

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Институт черной металлургии НАН Украины

Показано, что накопленный научными организациями и промышленными предприятиями материал по термомеханическому упрочнению проката позволяет значительно повысить вязкие и усталостные характеристики с одновременным увеличением значений прочности проката.

В общей массе конструкционных материалов, используемых в основных металлопотребляющих отраслях (машиностроение, строительство, транспорт и др.), доля черных металлов составляет 90–95%. Производимый стальной металлопрокат из углеродистых и низколегированных сталей в подавляющем большинстве поставляется в горячекатаном состоянии, имея при этом низкие показатели прочности, вязких и пластических свойств. С учетом этого важнейшими задачами повышения уровня качества и служебных характеристик металлопроката и изделий из него является коренное повышение уровня свойств готовой металлопродукции (и, в первую очередь, ее прочностных характеристик) на металлургических предприятиях, а также создание новых конструкторских решений и прогрессивных технологий применения высокопрочного стального проката в строительстве, машиностроении, на транспорте и других металлопотребляющих отраслях.

В мировой практике используются три основных пути повышения комплекса свойств стали и изделий из нее:

- а) производство металлопродукции из легированных сталей;
- б) применение классических процессов термического упрочнения путем закалки после печного или электрического нагрева с последующим отпуском;
- в) термомеханическое упрочнение в потоке прокатного производства с использованием тепла прокатного нагрева и самоотпуска после прерванного охлаждения.

Оценивая эффективность этих способов, следует учитывать их энерго- и материалоемкость, а также себестоимость осуществления. Применительно к ситуации в черной металлургии эти положения приобретают очень важное значение, поскольку Украина, в частности, не располагает достаточными ресурсами таких дефицитных легирующих элементов, как хром, никель, ванадий, молибден, ниобий, широко используемых для получения высокопрочных сталей, а также в связи с высокой дороговизной энергетических ресурсов.

Исходя из этих положений академиком НАНУ К.Ф.Стародубовым в пятидесятые годы XX века был предложен новый энергосберегающий процесс термомеханического упрочнения стального проката. Под его руководством учеными Института черной металлургии НАН Украины (ИЧМ), других научных и проектно–конструкторских организаций, ВУЗов были созданы нетрадиционные процессы и технологическое оборудование для упрочнения массовых видов проката из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей путем его термического упрочнения (деформационно–термической обработки) в потоке прокатных станов с использованием тепла прокатного нагрева [1–4].

Выполненная широкая программа научных разработок и технологических решений на ряде станов металлургических предприятий обнаружила, что в процессе деформационной и термомеханической обработки стали происходит более равномерное распределение элементов по зерну аустенита, повышается растворение вредных примесей, располагающихся в приграничных зонах, создается благоприятная суб– и дислокационная структура. В результате динамической и частично статической рекристаллизации происходит измельчение аустенитного зерна. Последующее за деформацией охлаждение стали с высокими скоростями приводит к образованию мелкого действительного зерна и высокодисперсных продуктов распада аустенита.

При больших скоростях охлаждения в поверхностных слоях, как правило, протекают процессы бездиффузионного превращения аустенита, а глубина этого слоя и температура отпуска зависят от среднemasсовой температуры конца ускоренного охлаждения. Изменяя среднemasсовую температуру конца охлаждения можно изменить степень упрочнения проката за счет изменения, главным образом, температуры самоотпуска. Температурой самоотпуска является температура, до которой отогреваются поверхностные слои после выравнивания температуры металла по сечению. Эта температура, как правило, равна среднemasсовой температуре конца ускоренного охлаждения. Этим же определяется характер и температурный интервал распада аустенита во внутренних слоях изделия при их охлаждении с малыми скоростями после завершения ускоренного охлаждения [5].

На основе выполненных ИЧМ научных разработок совместно с другими организациями и промышленными предприятиями осуществлена комплексная программа работ по созданию и промышленному внедрению технологических процессов и закалочного оборудования для термомеханического упрочнения широкого сортамента сортового, фасонного и листового проката с использованием прерванной закалки с прокатного нагрева и последующего самоотпуска.

