

В.А.Луценко, Т.Н.Панфилова, А.И.Сивак, О.В.Луценко

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК В ГОРЯЧЕКАТАННОМ КРУПНОСОРТНОМ
ПРОКАТЕ ИЗ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ**

Установлено, что при охлаждении на воздухе распад переохлажденного аустенита стали 42Cr4Mo2 по промежуточному превращению проходит раньше диффузионного, что подтверждается меньшими значениями микротвердости бейнита.

Состояние вопроса. Основной задачей современного металлургического производства является создание комплексных программ, снижающих энергозатраты с обеспечением требуемых качественных показателей изготавливаемой металлопродукции. Повышение качества проката на металлургическом переделе возможно при проведении предварительной термической обработки.

Одним из возможных основных дефектов при производстве крупносортового легированного проката являются флокены. Главными факторами, способствующими образованию флокенов, считаются следующие: наличие и неравномерность распределения водорода в стали; действие растягивающих напряжений и повышенная хрупкость стали в локальных объемах [1]. В процессе пластической деформации микропустоты и поры, образовавшиеся после кристаллизации, завариваются и водород вытесняется в твердый раствор, что значительно пересыщает кристаллическую решетку и создает условия для сегрегации водорода в отдельных участках при последующем охлаждении.

Основным средством устранения либо уменьшения флокеночувствительности сталей является вакуумирование жидкой стали с удалением водорода. Для предотвращения образования флокенов в крупносортовом прокате проводят противфлокенную термическую обработку (ПФО), которая характеризуется значительной продолжительностью. Степень флокеночувствительности определяется количеством растворившегося в стали водорода. Известно, что при содержании водорода 2,0–2,5 ppm сталь становится нефлокеночувствительной и при быстром охлаждении до комнатной температуры флокенов не образуется. При термической обработке изделий больших сечений, хотя и происходит некоторое снижение содержания водорода, процесс в основном сводится к выравниванию концентрации водорода по сечению проката.

Общепринятая и наиболее распространенная технология ПФО[2] состоит из следующих операций:

- переохлаждение проката до температуры превращения аустенита в однородную феррито–карбидную (бейнитную) структуру;

- изотермическая выдержка при субкритических температурах, соответствующих максимальной скорости диффузии водорода и повышенной пластичности стали;
- замедленное охлаждение после выдержки (предназначено для снятия остаточных напряжений).

Известно, что для сталей, имеющих незначительный или неполный распад аустенита в интервале температур 600–650⁰С, технологически производят предварительное охлаждения проката не ниже температурной границы образования флокенов ($\approx 170^{\circ}\text{C}$ [3]), обеспечивая при этом превращение в бейнит + аустенит остаточный с последующим высокотемпературным отжигом для диффузионного удаления водорода и завершения распада аустенита [4]. Для крупносортового проката удаление водорода из металла затруднено, поэтому необходимо добиваться его перераспределения и перевода в неактивную форму, посредством рациональной продолжительности ПФО.

При выплавке сталь марки 42Cr4Mo2 подвергают вакуумной обработке, в процессе которой происходит удаление основного количества содержащегося в ней водорода. Вакуумированный металл разливают на машинах непрерывного литья. После кристаллизации и охлаждения непрерывнолитую заготовку нагревают в печи и подвергают горячей деформации на обжимном стане. После прокатки на необходимый размер горячекатаный прокат с температурой конца прокатки $\approx 1000^{\circ}\text{C}$ охлаждают на спокойном воздухе. Далее металл подвергают термической противофлокеной обработке с начальной температурой 200⁰С, медленный нагрев до 680⁰С, выдержка и медленное охлаждение. Общая продолжительность ПФО для проката из стали марки 42Cr4Mo2 составляет 35 часов. Режим термической обработки должен гарантировать не только отсутствие флокенов, но и обеспечить необходимые значения твердости металла.

Постановка задачи. Для определения возможности реализации энергосберегающей технологии с обеспечением требуемых качественных характеристик в крупносортом прокате из среднеуглеродистой хромомolibденовой стали необходимо исследование технологических процессов, противофлокеной и термической обработки.

Методика исследования. Исходным материалом для исследований служили образцы, вырезанные по сечению горячекатаного (не подвергнутого термообработке) проката диаметром 140мм из разных плавок непрерывнолитой вакуумированной электростали марки 42Cr4Mo2. Данная сталь используется для производства автомобильных деталей. Химический состав исследуемых образцов приведен в табл.1. По сечению проката исследовали микроструктуру (с помощью светового микроскопа Неофот–2), твердость (ГОСТ 9012) и микротвердость (ГОСТ 9450).

Изложение основных материалов исследования. Сталь 42Cr4Mo2 относится к доэвтектичному типу. В этих сталях после охлаждения на воздухе первым при переохлаждении образуется феррит по границам аустенитных зерен, а при дальнейшем охлаждении возле него образуется

тонкопластинчатый перлит; основу же микроструктуры составляет верхний и нижний бейнит, имеющий вид пакетов длинных и коротких игл (рис.1).

