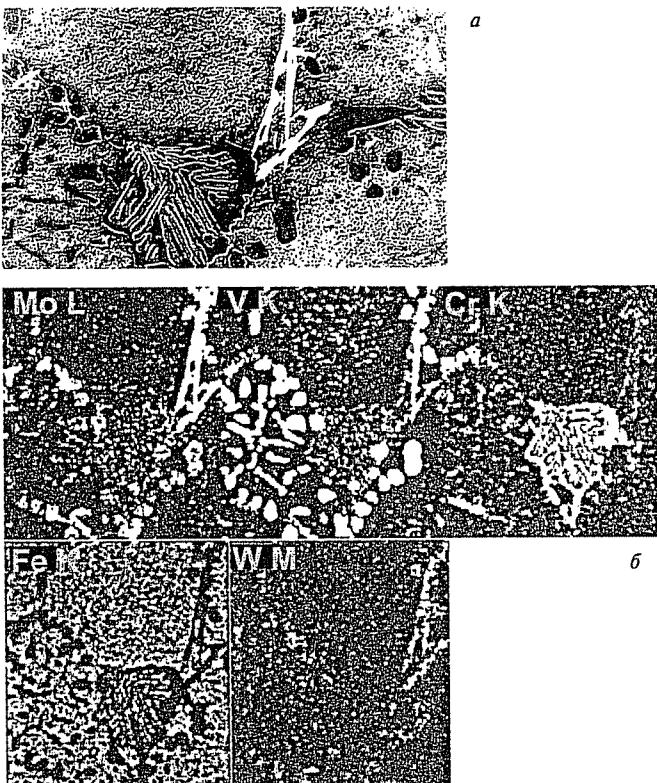


Рис. 3. Скопление карбидов MC (в черном цвете), M_2C (в белом) и M_7C_3 (в сером) в стали “Космос” и результаты исследования ЭДРАМ этого участка

тическое преобразование и непосредственное образование жидкости из “внутреннего” δ -феррита (пики 8 и 9 для “Авроры”). Пик 9 при заданной скорости нагрева не заканчивается при 1620°C — это требует дальнейшего исследования.

Из сравнения кривых нагрева следует, что в стали “Аврора” отсутствует эвтектический карбид M_7C_3 , возрастает максимальная температура пика растворения эвтектического карбида MC и возникает обратное перитектическое преобразование. Отсутствие карбида M_7C_3 может быть объяснено уменьшенным содержанием хрома — основного образующего этот карбид элемента. Обратное перитектическое преобразование происходит в течение нагрева начиная с твердой аустенитной фазы и приводит к появлению смеси твердого δ -феррита и остаточной жидкости. Наличие “внутреннего” δ -феррита в конце нагрева может быть объяснено воздействием стабилизирующих α -фазу элементов (Si, Mo, Cr).

Если говорить в общем, то при затвердевании можно наблюдать два типа δ -феррита: “внутренний”, который возникает в начале затвердевания и посредством перитектической реакции полностью преобразуется в аустенит ($L + \delta \rightarrow \gamma$), а также “остаточный”, сохраняющийся до комнатной температуры вследствие неполного перитектического преобразования. “Остаточный” δ -феррит может быть выявлен при нагреве в режиме ДТА как инверсия спада кривой ДТА в диапазоне от 1050 до 1300°C [1].

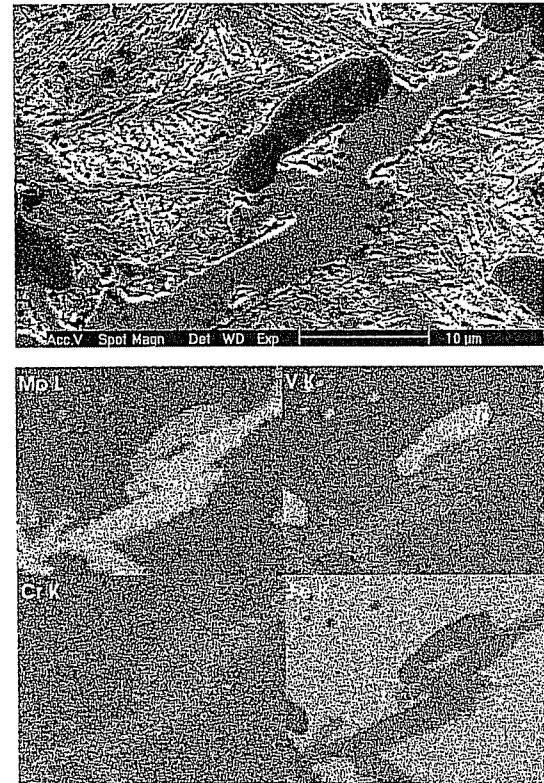


Рис. 4. Скопление карбидов MC (в черном цвете) и M_2C (в сером) в стали “Аврора” и результаты исследования ЭДРАМ этого участка

