



*The structure formation in electric steel 42Cr4Mo2 under continuous cooling is investigated, the results are summarized in the form of the thermo-kinetic diagram. It is shown that rolled metal annealing during 3.5-4.0 hours at 650-680°C provides the necessary properties of steel and enables to maintain energy consumption.*

*В. А. ЛУЦЕНКО, ИЧМ НАН Украины,*

*П. А. БОБКОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,*

*Т. Н. ГОЛУБЕНКО, ИЧМ НАН Украины,*

*Л. А. ДРОБИШЕВСКИЙ, В. И. ГРИЦАЕНКО, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»*

УДК 669.017:669.141.018.29:669.15–194:621.771:621.785

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СОРТОВОГО ПРОКАТА

В настоящее время снижение потребления энергоресурсов во всех отраслях промышленности по экономическим и экологическим соображениям является первоочередной задачей. Поэтому необходимо создание комплексных программ и мероприятий, способствующих снижению энергозатрат, при этом обеспечивающих требуемые качественные показатели изготавливаемой металлопродукции. Особенно это актуально в автомобилестроении при производстве деталей ответственного назначения (распределительные и коленчатые валы, оси, шпиндели и т. д.). Исходным материалом для их производства служит сортовой прокат простого сечения из горячекатаных и/или термически обработанных конструкционных легированных сталей. Режиму охлаждения сортового проката после прокатки уделяется большое внимание, поскольку образование флокенов внутри металла является серьезной проблемой. Легированные карбидообразующими элементами стали обладают высокой флокеночувствительностью, для снижения которой проводится специальная противофлокенная термическая обработка (ПФО). Такая обработка особенно необходима при содержании водорода в стали в количестве более 2,0 ppm. ПФО состоит в основном из длительной выдержки и замедленного охлаждения.

На ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (ОАО «БМЗ») легированный сортовой прокат производится из непрерывнолитых блюмов размерами 300×400 мм. Блюмы нагревают до температур ~1250 °С и подвергают горячей деформации на реверсивном стане 850. После про-

катки металл диаметром 140 мм с конечной температурой около 1000 °С охлаждается на воздухе до температур порядка 250–300 °С. Режим ПФО (отжига) включает в себя нагрев проката до температуры 680 °С, выдержку 6,5 ч и охлаждение в печи. Такой режим термической обработки должен гарантировать не только отсутствие флокенов, но и обеспечить необходимые сниженные значения твердости металла [1]. Общая продолжительность термической обработки достигает 35 ч и является энергетически затратным процессом.

После проведения на заводе комплексных технологических мероприятий на сталеплавильном переделе содержание водорода в стали (без термической ПФО) составляет менее 1,0 ppm. Поэтому в применении дополнительной противофлокеновой термической обработки нет необходимости. Для исследования возможности отмены ПФО сортового проката были исследованы структура и свойства горячекатаного проката без применения термообработки.

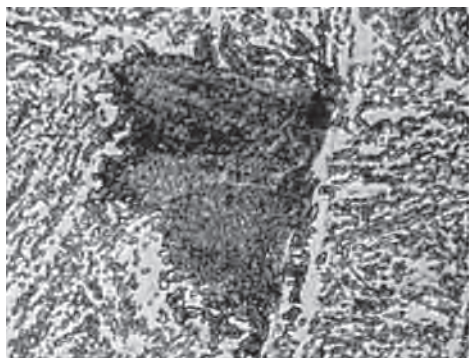
Исследования качества горячекатаного сортового проката без термической обработки проводили на образцах из стали 42Cr4Mo2 производства ОАО «БМЗ» (табл. 1). Микроструктура и измерения твердости горячекатаного проката представлены на рис. 1.

Исходная микроструктура горячекатаного проката после охлаждения на воздухе (рис.1) состоит из структурно-свободного феррита (10–15%), верхнего и нижнего бейнита (около 70–75%) и тонкопластинчатого перлита (15–20%).

