

УДК 621.771.252.04:621.78.08.003.13

Э. В. Парусов, к. т. н., с. н. с.; А. Б. Сычков, д. т. н., проф.; С. И. Губенко,
д. т. н., проф.; С. О. Малашкин; Л. В. Сагура, к. т. н.

ОБ ЭФФЕКТИВНЫХ ПУТЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРУЕМОГО ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ БУНТОВОГО ПРОКАТА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрены конструктивные особенности и состав основного оборудования линии «Стелмор», которую используют на большинстве металлургических предприятий для охлаждения бунтового проката. Определены перспективные направления повышения качественных показателей бунтового проката за счет возможности контролируемого управления процессами структурообразования в процессе охлаждения горячедеформированной стали. Рассмотрены промышленно внедренные рациональные режимы воздушного охлаждения бунтового проката с повышенными качественными показателями, позволяющими получить ощутимый экономический эффект при переработке металла на метизном переделе.

Ключевые слова: бунтовой прокат, деформационно-термическая обработка, линия «Стелмор», режимы охлаждения.

Введение. Теоретические основы деформационно-термической обработки (ДТО) бунтового проката базируются на закономерностях фазовых и структурных превращений в металле, подвергаемом горячей пластической деформации с последующим охлаждением [1 – 5]. На базе экспериментальных данных и их теоретического обобщения разрабатывают новые технологические подходы к параметрам режимов ДТО металла в потоке непрерывных мелкосортно-проволочных станов. При разработке того или иного режима ДТО учитывают ряд показателей: температуру нагрева заготовки в печи, деформационный разогрев металла в клетях прокатного стана и проволочного блока, дробность и скорость деформации, температуру окончания горячей прокатки, длительность последеформационной паузы, а также поперечное сечение изготавливаемых профилеразмеров [3, 6, 7].

В соответствии с работами [4, 8, 9] первоначально при разработке режимов ДТО стремились достичь наибольших прочностных показателей стали при испытаниях на растяжение и снизить потерю металла в окалину. При этом основное внимание уделяли двум основным схемам ДТО: низкотемпературной и высокотемпературной, которые предусматривали закалку на мартенсит после теплой или горячей деформации аустенита соответственно. Впоследствии стали появляться и другие разновидности ДТО бунтового проката, условно называемые изотермическими, что позволило обеспечить формирование феррито-перлитной, перлитной или бейнитной структуры металла с прокатного нагрева.

Следует отметить, что процессы рекристаллизации сталей, происходящие при ДТО, играют особо важную роль, поскольку благоприятный эффект от них нивелируется лишь при значительном развитии собирательной рекристаллизации, а параметры горячей пластической деформации при этом соответствуют определению ДТО лишь формально. Считают, что в том случае, когда не достигнута стадия собирательной рекристаллизации, то металл при последующем охлаждении упрочняется, а при наступлении последней происходит его разупрочнение [4, 10].

При горячей деформации рекристаллизация (динамическая, метадинамическая, статическая) существенно отличается от рекристаллизации при нагреве холоднодеформированного металла [4, 10, 11]. Изменяя главные параметры горячей деформации при ДТО: степень и скорость деформации, температуру и длительность

последедеформационной паузы, – получают различный набор структур и свойств металла в зависимости от дальнейшего его назначения.

В работе [12] приведена классификация разновидностей высокотемпературной ДТО, которая исключает образование конечных структур сталей по мартенситному механизму, а распад аустенита происходит с образованием структур состоящих из феррита и перлита, перлита, перлита и цементита, сорбита, троостита или бейнита.

Реализация указанных разновидностей режимов ДТО не требует охлаждения проката со скоростями, превышающими верхнюю критическую скорость закалки, а технология производства может быть осуществлена на существующем оборудовании большинства металлургических предприятий.

Цель работы – определить перспективные направления повышения качественных показателей бунтового проката за счет возможности контролируемого управления процессами структурообразования в процессе охлаждения горячекатаной стали.