Таблица 2. Природа и морфология карбидов в сталях “Космос” и “Аврора”, выявленные с помощью сканирующего электронного микроскопа в настоящем исследовании (см. рис. 3 и 4), и по литературным данным [4] (см. рис. 1)

| Рис. 3 и 4 | Рис. 1 [4] |
|---|---|
| “Космос” (1,5 – 2,0 % C; 7 – 10 % $W_{\text{экв}}$) | “Космос” (1,5 – 2,0 % C; 7 – 10 % $W_{\text{экв}}$) |
| Разобщенные MC | Разобщенные MC |
| Неправильные M_2C | Сложнoprавильные MC |
| Сложнoprавильные M_2C_3 | Сложнoprавильные M_2C |
| “Аврора” (1,5 – 2,0 % C; 11 – 14 % $W_{\text{экв}}$) | “Аврора” (1,5 – 2,0 % C; 11 – 14 % $W_{\text{экв}}$) |
| Разобщенные MC | Разобщенные MC |
| Неправильные M_2C | Сложнoprавильные MC |
| | Неправильные M_2C |
| | Сложнoprавильные M_2C |

В стали “Аврора” содержится “внутренний” δ -феррит, но отсутствует “остаточный” δ -феррит: кривая нагрева не показывает соответствующей ему инверсии. Наличие “внутреннего” δ -феррита в стали “Аврора” является следствием более высокого содержания в ней молибдена. Это согласуется со сделанным в работе [3] выводом о том, что молибден относится к ферритостабилизирующими элементам. Следовательно, можно ожидать большего содержания карбидов в “Авроре” как следствие эвтектоидного разложения δ -феррита.

Микроструктура сталей “Космос” и “Аврора” состоит из матрицы, содержащей продукты разложения аустенита (отпущененный маргентит) с выделившимися

Таблица 3. Массовые доли элементов в карбидах в сталях "Космос" и "Аврора" по результатам ЭДРАМ

| Элемент. | "Космос" | | | "Аврора" | | | |
|----------------------|----------|------------------|-------------------------------|----------|------|------------------|---------|
| | MC | M ₂ C | M ₇ C ₃ | матрица | MC | M ₂ C | матрица |
| Mo (L) | 18 | 39 | 12 | 2 | 34 | 68 | 6 |
| V (K) | 52 | 12 | 9 | 2 | 58 | 14 | 1 |
| Cr (K) | 7 | 16 | 33 | 5 | 6 | 11 | 5 |
| Fe (K) | 4 | 8 | 39 | 85 | 2 | 7 | 84 |
| W (L) | 19 | 25 | 7 | 2 | — | — | — |
| Si (K) | — | — | — | 1 | — | — | 1 |
| Mn (K) | — | — | — | 1 | — | — | 1 |
| Ni (K) | — | — | — | 2 | — | — | 1 |
| W _{экв} * | — | — | — | 6 | — | — | 12 |
| Cr _{экв} ** | — | — | — | 8,5 | — | — | 12,5 |
| W _{экв} /Cr | 7,9 | 6,4 | — | — | 11,3 | 12,4 | — |

* W_{экв} = W + 2Mo.

** Cr_{экв} = Cr + 1,5Si + Mo.

ся глобулярными вторичными карбидами и эвтектическими карбидами, распределенными как в междендритной, так и в междуузельной области.

Как уже было отмечено, на природу и морфологию эвтектических карбидов оказывают влияние скорость затвердевания и химический состав. В обычных быстрорежущих сталях карбид MC образует в основном ванадий, карбид M₂C обогащен молибденом и вольфрамом и может содержать некоторое количество хрома, а карбиды M₇C₃ обогащены хромом.

Определение карбидов было выполнено с помощью электронного микроскопа в сочетании с энергодисперсным рентгеновским автоматизированным микроанализатором (ЭДРАМ) (рис. 3 и 4). В обеих сталях обнаружены карбиды трех типов: MC, M₂C, M₂₃C₆, в стали "Космос" — еще и карбид M₇C₃ (см. рис. 3 [6]). Карбиды MC, M₂C и M₇C₃ — эвтектические, выпадающие в осадок из жидкости. Карбиды M₂₃C₆ чрезвычайно мелкие вторичные, полностью рассеяны в матрице.

