

УДК 621.771.63

Дзюба А. Ю.
Блохин М. В.
Новицкий Р. В.
Романец И. Н.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА КЛАССА ПРОЧНОСТИ Аt800

Высокопрочная арматурная сталь с пределом текучести 800 Н/мм² и более применяется для строительства из сборного железобетона (изготовление предварительно напряженных плит-перекрытий и колонн многоэтажных зданий) [1].

По сравнению с арматурной сталью класса А-III (А400), изготавливаемой по ГОСТ 5781-82, уровень цен на арматурную сталь класса Аt800 по ГОСТ 10884-94 в среднем на 6–10 % выше для аналогичных марок стали. Рынок высокопрочной арматурной стали характеризуется малым количеством производителей, а также практически полным отсутствием импорта, что способствует относительно стабильному уровню цен [2].

Основными поставщиками арматурного проката класса Аt800 на российский рынок являются: СЗАО «ММЗ» (Молдавия), РУП «БМЗ» (Беларусь), ОАО «Северсталь» и ОАО «ЗСМК».

Арматура с пределом текучести 800 Н/мм² в России производится либо с упрочняющей термомеханической обработкой, либо в горячекатаном состоянии из высоколегированной стали, например марки 23Х2Г2Т (класс А800 по ГОСТ 5781-82). Некоторую часть высокопрочной арматуры производят непосредственно предприятия стройиндустрии, в том числе и Уральского региона, путем термоупрочнения горячекатаных профилей из стали марок 25Г2С и 35ГС с отдельного электронагрева [1].

Для производства термоупрочненной арматуры класса Аt800 и более высоких классов прочности необходимы эффективные устройства охлаждения в потоке прокатного стана [3]. Такое оборудование имеется на стане 370, однако в соответствии с контрактными характеристиками предельным классом является А500С.

Регулирование свойств проката, осуществляется путем регулирования соотношения в микроструктуре количества мартенситной и феррито-перлитной составляющей. Технологическим фактором, позволяющим управлять микроструктурой и механическими свойствами упрочненного проката, является температура конца ускоренного охлаждения (температуры самоотпуска) [4].

Термоупрочнение арматурных профилей осуществляется турбулентным потоком воды, формирующимся в форсунке и действующим на прокат в охлаждающей трубе. Как показал опыт освоения производства арматурного проката класса Аt800 на стане 250-1 сортового цеха в 2002–2004 гг., определяющей характеристикой линии водяного охлаждения является время охлаждения, зависящее от длины активного участка и скорости конца прокатки.

Также данный опыт позволил определить необходимую температуру самоотпуска, что было учтено при выдаче технического задания на проектирование стана «370» и дальнейшей разработке технологии производства арматурного проката класса Аt800.

Целью работы является разработка технологии производства арматурных профилей № 12, № 14 класса Аt800 на стане «370». Для этого была проведена оценка технического состояния трехниточного короба ЛВО № 2. Все прямоточные охлаждающие форсунки с камерами охлаждения находились в удовлетворительном состоянии (среднее значение внутреннего диаметра камеры охлаждения 26–27 мм – при норме 24 мм). Исходя из полученных данных, разработаны рекомендации по настройке форсунок с учетом износа и по порядку их установки в линию термоупрочнения.

После выполнения рекомендаций была проведена опытная прокатка, в ходе которой была достигнута требуемая температура самоотпуска и выявлено наличие резерва линии термоупрочнения.

На основании вышеизложенного был сделан вывод о том, что на стане «370» существует техническая возможность проведения опытных прокаток арматуры класса Ат800. Она может быть реализована за счет комплектации всех посадочных мест коробов ЛВО № 2 устройствами охлаждения, рациональной их настройки, снижения температуры нагрева непрерывнолитых заготовок в печи и снижения скорости прокатки.

ГОСТ 10884-94 «Сталь арматурная термомеханически упрочненная для железобетонных конструкций» рекомендует для изготовления арматуры класса Ат800 ряд марок стали, существенно отличающихся содержанием основных легирующих элементов. Так, в рекомендованных марках массовая доля углерода находится в пределах 0,05–0,32 %, кремния 0,6–2,4 % и марганца 0,6–2,3 %.