Материал для исследований – бунтовой прокат широкого марочного состава (0,05...0,90 % С), подвергаемый в последующем холодной пластической деформации на метизном переделе по схеме прямого волочения.

Результаты исследований. Разработанный эффективный способ, который позволяет получить различный комплекс свойств бунтового проката, заключается в возможности регулируемого управления скоростью воздушного охлаждения металла после раскладки его витками на транспортер.

Несмотря на то, что в настоящее время имеются многочисленные способы охлаждения бунтового проката в потоке непрерывных мелкосортно-проволочных станов [13], одним из самых распространенных в металлургической практике является способ охлаждения бунтового проката, называемый стелмор-процессом, а технологический участок охлаждения металла – линией двухстадийного водо-воздушного охлаждения (рис. 1). В составе такой линии прокат после выхода из чистой клетки проволочного блока охлаждаются водой специальными форсуночными устройствами, а после раскладки на витки воздушными потоками, нагнетаемыми дутьевыми вентиляторами снизу-вверх на транспортер [13 – 15].

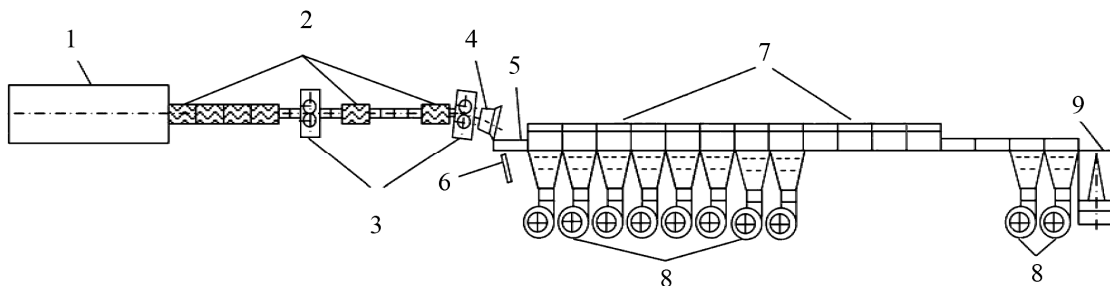


Рис. 1. Схема расположения основного оборудования на стадии водо-воздушного охлаждения бунтового проката: 1 – проволочный прокатный блок; 2 – участок водяного охлаждения; 3 – трайбаппараты; 4 – виткообразователь; 5 – приемный стол витков проката; 6 – пирометр; 7 – участок регулируемого воздушного охлаждения с роликовым транспортером и теплоизоляционными крышками; 8 – дутьевые воздушные вентиляторные системы; 9 – шахта виткосборника

С целью создания условий эффективного охлаждения металла постоянно совершенствуют конструктивные особенности состава оборудования линии «Стелмор». К примеру, при производстве проката из средне- и высокоуглеродистых марок стали используют стандартный «короткий» «Стелмор», а для низкоуглеродистых легированных, в том числе и сложнелегированных сталей сварочного назначения требуется замедленный режим

охлаждения, что предопределило создание линии «длинный» «Стелмор», которая является более эффективной и универсальной. Конструктивные особенности такой линии позволяют реализовывать всевозможные режимы воздушного охлаждения проката. Ускоренное охлаждение металла происходит за счет подачи воздуха на транспортер дутьевыми вентиляторами. При скоростях охлаждения не менее 15 °С/с структура проката из высокоуглеродистой стали преимущественно состоит из сорбитообразного перлита и практически идентична структуре металла, подвергаемого дополнительной термической обработке – патентированию. Однородность распределения структурных составляющих в поперечном сечении сталей перлитного класса имеет особо важное значение в том случае, когда металл в последствии подвергается холодной пластической деформации с высокой степенью [16].