В обеих сталях эвтектические карбиды имеют одинаковую морфологию: разобщенные MC — идиоморфную в виде изолированных массивных кристаллов; а неправильные M₂C — пластинчатую морфологию в виде игольчатой формы (скопления пруткообразных частиц). Присутствующие в стали "Космос" карбиды M₇C₃ характеризуются сложной веерообразной формой и распределены в виде сплошной сетки.

В табл. 2 сопоставляются природа и морфология карбидов, полученных при исследовании сканирую-

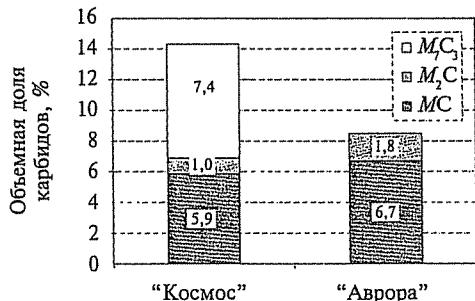


Рис. 5. Доля поверхности карбидов в радиальном направлении для сталей "Космос" и "Аврора"

HRA 30

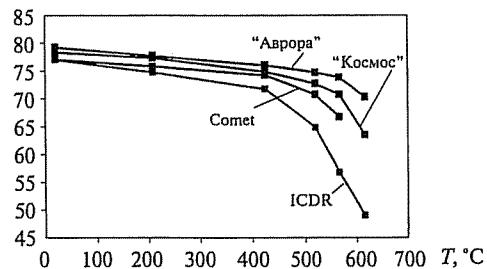


Рис. 6. Сравнение показателя твердости HRA 30 сталей в горячем состоянии

щим электронным микроскопом, а также приведенных на рис. 1 [4]. Разница в морфологии карбидов, выявленной в настоящей статье и по приведенным в работе [4] результатам, является следствием более низкого содержания ванадия в сталях "Космос" и "Аврора".

Результаты Zaf-определения количества карбидов MC, M₂C, M₇C₃ и матрицы по данным исследования посредством энергодисперсного рентгеновского автоматизированного микроанализатора приведены в табл. 3. Были использованы три параметра: вольфрамовый эквивалент W_{экв} матрицы, с которым связан эффект упрочнения твердого раствора, хромовый эквивалент Cr_{экв} ферритообразующих элементов матрицы, а также соотношение W_{экв}/Cr эвтектических карбидов. Последний параметр предлагается для характеристики эффекта упрочнения легирующих элементов в эвтектических карбидах MC, M₂C. Из представленных в табл. 3 данных следует, что в стали "Аврора" не содержится карбид M₇C₃ (это можно объяснить уменьшением содержания хрома); карбиды MC и M₂C богаче молибденом и беднее хромом и вольфрамом;

Таблица 4. Характеристика карбидов в сталях "Космос" и "Аврора"

| Тип карбида | Элементный состав сталей | | | Распределение + морфология* карбидов в сталях | |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------|---|--|
| | "Космос" | "Аврора" | "Космос" | "Аврора" | |
| MC | Богатые V (Mo, W, Cr) | Богатые V (Mo, Cr) | Разобщенные и идиоморфичные | | |
| M ₂ C | » Mo, W (V, Cr) | » Mo (V, Cr) | Неправильные и пластинчатые | | |
| M ₇ C ₃ | » Cr (V, Mo, Fe) | — | Сложноправильные | Веерообразные | |
| M ₂₃ C ₆ | » V | Богатые V | Правильные и глобулярные | | |

* По данным исследования на электронном микроскопе и ЭРАМ.

показатель $W_{\text{экв}}/\text{С}$ выше; в матрице больше молибдена, и ее вольфрамовый эквивалент выше; показатель $\text{Cr}_{\text{экв}}$ выше, что объясняет появление перитектического преобразования.

В табл. 4 приведены обобщенные данные о природе, химическом составе, морфологии, распределении эвтектических и вторичных карбидов в сталях "Аврора" и "Космос".

Общая объемная доля эвтектических карбидов и каждого из них зависит главным образом от химического состава; воздействие скорости охлаждения менее заметно [4]. Обычно в быстрорежущих сталях для валков прокатных станов общая объемная доля эвтектических карбидов колеблется в диапазоне от 9 до более чем 15 %, что принято в качестве одной из основных характеристик [4]. На рис. 5 приведены данные, полученные при анализе изображения. Количество MC и MC_2 больше в стали "Аврора" (8,5 %), но благодаря присутствию 7,4 % карбидов M_7C_3 в стали "Космос" она имеет большую общую объемную долю эвтектических карбидов (14,3 %).