Примером целенаправленного создания процессов термомеханического упрочнения стального проката и их реализации в конкретных условиях металлургического производства является создание

впервые в мировой практике промышленной технологии и закалочного оборудования для упрочнения арматуры для железобетонных конструкций на комбинате "Криворожсталь". Эта установка была введена в промышленную эксплуатацию в 1967 году. Высокая эффективность реализации нового процесса производства высокопрочного проката позволила в последующие годы его реализовать на других металлургических предприятиях с организацией упрочнения широкого сортамента металлопроката.

На комбинатах "Криворожсталь", Макеевском, Западно-Сибирском, Череповецком, заводах Белорусском, Молдавском, "Амурсталь" осуществлено промышленное производство термомеханически упрочненной арматуры третьего-шестого классов прочности (в т.ч. свариваемой и коррозионностойкой). Высокопрочная арматурная сталь применяется в предварительно напряженных железобетонных конструкциях, что позволяет в максимальной степени использовать высокие прочностные характеристики металла [6–8]. Подтверждением этому могут служить данные промышленного использования высокопрочного металлопроката в машиностроении и строительстве (табл. 1).

На Западно-Сибирском меткомбинате на стане 450 производится термомеханически упрочненный фасонный прокат. Разработана технология и ведется подготовка к промышленному производству упрочненного фасонного проката на стане 600 Алчевского меткомбината и на рельсобалочном стане комбината "Азовсталь".

Промышленное производство термомеханически упрочненного листового проката осуществляется на стане 3600 комбината "Азовсталь" и широкополосных станах комбинатов "Запорожсталь" и Мариупольском им. Ильича.

Проведенные системные исследования термомеханически упрочненного проката класса прочности 46/33 из стали Ст 3сп и Ст3пс показывают высокую его надежность и хладостойкость (табл.2). Критическая температура хрупкого разрушения этих сталей (по критерию 50 процентов вязкой составляющей) находятся на уровне минус 50⁰С, что на 30–45⁰С ниже по сравнению с горячекатаной сталью. Еще более высокие значения характеристики получены у низколегированных сталей.

Высокий комплекс свойств термомеханически упрочненной стали Ст3сп и Ст3пс позволил осуществить равномерную замену этой стали в металлургических конструкциях горячекатаные низколегированные стали марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 14Г2 и др. класса прочности 46/33.

Исходя из дороговизны и дефицитности (особенно для условий Украины) легирующих элементов следует по новому рассматривать вопрос использования горячекатаных легированных марок стали в таких высокометаллоемких отраслях как машиностроение, строительство, транспорт, горно-добывающая промышленность.

Таблица 1. Примеры эффективного применения термоупрочненного проката вместо горячекатаного

Наименование изделий	Свойства термоупрочненного проката	Эффективность применения
Стрела автокрана КС–2561Д, грузоподъемностью 6,3 т Балашихинского завода.	$\sigma_t = 600 \text{ Н/мм}^2$	Экономия металла 30 % (340 кг вместо 480 кг).
Лонжероны и рама автомобиля МАЗ	$\sigma_t = 650 \text{ Н/мм}^2$	Повышение циклической прочности в 3–4 раза. Снижение массы на 12 %.
Башенные краны КБ–308К, КБ–309ХЛ, КБ–403Б, КБ–674А, КБ–4051А (расчеты СКТБ "Строй-дормаш")	$\sigma_t = 390\text{--}440 \text{ Н/мм}^2$	Экономия металла 13,5–29,1 %.
Ковш экскаватора Э–302А	$\sigma_t = 600 \text{ Н/мм}^2$	Экономия металла 40 %.
Опоры технологических трубопроводов (серия 3015–1/77, тип II У).	$\sigma_t = 390 \text{ Н/мм}^2$	Экономия металла 18–20 %
Покрытие одноэтажных промзданий из прокатных профилей типа "Москва"	$\sigma_t = 390 \text{ Н/мм}^2$	Повышение несущей способности на 15 %. Обеспечение работы при -65°C .
Подкрановая балка (проект "Укрпроектстальконструкция")	$\sigma_t = 325 \text{ Н/мм}^2$	Экономия металла 18 %.
Подстропильные фермы пролетом 12 м (расчет ДИСИ, изготовление завода им.Бабушкина)	$\sigma_t = 470\text{--}780 \text{ Н/мм}^2$	Повышение несущей способности в 1,35–2,05 раза.
Анкерно–угловые опоры воздушных линий электропередач ВЛ, напряжение 1150 киловатт.	$\sigma_t = 500 \text{ Н/мм}^2$	Экономия металла 30 %. Обеспечение работы при -40°C .