Рентабельность производства арматуры этого класса прочности напрямую зависит от степени легирования стали. Для надежного обеспечения уровня прочностных свойств, более предпочтительны составы стали с повышенным содержанием марганца и кремния, обладающих высокой эффективностью и низкой стоимостью. В связи с этим была выбрана низколегируемая сталь марки 25Г2С, широко используемая для производства горячекатаной арматуры.

Исследованиями, проведенными во ВНИИЖБ [1] было установлено, что данная сталь, упрочненная до класса Ат800, обеспечивает технологичность сварки и низкую степень разупрочнения сварного шва.

В 2011 году в соответствии с разработанной технологией была проведена прокатка опытной партии термоупрочненного арматурного профиля № 14 класса Ат800 из стали марки 25Г2С по ГОСТ 10884-94, в количестве двух заготовок.

Температура заготовки перед первой клетью стана 370 составляла 1010–1050 °С. Температура самоотпуска, составила 370–390 °С.

По результатам механических испытаний прокат опытной партии не соответствовал требованиям ГОСТ 10884-94 для класса Ат800 по временному сопротивлению, а один образец и по величине равномерного удлинения. Однако произведенная продукция полностью соответствовала требованиям к арматурному прокату класса А600 по СТО АСЧМ 7-93.

Проведенная работа по обобщению и анализу данных позволила сделать вывод о том, что достигнутая температура самоотпуска не обеспечила необходимого упрочнения. При этом пластические свойства также были низкими. Следовательно, только изменением технологии термоупрочнения, приводящего к повышению прочности при одновременном снижении пластичности (и наоборот) получить требуемые свойства не удастся.

Была предложена корректировка химического состава стали, позволяющая повысить как прочностные, так и пластические свойства проката. Для повышения прочности и улучшения пластичности были дополнительно сужены диапазоны содержания углерода и марганца, а также применено микролегирование хромом и бором.

Кроме того, был разработан режим нагрева заготовок в нагревательной печи стана 370, предложены параметры настройки водоохлаждающих форсунок, разработаны температурно-скоростные режимы прокатки и термоупрочнения.

С использованием опытной технологии термоупрочнения на стане 370 сортового цеха были произведены две партии арматурного проката № 12 класса Ат800 по ГОСТ 10884-94. Прокатка данного металла осуществлялась впервые и проводилась под авторским контролем специалистов ЦЛК и ТГ ТУ.

Изготовление опытных партий осуществлялось из стали марки 25Г2С, микролегированной хромом и бором.

Прокатка проводилась в два этапа. При производстве первой партии, состоящей из пяти заготовок, осуществлялся подбор скорости прокатки, обеспечивающей достижение требуемой температуры самоотпуска и стабильного разделения заготовок при слитинг-процессе. Скорость прокатки плавно снижалась.

Вторая партия прокатывалась с подобранными ранее оптимальными параметрами.

По результатам испытаний образцов опытных партий непосредственно после прокатки отмечены отклонения от требований ГОСТ 10884-94 по пределу упругости и относительному удлинению. Однако после прокатки протекают процессы релаксации внутренних напряжений, и с течением времени пластические и упругие характеристики повышаются [5] (рис. 1, 2). По результатам испытаний, проведенных через 7 суток после прокатки, арматурный прокат полностью соответствовал классу Ат800 по ГОСТ 10884-94, в том числе по пластическим характеристикам (табл. 1).