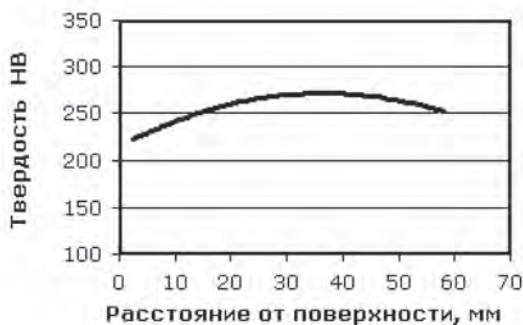
Твердость проката повышается к центру [2, 3] и ее значения ( $\leq 270$  НВ) не гарантируют выпол-

Таблица 1. Химический состав стали 42Cr4Mo2

Массовая доля элементов, %								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Cu	Al
0,391	0,748	0,257	0,013	0,023	1,083	0,248	0,114	0,024
Требования [1]								
0,36–0,42	0,5–0,8	0,10–0,35	max 0,035	0,02–0,035	0,9–1,10	0,15–0,30	≤0,35	0,02–0,06



а



б

Рис. 1. Микроструктура (а) и средние значения твердости (б) горячекатаного проката диаметром 140 мм из электростали 42Cr4Mo2. а – ×500

нение предъявляемых нормативных требований ( $\leq 250$  НВ), а наличие большого разброса в значениях твердости по нормам [1] считается недопустимым. Поэтому отмена термической обработки невозможна, ввиду того что она используется в качестве смягчающего отжига. Сортовой прокат с повышенными значениями твердости может привести к значительному снижению стойкости режущего инструмента и предельно допустимых деформаций при изготовлении деталей на последующих переделах.

С целью поиска возможных путей сокращения длительности термической обработки был проведен отжиг по сокращенному режиму при более низких температурах выдержки общей продолжительностью 18 ч. При исследовании структуры проката флокенов не обнаружено, однако требуемые значения твердости достигнуты не были.

Известно, что в бейните, как более неравновесной структуре, превращения при отжиге проходят быстрее и могут начинаться при пониженных температурах [3]. Поэтому для сокращения продолжительности смягчающей термической обработки необходимо в исходном состоянии стали обеспечить преимущественно бейнитную структуру.

В качестве эффективного способа для получения гарантированных требуемых нормативных значений твердости можно использовать процесс термомеханической обработки (ТМО), а именно высокотемпературной термомеханической обработки с изотермическим распадом аустенита в бейнитной области (ВТМИЗО) [4]. Использование процесса ВТМИЗО позволит производить последующую смягчающую термообработку при более низких температурах, так как образовавшиеся карбиды в верхней части промежуточной области менее дисперсные и коагуляция их начинается при более низких температурах. Для технологической реализации процесса ВТМИЗО необходимы научные знания кинетики превращения аустенита для стали 42Cr4Mo2.

Близким аналогом по химическому составу для исследуемой стали 42Cr4Mo2 можно принять сталь марки 35ХМ по ГОСТ 4543, для которой построена термокинетическая диаграмма (ТКД) [5]. Результаты исследования кинетики распада аустенита стали 42Cr4Mo2 после различных скоростей охлаждения приведены на рис.2.

На диаграмме область перлитного превращения несколько смещена относительно бейнитного, так как легирующие элементы диффундируют

дующую смягчающую термообработку при более низких температурах, так как образовавшиеся карбиды в верхней части промежуточной области менее дисперсные и коагуляция их начинается при более низких температурах. Для технологической реализации процесса ВТМИЗО необходимы научные знания кинетики превращения аустенита для стали 42Cr4Mo2.

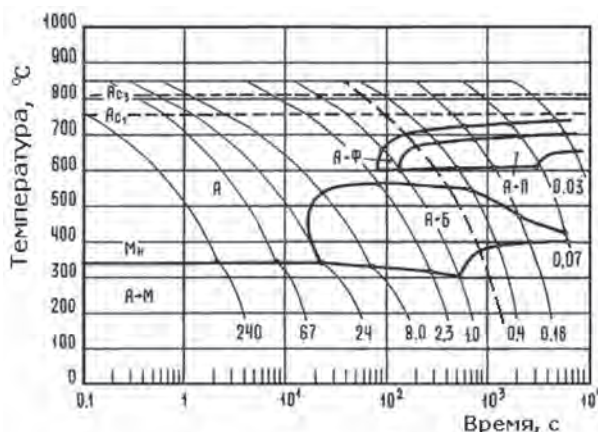


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита непрерывнолитой электростали 42Cr4Mo2

с очень малой скоростью, увеличивая продолжительность процесса распада аустенита диффузионным путем, и уменьшают скорость полиморфного превращения вследствие выделения сильно обогащенного цементита [6]. Также действие легирующих элементов (в основном молибдена) проявляется в появлении на диаграмме области с высокой устойчивостью аустенита, разделяющей перлитное и промежуточное превращение в интервале температур 430–600 °С.