Таблица 1. Химический состав исследуемых образцов горячекатаного проката из стали 42Cr4Mo2

Номер образца (плавки)	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	S	P	Al
1	0,391	0,257	0,748	0,114	1,083	0,248	0,023	0,013	0,024
2	0,385	0,231	0,717	0,105	1,058	0,225	0,023	0,012	0,034
3	0,385	0,228	0,736	0,086	1,035	0,243	0,024	0,010	0,033
Требования [5]	0,36–0,42	0,10–0,35	0,5–0,8	≤0,35	0,9–1,10	0,15–0,30	0,02–0,035	max 0,035	0,02–0,06

На исследованных образцах 2 и 3 доля феррито–перлитной структуры составляет около 10–15%, в образце 1 – около 3–5%. Максимальная глубина обезуглероженного слоя составила 0,16% (рис.1а), при этом в поверхностных слоях присутствует бейнит, а перлитные участки отсутствуют (рис.1б). Количество перлита увеличивается к центру проката, местами образуя скопления из нескольких зерен (рис.1в).

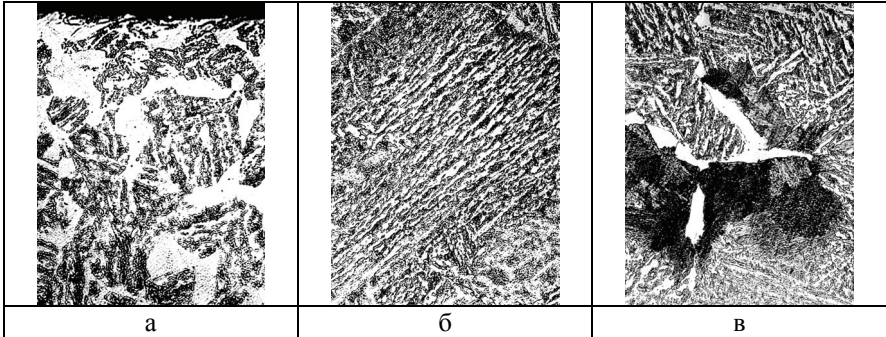


Рис.1. Характерная микроструктура (x500) поверхности (а), ½ радиуса (б) и центра (в) горячекатаного проката из стали 42Cr4Mo2

В исследуемой стали значения микротвердости бейнита являются ниже, чем в перлите (табл.2). Такую особенность структурообразования можно объяснить тем, что в электростали 42Cr4Mo2 при распаде переохлажденного аустенита образовавшийся возле феррита перлит обогащается углеродом. Повышение значений микротвердости по сечению образца наблюдается от поверхности к центру проката, что объясняется различной дисперсностью карбидных частиц.

Таблица 2. Значения микротвердости по структурным составляющим и твердости исследуемых образцов горячекатаного проката из стали 42Cr4Mo2

Номер образца	Микротвердость HV ₁₀₀ , Н/мм ²						Твердость, НВ
	Бейнит			Перлит			
	поверхность	½ радиуса	центр	поверхность	½ радиуса	центр	
1	2470	2470	2790	–	2745	2805	259
2	2350	2780	2950	–	3225	3110	255
3	2550	2640	2715	–	2650	3020	255

Следует отметить, что на структурообразование существенное влияние может оказывать ускоренное охлаждение. Так с повышением скорости охлаждения в хромомолибденовом прокате можно получить бейнитную структуру без феррито–перлитной составляющей. Твердость по сечению проката (рис.2) может изменяться в зависимости от условий охлаждения проката на холодеильнике, при которых формируются различные структурные составляющие.

Полученные значения твердости (табл.2, рис.2) не соответствуют требованиям [5] по нормируемому показателю ≤ 250 НВ.

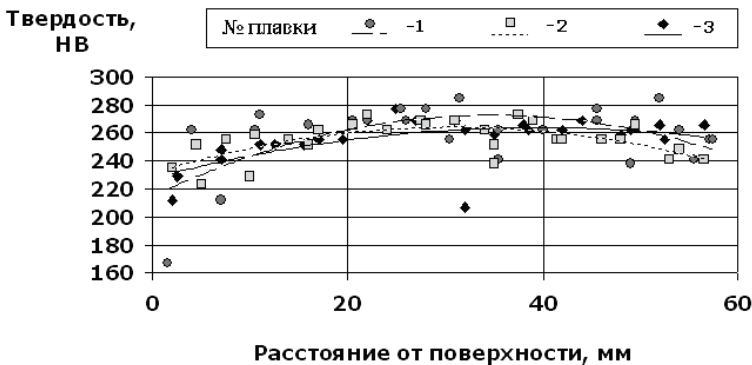


Рис.2. Изменение значений твердости от поверхности до центральной части горячекатаного проката диаметром 140мм стали 42Cr4Mo2

Благодаря комплексно проведенным технологическим мероприятиям на сталеплавильном переделе, содержание водорода в исследованных горячекатаных образцах электростали марки 42Cr4Mo2 (без термической ПФО) составляло 0,88–0,90 ppm. Флокены не обнаружены, поэтому в проведении специальной термической противфлокеной обработки для горячекатаного проката диаметром 140мм из стали 42Cr4Mo2 нет необходимости. В то же время для обеспечения требуемых сдаточных характе-

ристик по твердости металла необходимо проведение смягчающей термической обработки.