Сорбитообразный перлит является наиболее благоприятной структурой при производстве высокопрочных холоднодеформированных изделий с высокой степенью деформации. В связи с непрерывной модернизацией волочильного оборудования и совершенствованием схем производства метизной продукции возможность получения такой структуры стали становится все более актуальной проблемой, решение которой направлено на повышение производительности и снижение материальных затрат, связанных с проведением предварительной или промежуточной термической обработки проката перед началом или в процессе волочения.

Горячекатаная сталь со структурой сорбитообразного перлита наряду с более высокими прочностными показателями обладает также значительным запасом пластичности, что позволяет при волочении не использовать патентирование и подвергать металл высоким степеням холодной пластической деформации [17, 18].

По нашему мнению, одним из наиболее эффективных направлений при модернизации действующих линий охлаждения «Стелмор» может быть не только удовлетворение потребностей метизной отрасли, но и ориентирование металлургических предприятий на создание собственного метизного производства. Это обеспечит переработку эффективных видов бунтового проката в высокорентабельную метизную продукцию, обладающую повышенной прибавочной стоимостью за счет снижения энергетических затрат. Одними из ярких примеров, где успешно реализована такая технология, являются металлургическое предприятие ОАО «БМЗ» (г. Жлобин) и ОАО «БМК» (г. Белорецк).

К высокорентабельным видам метизной продукции традиционно относят: сварочную проволоку, высокопрочные арматурные канаты, стальные канаты, холоднодеформированную арматуру, пружинную проволоку, металлокорд и высокопрочный крепеж. Если говорить о горячекатаном арматурном прокате в бунтах, то потребность в нем на строительном рынке носит сезонный характер и такой вид продукции вряд ли можно отнести к эксклюзивному и высокорентабельному в виду того, что в последнее время прослеживается тенденция по производству арматуры среднего класса прочности с повышенной пластичностью, изготавливаемой способом холодной деформации в сочетании со знакопеременным изгибом (используют эффект Баушингера) [19].

Производство качественных видов бунтового проката для рассматриваемого сортамента метизной продукции требует инновационных подходов к режимам ДТО в потоке непрерывных мелкосортно-проволочных станов, в том числе и к режимам воздушного охлаждения металла на линии «Стелмор» [20 – 22].

Одна из главных задач при модернизации линии «короткий» «Стелмор» должна заключаться в возможности практической реализации регулируемой скорости воздушного охлаждения металла с целью формирования заданного комплекса качественных показателей бунтового проката. Для получения рационального сочетания структуры и свойств металла из высокоуглеродистой нелегированной стали средняя скорость воздушного охлаждения

должна быть не менее $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а из низкоуглеродистой легированной стали сварочного назначения – не более $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что в последнем случае оказывает влияние на уменьшение количества бейнито-мартенситных структур и соответственно повышает технологическую пластичность проката при волочении.

По данным известных мировых компаний-производителей металлургического оборудования «Danieli», «SchloemanZimag», «MorganConstruction», длина участка транспортера линии «короткий» «Стелмор» от виткообразователя до шахты виткосборника не превышает 70 метров, а размер участка, на котором происходит перемещение витков металла под теплоизоляционными крышками, составляет ~ 62 метра.

Идеология создания линии «Стелмор» длиной до 150 м с возможностью регулируемого управления воздушными потоками при охлаждении металла, пропагандируемая компанией «Danieli» (DSC-процесс), на практике не нашла массового использования по причине того, что металлургические предприятия не осознали бесспорную важность такого оборудования, а особенно его влияния на формирование широкого спектра структур и свойств проката различного назначения [23].

Относительно конструктивных особенностей линий «Стелмор» металлургических предприятий Украины следует отметить, что они соответствуют стандартной комплектации, а их длина составляет не более 70 м. Участки воздушного охлаждения оснащены маломощными дутьевыми вентиляторами, а сопловые каналы распределения воздушных потоков по ширине роликового транспортера не обеспечивают требуемого результата, что вызывает значительный градиент температур по длине витка металла и соответственно приводит к структурной неоднородности, а также существенному разбросу показателей механических свойств горячекатаного проката [24].