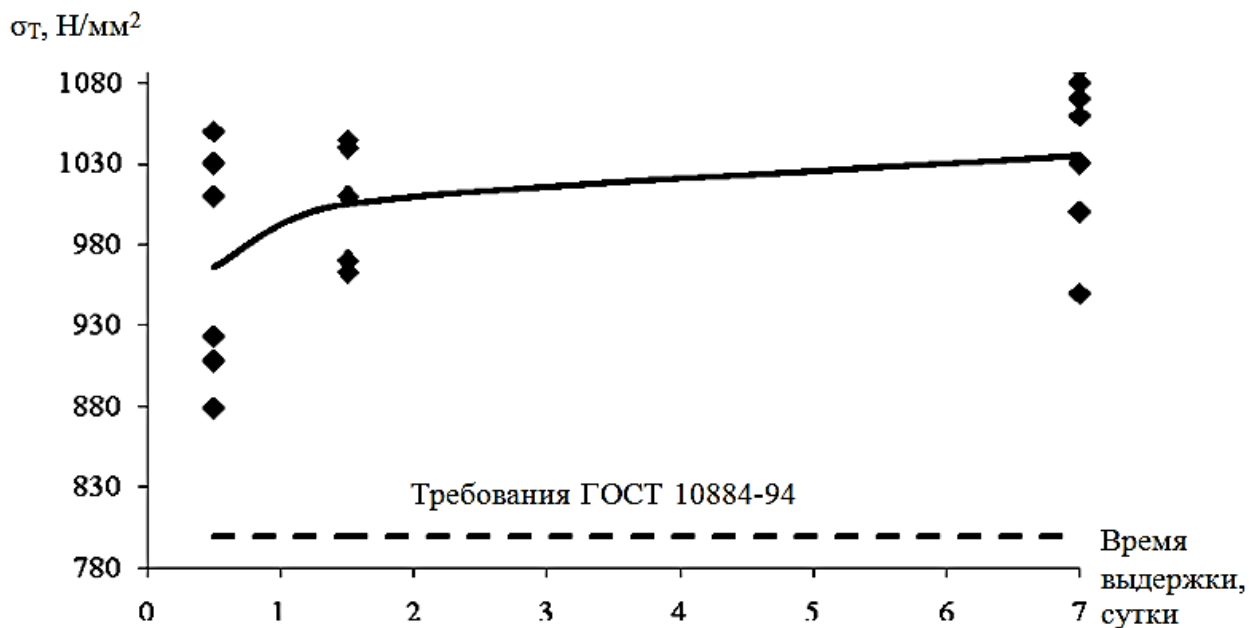


Рис. 1. Изменение предела текучести при выдержке проката

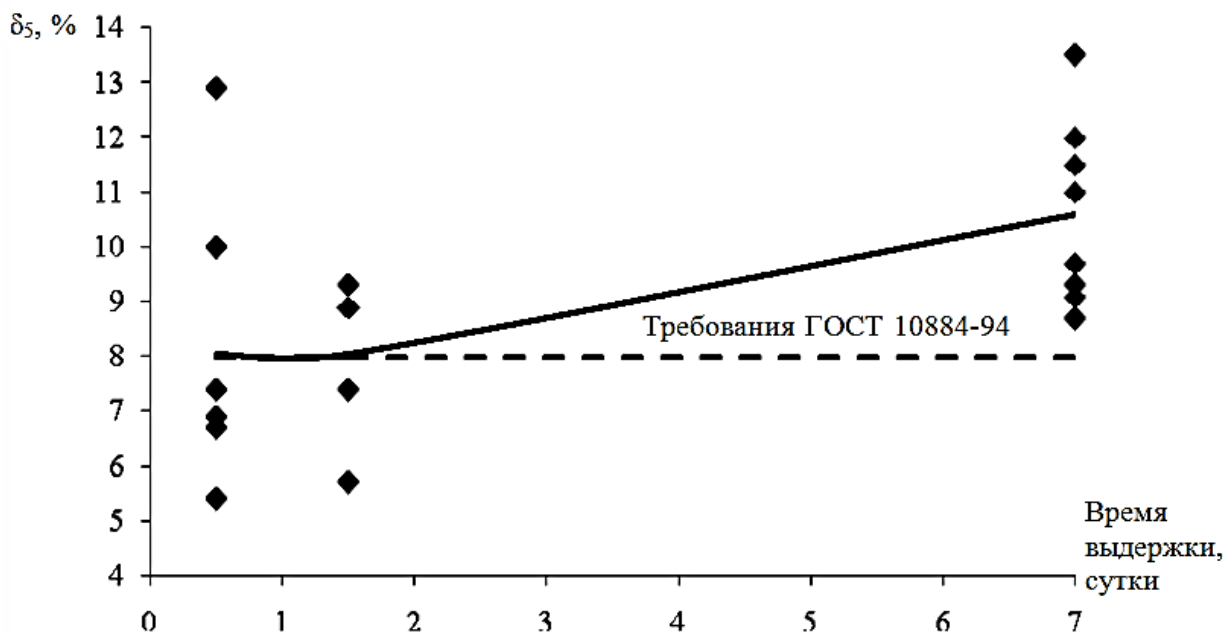


Рис. 2. Изменение относительного удлинения при выдержке проката

В процессе транспортировки пачек мостовым краном обнаружено наличие в пачках отдельных штанг, лопнувших посередине. При производстве термоупрочненной арматуры более низких классов прочности (А400С, А500С) данного явления не наблюдалось.

Таблица 1

Результаты испытаний арматуры № 12 класса Ат800 из стали марки 25Г2С по ГОСТ 10884-94.

Партия	Условия испытания	$\sigma_{0,02}$, Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	δ_p , %	Изгиб
1	до нагрева	860	1000	1250	12	4,5	уд
		800	1030	1300	8,7	4,5	уд
	после нагрева до 350 °С	–	1090	1260	11,5	2,5	–
			1080	1240	13,5	3	
2	до нагрева	730	1000	1270	9,7	3,5	уд
		810	950	1230	11	3,5	уд
	после нагрева до 350 °С	–	1070	1230	9,3	2,5	–
			1060	1190	9,1	2	
Требования ГОСТ 10884-94		не менее	не менее				уд
		680	800	1000	8	2	

По результатам исследования проб, вблизи места излома обнаружены продольные трещины напряжения, идущие у основания продольных ребер профиля (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид образца арматуры № 12 класса Ат800 вблизи места излома

Поскольку по результатам механических испытаний опытных партий арматуры обеспечен запас по прочностным свойствам (свыше 150 Н/мм²), разработаны корректировки в режим термоупрочнения арматурного профиля № 12 – повышена температура самоотпуска, а также отключена часть форсунок в линии термоупрочнения для обеспечения импульсного охлаждения, улучшающего условия теплоотвода. Аналогичным образом скорректирована опытная технология термоупрочнения профиля № 14.

По скорректированной технологии прокатка арматурного профиля № 14 класса Ат800. При прокатке профиля № 14 температура самоотпуска регулировалась изменением давления воды в форсунках № 2 и № 4 обеих ниток короба № 1 ЛВО №2. Скорость конца прокатки была постоянной.