Когда речь идет о производстве массовых видов низколегированного горячекатаного сортового и листового проката с пределом текучести 305–355 Н/мм² с удовлетворительной пластичностью и гарантированной при минус 40⁰С хладостойкостью, то исходят из необходимости их легирования в количестве 2,5–4,0 процента такими элементами как марганец, хром и значительно реже никелем, ванадием, молибденом, ниобием и др. Для таких уровней служебных характеристик легирование стали даже в указанных пределах является в настоящее время расточительным, поскольку в термически упрочненном состоянии такими же (и более высокими, в частности, по значениям хладостойкости) свойствами обладает рядовая углеродистая сталь, например Ст3.

Таблица 2. Свойства стального проката в горячекатаном и термомеханически упрочненном состоянии

Марка стали и состояние проката	Класс прочности	Содержание марганца, вес. %	Нормативный документ на производство и поставку продукции	Механические свойства			
				Н/мм ²		%	Дж/см ²
Горячекат. ст. Ст3пс, сп	38/23	0,40–0,65	ГОСТ 380–71	240	370	26	40 при –20 ⁰ С
Термоупроч. лист, Ст3пс, сп	46/33	0,40–0,65	ТУ 14–1–3521–83	325	470	16	40 при –40 ⁰ С
Термоупроч. фасон., Ст3пс, сп	46/33	0,40–0,65	ТУ 14–15–146–85	390	490	20	29 при –70 ⁰ С
Горячекатан. стали							
09Г2	46/33	1,4–1,8	ГОСТы 19281–73	310	450	21	30 при –40 ⁰ С
09Г2С		1,3–1,7	19282–73	340	490	21	
10Г2С1		1,3–1,65		340	490	21	
14Г2		1,2–1,6		340	490	21	
Термоупрочнен. стали							
09Г2	52/40	1,3–1,8	ТУ 14–15–146–85	440	540	18	35 при –70 ⁰ С
09Г2С 10Г2С1			ТУ 14–1–3521–83	440	590	16	29 при –70 ⁰ С
14Г2							

К этому следует добавить, что применение легирующих элементов для изготовления проката массового назначения технически и экономически оправдано лишь в случае использования этого материала в термически упрочненном состоянии, поскольку только в этом случае более полно используются потенциальные возможности легирующих элементов – повышаются на 30–40 процентов прочностные свойства, существенно понижается температура хрупкого разрушения, уменьшается склонность к старению.

Разрабатывая проблему термомеханического упрочнения проката необходимо вносить коррективы в температурно–деформационные режимы прокатки. Оснащение металлургических предприятий

современными прокатными станами с высокими скоростями прокатки приводит к снижению комплекса свойств стали вследствие существенного повышения температуры конца прокатки. Сравнение уровня свойств двутавровых балок и швеллеров № 16–18 из стали Ст3, прокатанных на линейном (низкоскоростном) стане 650 комбината "Азовсталь" и непрерывном (высокоскоростном) стане 450 Западно-Сибирского меткомбината, показывает снижение предела текучести от 350 до 270 Н/мм² и временного сопротивления разрыву от 450 до 400 Н/мм² при одновременном снижении вязких характеристик у проката, изготовленного при высокоскоростной прокатке. Это явилось следствием повышения температуры конца прокатки на 280°С на непрерывном стане (1080°С против 800°С на линейном стане).

При конструировании новых и модернизации существующих непрерывных прокатных станов необходимо предусматривать возможность управлять температурно-деформационными параметрами прокатки и охлаждения стали как после выхода из последней клетки, так и в межклетевых участках. Вместе с этим в процессе реконструкции старых линейных станов следует широко использовать преимущества их температурно-деформационных параметров прокатки для осуществления термомеханического упрочнения углеродистых и низколегированных сталей с организацией выпуска малотоннажных партий широкого сортамента проката с высоким комплексом свойств.