Скорость охлаждения витков металла из высокоуглеродистой стали при повышении диаметра проката от 5,5 мм до 10,0...14,0 мм замедляется и является малоэффективной, что связано с влиянием масштабного фактора – снижением фактической скорости охлаждения. При производстве проката сварочного назначения дополнительным негативным фактором может быть неудовлетворительная герметизация секций транспортера под теплоизоляционными крышками, что обуславливает подсос внутрицехового («холодного») воздуха в термостатирующие туннели и повышает фактическую скорость охлаждения металла [13].

Мировые производители металлургического оборудования предлагают при модернизации участков воздушного охлаждения линии «Стелмор» выполнять замену устаревших маломощных дутьевых вентиляторов (15...110 кВт) на современные высокоэффективные системы воздушного охлаждения мощностью не менее 200 кВт с дифференцированным распределением воздушных потоков по ширине транспортера. Сегодня существуют альтернативные предложения отечественных производителей, так называемые высоконапорные блоки струйного охлаждения (ВБСО), которые находятся в более низком ценовом сегменте. Такие системы ВБСО по средствам индивидуальных каналов, расположенных в напорном коробе, могут осуществлять подачу воздуха на секции транспортера со скоростью до 100 м/с. Воздушные потоки при охлаждении витков проката распределяются дифференцированно по ширине транспортера в соответствии с определенным расчетным алгоритмом, благодаря чему достигается минимальный температурный градиент по длине витка металла (рис. 2).

Мощность систем ВБСО идентична зарубежным аналогам (рис. 3) и составляет не менее 200...220 кВт, однако их стоимость примерно в 2,5...3 раза меньше. Общее количество ВБСО на линии «Стелмор» в зависимости от выпускаемого сортамента проката может варьироваться от 6 до 10 единиц, а КПД их работы составляет $\sim 90\%$, что можно объяснить отсутствием у ВБСО двойного преобразования кинетической энергии в потенциальную

всасываемого воздуха в направляющий короб, а затем – в кинетическую энергию при выходе из него.

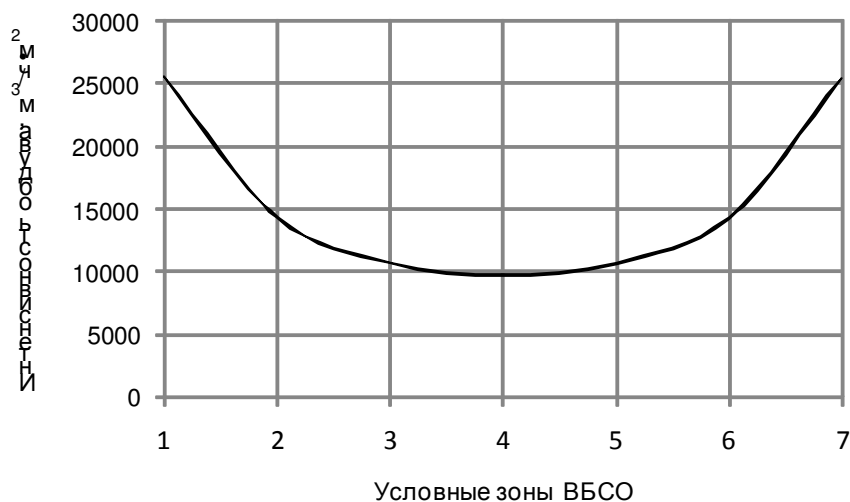


Рис. 2. Распределение интенсивности обдува витков проката через сопловую панель ВБСО: 1, 2, 6, 7 – боковые зоны транспортера; 3, 4, 5 – центральная зона транспортера