По результатам испытаний образцов опытных партий непосредственно после прокатки отмечены отклонения от требований ГОСТ 10884-94 по пределу упругости и относительному удлинению. Однако, через 48 часов, вследствие релаксации внутренних напряжений, вся продукция соответствовала требованиям НД. Результаты испытаний и динамика изменения механических характеристик приведены в табл. 2.

На образцах, отобранных от заготовки № 1, через 24 часа после прокатки возникли трещины напряжения. На пробах от пачки заготовок 2 и 3, трещины появились через четверо суток после прокатки.

Кроме того, с целью выявления зависимости появления дефекта от площади сечения профиля и определения влияния скорости прокатки на температуру самоотпуска, была проведена прокатка арматурного профиля № 12, температура самоотпуска регулировалась изменением скорости прокатки, при постоянном расходе воды в линии термоупрочнения.

Таблица 2

Механические свойства арматуры № 14 класса Ат800

№ заготовки	Условия испытания		$\sigma_{0,02}$	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	δ_p
			Н/мм ²	Н/мм ²	Н/мм ²	%	%
1	после прокатки	до электронагрева	750	912	1155	4,3	3
	48 ч после прокатки	до электронагрева	730	862	1166	10	3
2–3	после прокатки	до электронагрева	770	943	1190	4,7	2
	48 ч после прокатки	до электронагрева	770	908	1180	10,5	2,4
		после электронагрева	780	976	1158	9,3	2
4–5–6	после прокатки	до электронагрева	708	770	1070	5,7	2,6
	48 ч после прокатки	до электронагрева	740	875	1110	11,5	3
		после электронагрева	750	903	1112	13,5	2
7	после прокатки	до электронагрева	610	787	1030	4	1,6
	48 ч после прокатки	до электронагрева	740	903	1116	5,7	2,8
		после электронагрева	750	877	1085	10,7	3
Требования ГОСТ 10884-94			не менее				
			680	800	1000	8	2