Простейший способ проведения смягчающего отжига состоит в многочасовой выдержке при температуре немного ниже A_{C1} . Снижение твердости достигается благодаря формированию структуры зернистого перлита. В перлитной области, когда температура отжига превышает изотерму распада аустенита, а так же с увеличением продолжительности происходит коагуляция специальных карбидов, что сопровождается соответствующим падением твердости. Полная коагуляция карбидных пластинок перлита достигается только при большой продолжительности отжига. Для бейнитной структуры уже в результате отпуска при температурах около 400°C наступает падение твердости, так как дисперсные карбиды в бейните легче коагулируют, чем в перлитной области [6]. Поэтому, как уже было сказано выше, в горячекатаном прокате перед термической обработкой желательно иметь бейнитную структуру. Чем выше степень дисперсности карбидов, тем раньше начинается коагуляция.

Охлаждение после отжига можно производить на воздухе. Однако, при производстве крупносортового проката требуется обеспечить полное отсутствие напряжений и максимального смягчения, поэтому охлаждение производят медленно в печи. Происходящие при отжиге структурные изменения определяют свойства стали и зависят от температуры и времени. При этом решающее значение имеет температура, влияние которой в ограниченной степени может быть компенсировано изменением времени выдержки. Получение более равномерных свойств по сечению проката, отвечающих требованиям, возможно при обеспечении после охлаждения структуры бейнита без феррито–перлитных участков. Необходимую скорость охлаждения можно спрогнозировать по термокинетической диаграмме.

Близким аналогом по химическому составу для исследуемой $42\text{Cr}4\text{Mo}2$ можно принять сталь марки 38ХМ по ГОСТ 4543 [7]. Однако только для стали 35ХМ построена термокинетическая диаграмма [8], которая в дальнейшем не пересматривалась. По диаграмме [8] необходимая скорость охлаждения металла для прохождения превращения аустенита по промежуточному механизму должна быть $\geq 30^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Конечную температуру охлаждения проката на воздухе можно повысить с 200°C до 300°C , что даст экономию при последующем нагреве проката. В соответствии с диаграммой [8] повышение температуры окончания охлаждения существенно не повлияет на структурообразование, а следовательно не ухудшит качественные характеристики хромомолибденовой стали.

В стали $42\text{Cr}4\text{Mo}2$ содержится значительное количество молибдена, хрома и марганца, которые замедляют диффузионное превращение аустенита. Повышение содержания углерода может привести к снижению полноты промежуточного превращения. Поэтому кинетика распада аустенита для стали $42\text{Cr}4\text{Mo}2$ может отличаться от стали 35ХМ.

С учетом различий в содержании легирующих элементов необходимо построение уточненной термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита для электростали 42Cr4Mo2. Важным является не только поиск рациональных режимов термической обработки, а также и корректировка технологии производства проката. Построению термокинетической диаграммы и определению в соответствии с ней рациональных, энергосберегающих режимов термической обработки будут посвящены дальнейшие исследования.

Заключение. Исследовано формирование микроструктуры и изменение значений твердости по сечению горячекатаного охлажденного на воздухе крупносортового проката диаметром 140мм из непрерывнолитой электростали 42Cr4Mo2. При распаде переохлажденного аустенита образовавшийся возле феррита перлит более обогащен углеродом, поэтому значения микротвердости перлита выше, чем бейнита. Благодаря комплексным технологическим мероприятиям содержание водорода в горячекатаном металле составило 1,2 – 0,9 ppm, поэтому флокенов в прокате не обнаружено. Однако, значения твердости не соответствуют требуемому уровню, поэтому необходимо проведение смягчающей термической обработки. Используя тепло горячекатаного проката можно повысить температуру начала посадки в печь с 200⁰С до 300⁰С, а температуру окончательного охлаждения заканчивать при 400⁰С, что даст экономию энергоресурсов с обеспечением необходимых показателей качества металлопродукции.

1. Шаповалов В.И., Трофименко В.В. Флокены и контроль водорода в стали. – М.:Металлургия, 1987. – 160с.
2. Противофлокенная термическая обработка проката / В.Б.Уманский, Л.К.Сиротина, Л.В.Макарова и др. // Сталь.– 1985.– №6.– С.71–72.
3. Ткаченко И.Ф. О механизме образования флокенов // Известия вузов Чер. мет. – 1996. – №12. – С.33–36.
4. Совершенствование режима термической противофлокеной обработки крупных поковок / Д.А.Мирзаев, Н.И.Воробьев, О.К.Токовой и др. // Сталь. – 2005. – №10. – С. 89–91.
5. ТУ SS:4027. Горячекатаные прутки и заготовки из ковкой нелегированной углеродистой и легированной конструкционной стали для автомобильных деталей.
6. Гудремон Э. Специальные стали. Изд. 2–е сокр. и перераб. – Т.1. – М.: Металлургия, 1966.
7. ГОСТ 4543. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.
8. Попов А.А., Попова Л.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – Москва–Свердловск: МАШГИЗ, 1961. – 431с.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. В.В.Парусовым