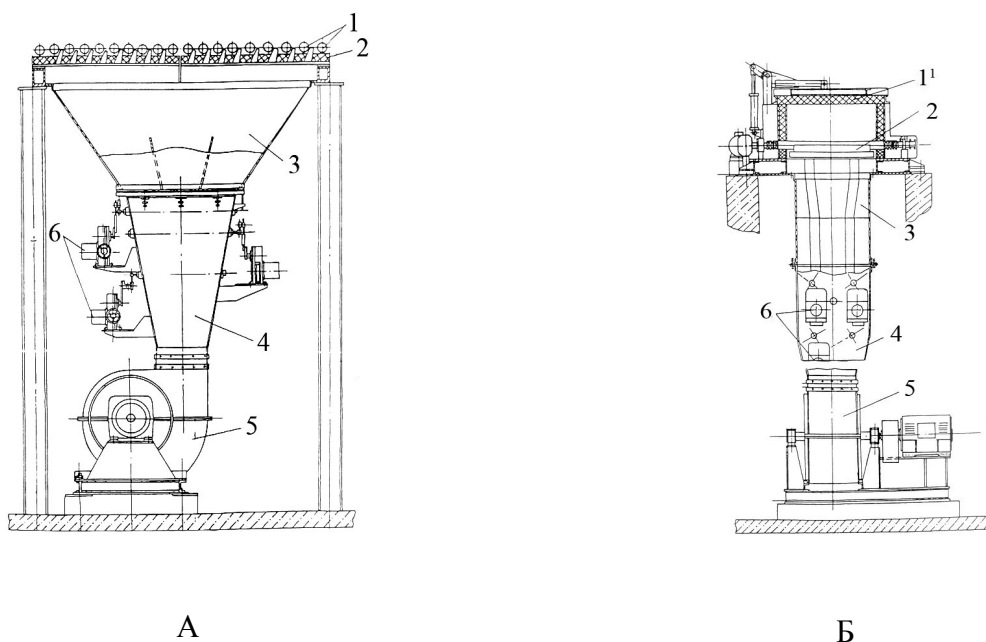


Рис. 3. Схематическое изображение ВБСО в условиях ОАО «ММЗ» с подводом воздуха на роликовый транспортер линии «Стелмор» при помощи регулируемого аппарата: а – продольное сечение; б – поперечное сечение; 1 – роликовый транспортер; 1¹ – теплоизоляционная крышка; 2 – сопловые каналы; 3 – напорный короб; 4 – выходной регулирующий аппарат; 5 – дутьевой вентилятор; 6 – исполнительный механизм

Достигнутый эффект реализуется за счет индивидуальных каналов, подающих воздух непосредственно на транспортер без преобразования энергий и значительных потерь первоначальной кинетической энергии. Системы ВБСО установлены и успешно себя зарекомендовали на ОАО «БМК» и ОАО «ММЗ» (г. Рыбница).

Модернизированная линия двухстадийного охлаждения «Стелмор» длиной 147 м в сочетании с системой ВБСО на ОАО «ММЗ» позволила реализовать режимы регулируемого

охлаждения витков проката в интервале скоростей 0,30...25 °C/c в зависимости от химического состава стали и профилеразмера. Результаты, достигнутые на ОАО «ММЗ» при охлаждении металла на линии «Стелмор», следующие:

– для бунтового проката из высокоуглеродистой стали диаметром 5,5...14,0 мм средняя скорость воздушного охлаждения в интервале 27...15 °C/c; количество сорбитообразного перлита в структуре металла не менее 80 %; возможная степень холодной пластической деформации волочением при схеме прямого волочения с относительным обжатием не менее 90 %;

– для проката из низкоуглеродистой стали сварочного назначения минимально возможная скорость охлаждения 0,30 °C/c, количество бейнито-мартенситных участков в структуре металла уменьшено с 50...45 % до 5...3 %, а суммарное относительное обжатие при схеме прямого волочения составляет ~98%.

Кроме этого, на ОАО «ММЗ» модернизированы секции водяного охлаждения, находящиеся перед и за проволочным прокатным блоком, что позволило повысить точность регулирования скорости охлаждения арматурного проката и, как следствие, улучшить показатели качества готового металла.