Через трое суток, при проведении испытаний на разрыв образцов арматуры № 12, на их поверхности обнаружены трещины. Испытания остановлены; результаты, полученные до остановки испытаний, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства арматуры № 12 класса Ат800

№ заготовки	Условия испытания	$\sigma_{0,02}$	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	δ_p
		Н/мм ²	Н/мм ²	Н/мм ²	%	%
2	до электронагрева	760	974	1030	2,2	1
	до электронагрева	870	1020	1056	4,7	2
	после электронагрева	970	984	1230	10	2
7	до электронагрева	750	919	1175	6,7	4
	после электронагрева	732	880	1139	4	2
Требования ГОСТ 10884-94		≥ 680	≥ 800	≥ 1000	≥ 8	≥ 2

Был произведен осмотр штанг арматурного проката № 14 и № 12; хранившихся на адьюстаже стана 370 сортового цеха, по результатам осмотра обнаружены трещины на поверхности проката всех пачек.

На возникновение трещин напряжения на поверхности арматурных прутков повлиял комплекс факторов:

1. Высокая скорость водяного охлаждения (свыше 300 °C/с) и низкая температура самоотпуска, заложенные в технологию для достижения требуемого уровня прочностных свойств, поскольку предпринимаемые ранее (в 2006 г. и в 2010 г.) попытки освоить данный вид продукции заканчивались неудачно по причине несоответствия прочности арматурного проката требуемому классу.

2. Высокая степень легирования хромом и бором, которое было применено так же для увеличения прочностных характеристик проката. Повышенное содержание данных элементов увеличило прокаливаемость, обеспечив сквозную закалку проката.

3. Повышенное содержание углерода по данным [3, 6, 10].

4. Возможное водородное охрупчивание. Низкие пластические характеристики термомеханически упрочненного арматурного проката, выявленные при первичных испытаниях, возросли в течение 1–7 суток до уровня, отвечающего требованиям ГОСТ 10884-94. Повышение пластичности происходило в основном без изменения прочностных характеристик. Такой резкий рост пластичности во время хранения металла на адьюстаже можно объяснить явлением диффузионного выделения водорода. По данным монографии А. Б. Сычкова [5], водородному охрупчиванию наиболее подвержен прокат из стали марки 25Г2С, что обусловлено искажением кристаллической решетки металла при закалке из-за относительно повышенного содержания в стали водорода, углерода и марганца. В случае опытной плавки дополнительное влияние оказало высокое содержание бора и хрома. При диффузионном выделении водорода резко повышается давление внутри пор, а сами поры являются концентраторами напряжений. Взаимное действие этих факторов приводит к появлению трещины.

Существующая технология обеспечивает получение требуемых механических свойств арматурного проката № 12 и № 14 из стали марки 25Г2С класса прочности Ат800 по ГОСТ 10884-94, но приводит к получению трещин напряжения, не позволяющих производить отгрузку продукции.

На основании анализа причин возникновения трещин напряжения, а также опыта ОАО «БМЗ» и ОАО «ЗСМК» [3, 10] скорректирован химический состав стали – снижено содержание углерода и хрома, и разработана новая технология охлаждения, основанная на методе термоциклирования. Участки охлаждения чередуются с участками промежуточного отогрева.

По новой технологии проведена прокатка опытной партии арматурного проката № 14 из стали марки 25Г2С со скорректированным химическим составом.

Температура самоотпуска регулировалась изменением скорости конца прокатки при постоянном расходе воды в линии ускоренного водяного охлаждения № 2 стана 370. Расход воды максимально возможный, были включены все три бустерных насоса. Температура снижалась от первой заготовки к третьей.

Результаты механических испытаний опытной партии (табл. 4) показали значительное улучшение пластических характеристик арматурного проката.