При минимальной скорости охлаждения 0,03 °С/с структура хромомолибденовой стали состоит из феррита и перлита. С повышением скорости охлаждения снижается количество распавшегося аустенита по диффузионному механизму (рис. 3, а) и повышается – по промежуточному механизму (рис. 3, б).

Выше 1 °С/с (рис. 3, в) диффузионный распад подавляется и образование  $\alpha$ -железа происходит сдвиговым путем (рис. 3, з). На распад аустенита по промежуточной кинетике заметное влияние оказывает легирование стали одновременно хромом и молибденом, в результате бейнит образуется в составе смешанной структуры в большом интервале скоростей охлаждения от 0,07 до 24 °С/с [7,8]. С повышением скорости охлаждения выше 24 °С/с переохлажденный аустенит стали 42Cr4Mo2 распадается только с образованием мартенсита.

По существующей технологии производства сортового проката из электростали 42Cr4Mo2 при прокатке и охлаждении структура состоит из бейнита, феррита и перлита (см. рис. 1). Согласно построенной ТКД, получение такой микроструктуры соответствует охлаждению со скоростью около 0,6–0,7 °С/с (см. рис. 2, пунктирная линия). Распад

аустенита по диффузионному механизму наблюдается при охлаждении со скоростями 0,03–1 °С/с. Максимальная степень распада аустенита с образованием феррито-перлитной структуры в количестве более 50% в данной стали наблюдается при скоростях охлаждения до 0,4 °С/с. Бейнит в стали 42Cr4Mo2 можно получить при термомеханической обработке с охлаждением после горячей прокатки со среднемассовой скоростью 1,0–2,3 °С/с, что позволит последующий смягчающий отжиг производить при температурах выдержки ниже от существующих.

Для возможности сокращения длительности термической обработки были проведены исследования влияния температурно-временных параметров термической обработки на структуру и свойства горячекатаного проката из конструкционной легированной стали. В лабораторных условиях термическую обработку образцов из горячекатаного проката проводили по режимам: нагрев до 550, 600, 650 и 680 °С с изотермической выдержкой при данных температурах от 1 до 6 ч и последующим охлаждением на воздухе. После термической обработки исследовали структуру и проводили замеры твердости образцов.

Структура и механические свойства стали после отжига при 550 °С существенно не изменились. Структурные превращения в сравнении с исходным состоянием прошли незначительно (рис. 4, а), даже выдержка в 6 ч при этой температуре не может обеспечить выполнение нормативных требований к стали. Морфология цементита в перлите при максимальной выдержке (6 ч) изменяется не более чем на 10%. Твердость стали осталась на

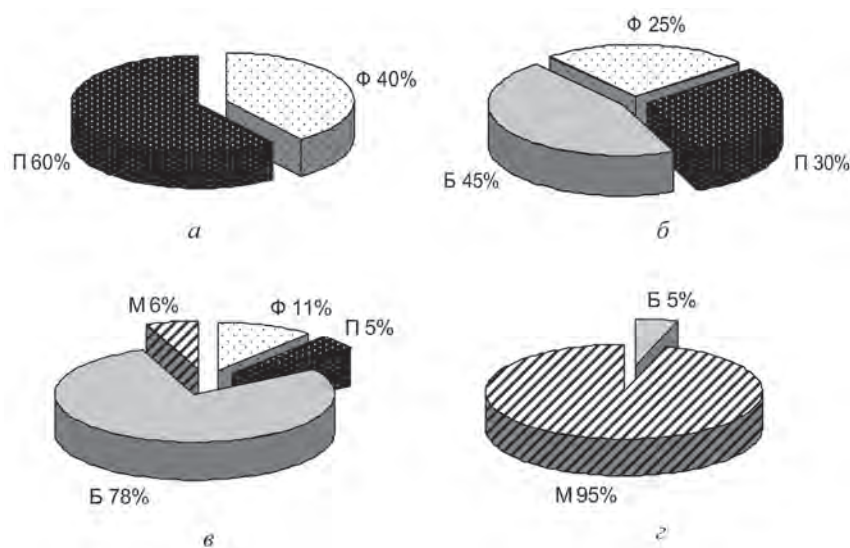


Рис. 3. Долевое соотношение структур (Ф–феррит, П–перлит, Б–бейнит, М–мартенсит) электростали 42Cr4Mo2, полученных после аустенизации при температуре 850 °С и последующего непрерывного охлаждения со скоростями. °С/с: а – 0,03; б – 0,4; в – 1,0; з – 24,0