Очень важной составной частью задачи получения высокого комплекса свойств при термоупрочнении металлопроката является химический состав стали. Ведь используемые сегодня для производства массовых видов металлопроката углеродистые и низколегированные марки стали были созданы применительно к их применению в горячекатаном состоянии. Осуществление термомеханического упрочнения стали изменило отношение к их химическому составу и саму природу воздействия различных элементов на формирование структурного состояния и уровня свойств металлопроката. Так, например, введение кремния свыше 1,5 % в углеродистую или низколегированную горячекатаную конструкционную сталь считается нецелесообразным, т.к. такая сталь становится хрупкой и малопластичной. В то же время в термомеханически упрочненном состоянии ($\sigma_T \geq 1000$ Н/мм²) низкоуглеродистая сталь, содержащая 1,5 % кремния, обладает высокими пластичностью и вязкостью, повышенным сопротивлением к коррозионному растрескиванию под напряжением, а также хорошо противостоит разупрочнению при температурном воздействии (при сварке). Термомеханическое упрочнение существенно повышает эффективность легирования стали такими широко распространенными легирующими элементами как марганец и хром.

Исходя из этих положений в ИЧМ выполняются работы по созданию эффективных углеродистых и низколегированных марок стали,

обеспечивающих термомеханически упрочненному прокату наилучшее сочетание упруго–прочностных, пластических и вязких характеристик, а также высокие значения сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением и минимальным разупрочнением при сварке. При этом особое внимание уделяется вопросам экономного легирования стали [5,9].

Оценивая возможности обеспечения высокого комплекса свойств конструкционных сталей необходимо учитывать качество стали, из которой изготавливается большинство углеродистого и низколегированного проката. С этой точки зрения характерным является использование в очень малых масштабах на металлургических предприятиях (особенно на предприятиях Украины) современных средств внепечной обработки выплавляемой стали (вакуумирование, ввод в ковш различных реагентов, продувка инертными газами и др.), позволяющих коренным образом очистить сталь от вредных примесей. По этой причине производимый металлопрокат не имеет высоких значений вязких (особенно при низких температурах) и пластических характеристик, сопротивления трещиностойкости и усталостным повреждениям. В то же время эти характеристики уровня качества металлопродукции являются определяющими при сертификации готового проката по Международным стандартам.

Накопленный научными организациями и промышленными предприятиями материал по термомеханическому упрочнению проката показывает реальную возможность значительного повышения вязких и усталостных характеристик с одновременным увеличением значений прочности при осуществлении этой технологии (см. таблицу 2) в существующих условиях производства широкого сортамента стали и проката из нее.

В выполняемых в последние годы разработках основное внимание уделяется вопросам оптимизации параметров температурной и деформационной обработок, способов и режимов после деформационного охлаждения стали, установлению температурных областей самоотпуска после прерванного охлаждения, обеспечивающих получение в углеродистых и низколегированных конструкционных сталях высоких значений прочностных и вязких свойств, а также служебных характеристик с обеспечением максимальной экономии энергетических ресурсов.

Дальнейшим развитием проблемы энергосберегающей термомеханической обработки стального проката является ее осуществление при пониженных (до 950–1000⁰C) температурах. В результате такой обработки обеспечивается дальнейшее увеличение экономии энергетических ресурсов с одновременным существенным улучшением структурного состояния стали.

Выполненный Институтом черной металлургии НАНУ комплекс научно–исследовательских исследований и промышленных

экспериментов в условиях меткомбината "Криворожсталь" показал, что температурно–деформационная обработка углеродистых и низколегированных сталей при пониженных до 1000–950⁰С температурах приводит к максимальному измельчению действительного зерна, созданию благоприятной суб– и дислокационной структуры. Последующее ускоренное охлаждение до температур самоотпуска 500–600⁰С обеспечивает высокий комплекс прочностных, пластических и вязких свойств (в т.ч. и при отрицательных температурах) конструкционных сталей и их служебные характеристики. Промышленное опробование этих параметров на комбинате "Криворожсталь" при термомеханическом упрочнении арматуры из углеродистой и низколегированной сталей полностью подтвердили данное положение (см. таблицу 3) [9, 10].