Таблица 4

Результаты механических испытаний опытной партии арматурного проката № 14

№ заготовки	Условия испытания	$\sigma_{0,02}$, Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	δ_p , %
1	до электронагрева	535	706	920	17,1	6,7
	после электронагрева	590	740	920	16	8,5
3 (1 ручей)	до электронагрева	593	793	1022	15,5	5,5
	После электронагрева	697	864	1040	15,29	3,3
3 (2 ручей)	до электронагрева	680	871	1080	16,5	6
	после электронагрева	698	888	1081	15,29	5,4
Требования ГОСТ 10884-94		не менее				
	Ат800	680	800	1000	8	2
	Ат600	–	600	800	12	4

Ступенчатое охлаждение и пониженное содержание углерода исключили случаи несоответствия относительного удлинения требованиям ГОСТ 10884-94, повысили относительное удлинение на 5–7 %, а равномерное – на 2–3 %.

В связи с большим разбросом температур по ручьям получить требуемые механические характеристики удалось получить только на прокате из заготовки № 3, охлаждавшемся в ручье № 2.

Была исследована микроструктура арматурного проката № 14. Прерывистый характер охлаждения способствует формированию структурной неоднородности, которая в поперечном сечении стержня проявляется в виде трех кольцевых зон с различной структурой: мартенсит отпуска на поверхности, бейнитный переходный слой и ферритно-перлитная область в центре прутка. Такая структура обеспечивает получение требуемых прочностных и пластических свойств.

ВЫВОДЫ

Таким образом, были подобраны оптимальный химический состав стали и технология прокатки и охлаждения, обеспечивающие снижение затрат на производство и обеспечение всего комплекса механических характеристик при отсутствии трещин напряжения на поверхности проката.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высокопрочная арматурная сталь* / Кугушин А. А., Узлов И. Г., Калмыков В. В., Мадатян С. А., Ивченко А. В. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
2. Мадатян С. А. Тенденции производства и потребления арматуры железобетонных конструкций в 2009–2010 гг. / С. А. Мадатян // *Черная металлургия*: Бюл. НТИ. – 2009. – № 6. – С. 22–24.
3. Юрьев А. Б. Развитие технологии термического упрочнения стержневого арматурного проката в ОАО «ЗСМК» / А. Б. Юрьев // *Металлург*. – 2010. – № 11. – С. 74–79.
4. Формирование структуры арматурного проката, термически упрочняемого по способам прерванной и прерывистой закалки / [Сидоренко О. Г., Федорова И. П., Сухой А. П. и др.] // *Сталь*. – 2012. – № 1. – С. 61–64.
5. Сычков А. Б. Технологические особенности производства арматурного проката широкого назначения: монография / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. В. Перчаткин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 499 с.
6. Любимов И. М. Исследование влияния термообработки с прокатного нагрева на прочностные свойства арматуры из низколегированных малокремнистых сталей / И. М. Любимов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1998. – № 1. – С. 46–49.
7. Термомеханическое упрочнение арматурного проката широкого сортамента в ОАО «ОЭМК» / Шляхов Н. А., Вакула Л. А., Лехтман А. А., Евсеев С. Л., Краснопольский В. М. // *Сталь*. – 2006. – № 4. – С. 68–72.
8. Бабаченко А. И. Служебные свойства высокопрочных арматурных сталей 20ГС и 25Г2С / А. И. Бабаченко, Ж. А. Дементьева, В. В. Ионов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 6. – С. 61–65.
9. Калмыков В. В., Стиваков В. И., Ровенская Т. В. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1969. – № 1. – С. 29–30.
10. Формирование структурно-фазовых состояний при термомеханическом упрочнении арматуры и волочении проволоки. Структурно-фазовые состояния перспективных материалов: монография / О. Ю. Ефимов, В. Я. Чинокалов, Л. М. Полторацкий, В. Е. Громов; отв. ред. В. Е. Громов. – Новокузнецк, 2009. – Гл. 13. – С. 312–351.

Дзюба А. Ю. – нач. лаб. сортового проката ОАО «ММК»;

Блохин М. В. – ведущий специалист лаб. сортового проката ОАО «ММК»;

Новицкий Р. В. – начальник сортового цеха ОАО «ММК»;

Романец И. Н. – ведущий технолог ОАО «ММК».

ОАО «ММК» – Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

E-mail: Ganzzee@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.10.2012 г.