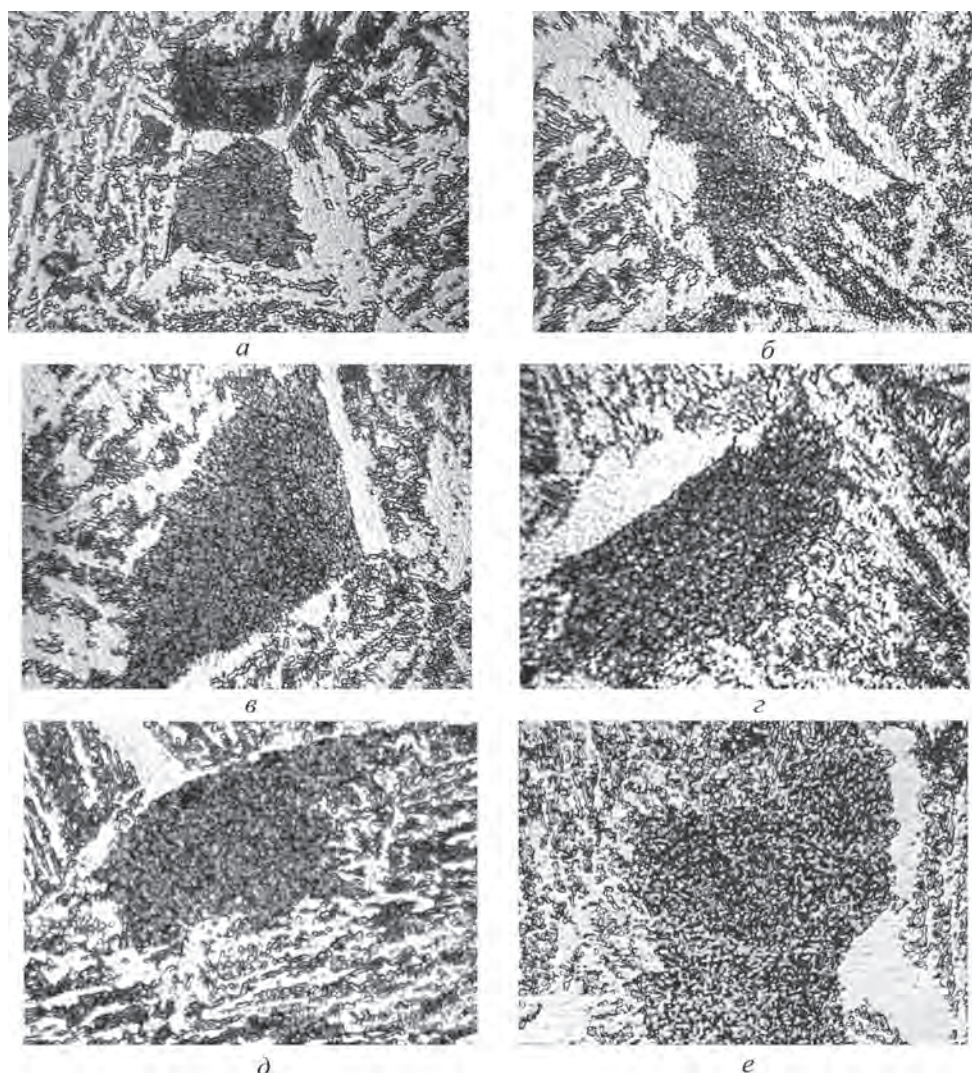


Рис. 4. Микроструктура хромомолибденовой стали после отжига при температурах: 550 °C (а), 600 °C (б), 650 °C (в, г), 680 °C (д, е) с изотермической выдержкой 3 ч (г, е) и 6 ч (а, б, в, д) с последующим охлаждением на воздухе. ×800

прежнем высоком уровне (рис. 5, линия 1), что не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

В большей степени структурные превращения прошли при обработке с нагревом до 600 °C (см. рис. 4, б). Доля цементита сферической формы при выдержке 6 ч достигает 15–20%, что значительно снижает твердость стали (рис. 5, линия 2). Однако при такой температуре все еще необходимы длительные выдержки, обеспечивающие равномерные свойства по всему сечению проката.