В процессе деформационно–термического упрочнения стального толстолистового проката по его толщине образуется микроструктурная неоднородность. Установлено, что в поверхностном и переходном слоях рекристаллизационные процессы не успевают полностью пройти и имеет место динамическая полигонизация, при которой дислокации образуют субграницы. Такое структурное состояние обеспечивает листовому прокату высокие значения прочности, пластических и вязких характеристик, гарантирующих ему высокую агрегатную прочность.

Таблица 3. Механические свойства арматуры диаметром 12 мм из стали марки Ст3ТРпс после нагрева исходной заготовки до пониженных температур и последующего термического упрочнения в потоке стана 250–1 КГТМК "Криворожсталь"

Температура конца проката-ки	Скорость проката, м/с	Механические свойства						Испытание на загиб с разгибом	$\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}}$	$\frac{\sigma_{0,02}}{\sigma_{0,2}}$
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,02}$	δ_5	S_{max}	Ex10 ⁻⁴ , Н/мм ²			
		Н/мм ²			%					
1050	14,0	680	605	539	20,0	7,3	20,2	удовл.	1,12	0,89
950	12,0	857	773	696	15,5	4,5	19,0	удовл.	1,11	0,90
890	10,0	871	773	699	15,0	6,5	19,3	удовл.	1,13	0,90
Требования отечественных и зарубежных стандартов		≥600	≥500	≥425	≥14,0	≥2,5	≥19	удовл.	≥1,05	≥0,85

С учетом этих положений была разработана и опробована модель и программа управления технологическими параметрами управления толстолистового проката из углеродистых сталей, позволяющая оптимизировать процесс ДТУ в зависимости от температурных условий деформации стали и температуры самоотпуска после прерванного охлаждения. Эта разработка реализована в промышленных условиях на толстолистовом стане 3600 меткомбината "Азовсталь" [11].

Микроструктурная неоднородность по сечению изделия была также обнаружена при термомеханическом упрочнении фасонного проката. В поверхностных слоях (на глубину до 2,0 мм) структура представляет собой продукты отпуска мартенсита и бейнита. В центре в зависимости от степени упрочнения образуется феррито–перлитная смесь, дисперсность которой на 2–3 балла выше, чем в горячекатаном состоянии. В результате уровень прочности повышается в 1,2–1,5 раза при сохранении на высоком уровне пластических характеристик. Значения ударной вязкости находятся в прямой зависимости от степени упрочнения – чем выше степень упрочнения, тем в большей степени растет ударная вязкость. Это является следствием структурной неоднородности стали (ее слоистости). Такой прокат, по–видимому, можно рассматривать как естественный композит [12]. Этот процесс термомеханического упрочнения реализован на Западно–Сибирском меткомбинате при производстве фасонного проката.

При осуществлении процессов термомеханического упрочнения стали очень важной их составляющей является обеспечение стабильности образующегося структурного состояния и формирующегося комплекса свойств сталей, имеющих значительную колеблемость содержания различных элементов. С этой целью были проведены исследования, направленные на использование способности намагничивания продуктов закалки стали (в отличие от аустенитного состояния) [13]. Реализация данного метода управления процессом упрочнения стали основана на регистрации в процессе интенсивного охлаждения количества образующейся магнитной фазы в стали в заданных для нее пределах в зависимости от содержания углерода в данной плавке.

Исследование закономерностей формирования структуры и свойств термомеханически упрочняемого арматурного проката в зависимости от формирующегося в процессе охлаждения количества структур закалки (при помощи датчика магнитной фазы) при изменяющихся температурно–деформационных условиях прокатки, при переменном химическом составе стали в пределах данной плавки позволили разработать новый показатель интегрального химического состава стали, так называемый "эквивалент химического состава" и разработать с его использованием математическую модель управления процессом термического упрочнения стали [14]. Этот процесс находится в стадии промышленного освоения на меткомбинате "Криворожсталь".

Разработаны рекомендации по созданию эффективных композиций экономнолегированных сталей, деформационно–термическое упрочнение которых обеспечивает получение конструкционного проката высокой прочности ($\sigma_t \geq 450 \text{ Н/мм}^2$). Массовая доля углерода в таких сталях составляет до 0,4 % с введением недефицитных легирующих элементов: марганца до 1,5 % и кремния до 1,0 %. В этих сталях при закалке после деформационной обработки образуются бейнитные структуры с мелкозернистым строением стали и благоприятным субструктурным состоянием. В результате в них формируется уникальный комплекс свойств с высокими значениями прочности, пластичности и вязких характеристик, высоким сопротивлением усталостным разрушениям [9].