Предварительные расчеты показали, что для дифференцированного воздушного охлаждения проката из высокоуглеродистой стали диаметром 8,0...16,0 мм на линии «Стелмор» со скоростями не менее 15 °C/c достаточным условием является установка 8...10 единиц ВБСО мощностью не менее 220 кВт, что обеспечит структурную однородность металла как в поперечном, так и в продольном сечениях металла.

Проведено лабораторное моделирование условий охлаждения проката из низкоуглеродистой легированной стали сварочного назначения, а также проката для производства высокопрочных крепежных изделий методом холодной объемной штамповки. Исследования показали, что максимальная длительность распада аустенита в изотермических условиях составляет не более 1000...1200 с, что соответствует перемещению витков металла на транспортере в интервале скоростей 0,09...0,12 м/с (скорость воздушного охлаждения не более 0,3 °C/c). Реализовать на практике режим распада аустенита стали в изотермических условиях под теплоизоляционными крышками линии «длинный» «Стелмор» возможно только в случае дополнительного монтажа электрических подогревателей и циркуляционных вентиляторов.

При использовании в промышленных условиях в заданных температурно-временных интервалах изотермической выдержки проката из высокоуглеродистой стали будет возможно реализовать режим воздушного патентирования металла, структура которого будет полностью состоять из сорбитообразного перлита. Это позволит повысить технико-экономические показатели при производстве холоднодеформированных изделий (высокопрочные канаты, арматура, пружины, металлокорд). Спрос на рынке указанной готовой продукции весьма значителен, а предлагаемая технология может обеспечить существенный отрыв от конкурентов, в первую очередь, за счет снижения материальных затрат при переработке бунтового проката.

Для достижения экономического эффекта и повышения экологической чистоты переработки проката на метизном переделе модернизированная линия «Стелмор» должна обеспечивать выполнение следующих условий: 1) возможность охлаждения бунтового проката в широком диапазоне скоростей охлаждения; 2) формирование окалины на поверхности металла, состоящей преимущественно из вюстита, которую удаляют полностью механическим способом [25].

По данным метизных предприятий Украины, при переработке 1 тонны бунтового проката из высоко- и низкоуглеродистых сталей, в том числе сварочного назначения, затраты на проведение термической обработки (патентирование, отжиг) составляют ~ 700,00 грн./т.

Стоимость подготовки поверхности металла к волочению при использовании химического способа (травление в растворах серной или соляной кислот) значительно выше и составляет ~ 614,32 грн./т в отличии от механического способа (89,16 грн. /т).

Экономический эффект от внедрения требуемых технологических решений можно рассчитать при минимальном потреблении бунтового проката наиболее крупными метизными предприятиями в годовом исчислении ~45 000 т, что является, по данным сырьевого рынка Украины, вполне обоснованным показателем.

Если принять, что горячедеформированный бунтовой прокат перерабатывают по схеме прямого холодного волочения, а удаление поверхностной окалины выполняют механическим способом, то годовой экономический эффект можно рассчитать в соответствии с выражением:

$$\mathcal{E}_\phi = V \cdot P + V \cdot (X - M),$$

где \mathcal{E}_ϕ – ожидаемый экономический эффект, грн; V – среднегодовое потребление бунтового проката, т; P – стоимость проведения отжига или патентирования, грн; X , M – стоимость химического и механического способов подготовки поверхности проката к волочению соответственно, грн.

$$\mathcal{E}_\phi = 45\,000 \cdot 700,00 + 45\,000 \cdot (614,32 - 89,16) = 55\,132\,200,00 \text{ грн.}$$

Ожидаемый экономический эффект может быть разделен примерно в равных долях между металлургическими и метизными предприятиями за счет снижения материальных затрат технологического процесса последних, а возврат требуемых капиталовложений при модернизации линии «Стелмор» в этом случае может быть достигнут в кратчайшие сроки.