Количество эвтектических карбидов M_7C_3 уменьшается при уменьшении содержания хрома. Эти карбиды богаты железом, хромом и другими ферритообразующими элементами. Сокращающееся количество карбидов M_7C_3 замещается другими карбидами, содержащими в основном ванадий, молибден и вольфрам.

При механических испытаниях на сжатие максимальная нагрузка образцов стали "Аврора" достигала 3203 Н/мм², тогда как у образцов стали "Космос" она составляла 2440 Н/мм². Другая основная характеристика, выгодно отличающая сталь "Аврора" от стали "Космос", — высокий уровень твердости в диапазоне температур 500 – 600 °C (рис. 6). Это хорошо согласуется с результатами всех наблюдений. Матрица стали "Аврора" более устойчива, так как у нее вольфрамовый эквивалент вдвое больше, чем у стали "Космос" (см. рис. 5 и табл. 3). В стали "Аврора" меньше общее количество карбидов, но они более твердые, чем карбид M_7C_3 , который отсутствует в этой стали. Твердые карбиды MC и MC_2 , количество которых в стали "Аврора" больше, чем в стали "Космос", более обогащены вольфрамом и менее хромом, что отражено соотношением $W_{\text{экв}}/\text{Cr}$ (см. табл. 3).

Эксплуатационные свойства валков из обеих сталей были проверены в клети № 2 компактного стана прокатки полосы. Производительность, т. е. количество прокатанного металла на 1 мм износа валка, составила 2606 тыс. т/мм в случае стали "Аврора" и 2282 тыс. т/мм для стали "Космос". Таким образом, износостойкость стали "Аврора" оказалась на 14 % больше.

Заключение

Обзор развития валковой высоколегированной стали типа быстрорежущей в течение прошлого века свидетельствует о том, что оно находилось в сильной зависимости от наличия и цены легирующих элементов, таких как молибден, вольфрам, ванадий и ниобий. В начале разработки стали "Аврора" цена этих легирующих элементов за 1 кг колебалась в диапазоне 6 – 7 евро. Совокупная стоимость легирующих добавок была одинаковой для сталей "Космос" и "Аврора".

Сильный рост цен на легирующие элементы с 2004 г. (в основном молибдена — в 10 раз) оказал влияние на стоимость производства стали. Стоимость легирующих добавок для стали "Аврора" выше, чем для стали "Космос". Разница в стоимости должна быть перекрыта очень хорошими эксплуатационными свойствами и надежностью стали "Аврора", чтобы конкурировать со сталью "Космос".

Отличительные достоинства стали "Аврора": отсутствие эвтектических карбидов M_7C_3 ; меньшее общее количество карбидов, но большее количество карбидов MC и MC_2 , более твердых и с более высоким показателем $W_{\text{экв}}/\text{Cr}$; матрица более легированная и устойчивая благодаря более высокому показателю вольфрамового эквивалента $W_{\text{экв}}$; более высокий уровень твердости в диапазоне температур 500 – 600 °C; более высокая допустимая максимальная нагрузка. Эти данные хорошо согласуются с результатами других научных исследований, в частности [1 – 4].

Уменьшение содержания хрома и показателя вольфрамового эквивалента в валковой стали позволяет получить более устойчивую матрицу и более твердые эвтектические карбиды. Это объясняет улучшенные механические свойства стали "Аврора", содержащей 3 – 5 % Cr, но имеющей $W_{\text{экв}} = 12$ и при эксплуатации отличающейся лучшей износостойкостью.

Библиографический список

1. Pacyna J. The effect of Molybdenum upon the transformations in the matrix of high-speed steels during austenitizing and quenching // Arch. Eisenhüttenwes. 1984. Vol. 55. No. 6.
2. Ishikawa E., Sudoh K., Matsuda Y. The effect of alloying elements on the M_2C -type primary carbide in high speed tool steel. July 1979.
3. Galda E. J., Kraft R. W. The effect of Mo and W on solidification of high speed steel // Metallurgical Trans. 1974. Vol. 5. August. P. 1727.
4. Boccalini M., Goldenstein H. Solidification of high speed steel // International Materials Reviews. 2001. Vol. 46. No. 2. P. 112.
5. Lecompte-Beckers J., Tchuindjang J. T. Melting and crystallisation behaviour of multicomponent Fe – C – Cr – X alloys: microstructural aspects // EMC 2004 Proceedings; 13th European Microscopy Congress, Antwerp, 22 – 27 August 2004.
6. Lecompte-Beckers J., Tchuindjang J. T. Use of Microscopy for identification of complex carbides MC , M_2C , M_6C , M_7C_3 and $M_{23}C_6$ in high speed-steels // GIT Imaging and Microscopy GIT Verlag. 2005. No. 2. P. 2 – 3.