Выполненными к настоящему времени работами установлено, что термомеханически упрочненные углеродистые и низколегированные стали являются вполне конкурентноспособными как по прочности, так и по вязким характеристикам (в т.ч. и по хладостойкости) основного металла и сварных соединений. Это позволяет осуществить сертификацию значительной части металлопроката массового назначения в полном соответствии с требованиями Международных стандартов.

Реализация разработанных научно–технических положений в конкретных технологических процессах термомеханического упрочнения массовых видов проката из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, внедренных на металлургических предприятиях, позволяет:

1. Экономить в черной металлургии до 20 % энергетических ресурсов (упрочнение стали осуществляется с использованием тепла прокатного нагрева).

2. Экономить до 15–20 кг/т легирующих элементов за счет снижения степени легированности стали и использования новых прогрессивных процессов упрочнения.

3. Снизить себестоимость металлопроката в результате применения экономнолегированных сталей и энергосберегающих технологий.

4. Снизить на 15–40 % металлоемкость железобетонных и металлических конструкций, механизмов и машин, обеспечив при этом экономию свыше 20 % металла в народном хозяйстве.

5. Обеспечить металлопрокату из новых конструкционных сталей и металлоизделий из них в машиностроении, строительстве, других отраслях полное соответствие требованиям Международных и национальных зарубежных стандартов, что будет гарантировать этой продукции высокую конкурентную способность на мировом рынке.

2. *Стародубов К.Ф., Узлов И.Г., Савенков В.Я. и др.* Термическое упрочнение проката. – М., Металлургия, 1970. – 368 с.
3. *Узлов И.Г., Савенков В.Я., Поляков С.Н.* Термическая обработка проката. – Киев, Техника, 1981. – 160 с.
4. *Узлов И.Г.* – М., МИТОМ, № 8, 1965. – С. 18–21.
5. *Кугушин А.А., Узлов И.Г., Калмыков В.В. и др.* Высокопрочная арматурная сталь. – М., Металлургия, 1986. – 272 с.
6. *Мулин Н.М.* Стержневая арматура железобетонных конструкций. – М., Стройиздат, 1974. – 185 с.
7. *Мадатян С.А.* Технология натяжения арматуры и несущая способность железобетонных конструкций. – М., Стройиздат, 1980. – 206 с.
8. *Барышев В.М., Одесский П.Д., Гладштейн Л.И.* Сб. "Монтажные и специальные работы в строительстве". –., Стройиздат, № 3, 1988.
9. *Узлов И.Г., Куцыгин М.Д., Федорова И.П., Раздобреев В.Г.* Разработка новых температурно-деформационных параметров упрочняющей обработки углеродистых и низколегированных сталей. /Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – К.: Наукова думка, 1998. – Вып. 2. – С.333–339.
10. *Узлов И.Г., Федорова И.П., Куцыгин М.Д., Раздобреев В.Г.* Структура и свойства низколегированных конструкционных сталей после их деформационно-термической обработки при пониженных температурах. /Металлургическая и горнорудная промышленность". – 1999. – № 2. – С. 39–42.
11. *Спиваков В.И., Булянда А.А., Орлов Э.А. и др.* Термическое упрочнение толстолистовой углеродистой стали до уровня свойств низколегированной. /Сталь. – 1991. – № 1. – С. 61–69.
12. *Черненко В.Т., Кудлай А.С., Пучиков А.В. и др.* Вязкость стали, термомеханически упрочненной методом прерванной закалки. /Сталь. – 1990. – №12. – С. 77–79.
13. *Узлов И.Г., Парусов В.В. и др.* Управляемое термическое упрочнение проката. К. "Техника", 1989. – 118 с.
14. *Узлов И.Г., Сидоренко О.Г. и др.* Контроль процесса термомеханического упрочнения арматурного проката при помощи датчика магнитной фазы. /Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – №6. – С. 61–63.