Необходимо отметить, что окупаемость от внедрения новых промышленных технологий определяет минимальный период по возврату израсходованных денежных средств и является одним из ключевых показателей оценки инвестиционной привлекательности воплощаемых в жизнь бизнес проектов.

При пререработке бунтового проката с повышенными качественными показателями удалось достичь ресурсосбережения, что обусловило экономический эффект. На методику расчета экономического эффекта не влияют амортизационные отчисления и возможные резкие ценовые изменения на сырьевых рынках сбыта. Полученные данные свидетельствуют о том, что предлагаемые технические решения при модернизации линий «Стелмор» устаревшей конструкции являются целесообразными, экономически выгодными и быстро окупаемыми.

Многолетний опыт авторов настоящей работы, связанный с промышленным внедрением новых и совершенствованием существующих режимов ДТО бунтового проката различного назначения, показал, что для достижения наилучшего сочетания структуры и свойств металла необходимо эффективное управление технологическим процессом на всех этапах производства стали, начиная со сталеплавильного передела [20 – 22].

Благодаря совершенствованию (модернизации) конструктивных и технологических недостатков работы оборудования, задействованного при производстве горячекатаного металла, станет возможным контролируемо управлять процессами структурообразования в бунтовом прокате различного назначения.

Выводы. Приведен краткий анализ развития способов охлаждения горячедеформированного бунтового проката в промышленных условиях. Рассмотрены конструктивные особенности и состав основного оборудования линии «Стелмор»,

используемой на большинстве металлургических предприятий для охлаждения бунтового проката. Определены эффективные пути совершенствования режимов регулируемого воздушного охлаждения металла в зависимости от марочного сортамента и дальнейшего его назначения. Промышленно внедрены рациональные режимы охлаждения бунтового проката с повышенными качественными показателями, что позволило получить ощутимый экономический эффект при переработке металла на метизном переделе. Показано, что главным преимуществом охлаждения витков проката на линии «длинный» «Стелмор» в сочетании с современной высокоомощной системой ВБСО является возможность контролируемого управления процессами структурообразования в сталях в различном диапазоне скоростей охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков В. И. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности / В. И. Большаков, К. Ф. Стародубов, М. А. Тылкин. – М. : Металлургия, 1977. – 200 с.
2. Штремель М. А. Металловедческое обоснование совершенствования металлургической технологии. Перспективы качества стали / М. А. Штремель // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке. – М. : Металлургия, 1994. – Т. 4. – С. 159 – 162.
3. Термомеханическая обработка проката из непрерывнолитой заготовки малого сечения / [В. В. Парусов, А. К. Белитченко, Н. А. Богданов и др.] – Запорожье : ЗГУ, 2000. – 142 с.
4. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. – М. : Металлургия, 1983. – 480 с.
5. Особенности структурообразования углеродистых и низколегированных сталей в процессе охлаждения слитка и непрерывнолитых заготовок / А. И. Бабаченко, Е. Г. Демина, А. В. Кныш [и др.] // Сб. науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». – 2015. – Вып. 81. – С. 37 – 44.
6. Непрерывный мелкосортно-проволочный стан Молдавского металлургического завода / Н. А. Богданов, В. В. Медведев [и др.] // Металлург. – 1988. – № 6. – С. 60 – 63.
7. Богданов Н. А. Совершенствование оборудования и технологии при производстве проката на мелкосортно-проволочном стане 320/150 Молдавского металлургического завода / Н. А. Богданов, А. Б. Сычков, А. Н. Савьюк // Металлург. – 1995. – № 1. – С. 27 – 28.
8. Садовский В. Д. Что такое ВТМО / В. Д. Садовский // МИТОМ. – 1983. – № 11. – С. 48 – 50.
9. Перспективный метод управления качеством металлопродукции / А. И. Бабаченко, О. Н. Перков, О. Г. Сидоренко // Сб. науч. трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии». – 2016. – № 31. – С. 182 – 189.
10. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – М. : Металлургия, 1977. – 431 с.
11. Бернштейн М. Л. Отпуск стали / М. Л. Бернштейн, Л. М. Капуткина, О. Д. Прокошкин. – М. : МИСИС, 1997. – 336 с.
12. Тушинский Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л. И. Тушинский. – Новосибирск : Наука, 1990. – 306 с.
13. Эволюция условий охлаждения при деформационно-термической обработке бунтового проката в потоке технологических линий / Парусов Э. В., Сычков А. Б., Губенко С. И. [и др.] // XIII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 05 июня – 08 июня 2017 г., Болгария, г. Варна: Материалы конференции. – 2017. – С. 122 – 129.
14. Обоснование параметров регулируемого охлаждения бунтового проката из высокоуглеродистой стали в потоке проволочного стана 320/150 ОАО «ММЗ» / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко [и др.] // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2016. – № 2 (77). – С. 62 – 70.
15. Анализ технологических особенностей охлаждения бунтового проката на линии Стелмор ОАО «ММЗ» [Электронный ресурс] / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко, И. Н. Чуйко // Научные труды ВНТУ. – 2016. – № 3. – Режим доступа к журн. : <https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/503/504>.
16. Об особенностях структурообразования в высокоуглеродистом бунтовом прокате / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, И. Н. Чуйко [та ін.] // Вісник УМТ ім. І. М. Францевича. – 2016. – № 9. – С. 88 – 97.
17. О повышении технологической пластичности при волочении бунтового проката из высокоуглеродистой стали без применения термической обработки / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко [и др.] // Проблемы трибологии. – 2016. – № 3. – С. 82 – 91.
18. Взаимосвязь предельной деформируемости бунтового проката при волочении с параметрами его микроструктуры / Э. В. Парусов, С. И. Губенко, В. А. Луценко [и др.] // Литье и металлургия. – 2016. – № 3 (84). – С. 75 – 81.