Повышение температуры отжига до 650 °C привело к сфероидизации карбидов в большей степени (см. рис. 4, в, г) и при выдержке 3 ч структура и свойства стали (рис. 5, линия 3) соответствовали получаемым после выдержки 6 ч при 600 °C.

Наибольшее смягчение обеспечивается в образцах, обработанных при температуре 680 °C (рис. 5, линия 4).

В структуре перлитного участка после отжига при высоких температурах заметно изменение мор-

фологии цементита в результате прохождения структурных превращений: коагуляции и сфероидизации. Доля сфероидизированных карбидов колеблется от 25–30% при выдержке 3 ч до 50–60% при выдержке 6 ч (см. рис. 4, д, е) [8]. Твердость при этом снижается на 17–20% и полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

На основании полученных результатов можно рекомендовать проводить термическую обработку стали 42Cr4Mo2 с выдержкой 3,5–4,0 ч при температуре 650–680 °C. Учитывая, что нагрев сортового проката проводят медленно (со скоростью 30–45 °C/с), снижение температуры нагрева позволит сократить режим обработки примерно на 1 ч.

Снижение температуры и продолжительности изотермической выдержки при отжиге на 4,5 ч позволит сократить расход энергоресурсов на обработку при обеспечении необходимых сдаточных характеристик сортового легированного проката. Сокращение операции термообработки за счет раз-



Рис. 5. Влияние длительности изотермической выдержки отжига при температурах: 550 °C (1); 600 °C (2); 650 °C (3); 680 °C (4) на снижение твердости хромомолибденовой стали

упрочняющей ТМО будет распространено и на другие легированные марки проката, а также учтено при строительстве на ОАО «БМЗ» нового сортопроволочного стана.

### Выводы

Исследование структуры и свойств горячекатаного проката показало, что отмена противоблоковочной обработки в технологическом цикле производ-

ства невозможна, так как обеспечивает необходимую пониженную твердость металла. На основании построенной термокинетической диаграммы для стали 42Cr4Mo2 установлено, что распад аустенита с образованием феррито-перлитной структуры в количестве более 50% наблюдается при скоростях охлаждения менее 0,4 °C/с, а при среднemasовых скоростях 1,0–2,3 °C/с обеспечивается преимущественно бейнитная структура. Показано, что снижение температуры отжига до 550 °C к существенным изменениям структуры и свойств не приводит. В структуре хромомолибденовой стали при температурах, превышающих 600 °C, проявляется доля цементита зернистой морфологии. Экспериментально установлено, что выдержка в течение 3,5–4,0 ч при отжиге в интервале температур 650–680 °C обеспечивает снижение твердости горячекатаной хромомолибденовой стали на 20% и способствует сокращению потребления энергоресурсов на 15%.

### Литература

1. Спецификация ТАТА SS:4027. Горячекатаные прутки и заготовки из ковкой нелегированной углеродистой и легированной конструкционной стали для автомобильных деталей.
2. Влияние технологии производства на качественные характеристики горячекатаного крупносортового проката из хромомолибденовой электростали / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Т. Н. Панфилова, В. И. Щербаков // Черная металлургия. 2009. № 4. С. 57–59.
3. Особенности формирования структуры и свойств в прокате из стали 42Cr4Mo2 / В. А. Луценко, Т. Н. Панфилова, В. И. Щербаков, П. К. Грибовский // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 299–302.
4. Н о в и к о в И. И. Теория термической обработки металлов: Учеб. изд. 3-е, испр. и доп. М.: Металлургия. 1978.
5. П о п о в А. А., П о п о в а Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. М.; Свердловск: Машгиз, 1961.
6. Г у д р е м о н Э. Специальные стали. Изд. 2-е сокр. и перераб. 1966. Т. 2.
7. Особенности структурообразования в хромомолибденовой стали при непрерывном охлаждении / В. А. Луценко, Н. И. Анелькин, Т. Н. Панфилова, Л. А. Дробышевский // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 272–274.
8. Влияние термической обработки на структурные изменения в хромомолибденовой стали / В. А. Луценко, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко и др. // Черная металлургия. 2011. № 4. С. 61–63.