19. Мадатян С. А. Тенденции производства и потребления арматуры железобетонных конструкций / С. А. Мадатян // Черметинформация, Бюллетень «Черная металлургия», 2009. – № 6. – С. 22 – 24.
20. Парусов В. В. Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий / Парусов В. В., Парусов О. В., Сычков А. Б. – Дн-ск. : «АРТ-ПРЕСС», 2010. – 160 с.
21. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки / Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В. – Дн-ск. : «АРТ-ПРЕСС». – 2012. – 376 с.
22. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки / [А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. Ю. Столяров и др.] – Магн. гос. техн. универ. им. Г. И. Носова. – 2014. – 257 с.
23. Математическое моделирование параметров охлаждения для обеспечения формирования эффективной микроструктуры бунтового проката / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, В. А. Луценко [и др.] // XII Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании». Технический университет, Варна 30 мая – 2 июня 2016 г. : Тезисы докл. – Варна, Болгария. – 2016. – С. 215 – 220.
24. Increasing the strength class of rolled steel made of high-carbon steel in the stream of continuous wire mill / E. V. Parusov, A. B. Sychkov, S. I. Gubenko [and others] // Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – № 1. – P. 54 – 57.
25. Перспективы использования экологически чистого способа подготовки поверхности бунтового проката к волочению / Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. И. Губенко [та ін.] // Проблеми трибології. – 2016. – № 2. – С. 74 – 82.

Парусов Эдуард Владимирович – к. т. н., с. н. с., заведующий отделом термической обработки металла для машиностроения, tometal@ukr.net.

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ НАНУ).

Сычков Александр Борисович – д. т. н., проф., профессор кафедры литейного производства и материаловедения, absychkov@mail.ru.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ).

Губенко Светлана Ивановна – д. т. н., проф., профессор кафедры материаловедения, sigubenko@gmail.com.

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ).

Малашкин Сергей Олегович – аспирант кафедры технологии металлургии литейных процессов, shtirlic21999@mail.ru.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ).

Сагура Людмила Владимировна – к. т. н., старший научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, slv_metal@ukr.net.

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ НАНУ).