

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный индустриальный университет

Посвящается 400-летию города Новокузнецка

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2017»

15 – 16 ноября 2017 г.

Труды
XX Международной научно-практической конференции
Часть 2

Новокузнецк
2017

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия
академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор М.В. Темлянец, д.т.н., профессор А.В. Феоктистов,
д.т.н., профессор Г.В. Галевский, д.ф.-м.н., профессор В.Е. Громов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., профессор Н.А. Козырев,
к.т.н., профессор С.Г. Коротков, к.т.н., доцент С.В. Фейлер

М 540 Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XX Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 474 с., ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и технологии производства, обработки и сварки металлов, энергоресурсосбережения, рециклинга и экологии в металлургии.

Конференция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-20433.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Администрация Кемеровской области
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
АО «Русал Новокузнецк»
АО «Кузнецкие ферросплавы»
ОАО «Черметинформация»
Издательство Сибирского отделения РАН
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»
Журнал «Вестник СибГИУ»
Журнал «IOP conference series: materials science and engineering»
ОАО «Кузбасский технопарк»
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2017

СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

УДК 539

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Громов В.Е.¹, Белов Е.Г.², Коновалов С.В.^{1,3}, Комиссарова И.А.¹, Иванов Ю.Ф.⁴

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru*

²*ООО «Евраз – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»,
г. Новокузнецк, Россия*

³*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия, ksv@ssau.ru*

⁴*Институт сильноточной электроники СО РАН,
г. Томск, Россия, yufi55@mail.ru*

Аннотация: Представлены результаты формирования структуры и механических свойств низкоуглеродистых сталей, используемых для производства двутавровой с использованием ускоренного охлаждения в потоке прокатного стана. Показано, что ускоренное охлаждение проката до температуры 830-8500°С позволило получить двутавр класса 345, а снижение температуры до 680-700 °С привело к дальнейшему росту прочностных характеристик на 20-50 МПа.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, механические свойства, структурно-фазовые состояния.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL REGIMES OF ACCELERATED COOLING ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL-PHASE STATES OF LOW-CARBON STEEL

Gromov V.E.¹, Belov E.G.², Konovalov S.V.^{1,3}, Komissarova I.A.¹, Ivanov Yu.F.⁴

¹*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru*

²*ООО "Evrast - United West Siberian Metallurgical Combine",
Novokuznetsk, Russia, popeleva_es@zsmk.ru*

³*Samara National Research University, Samara, Russia, ksv@ssau.ru*

⁴*Institute of high-current electronics Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, yu-fi55@mail.ru*

Abstract: The results of the formation of structure and mechanical properties of low-carbon steel using for production H-girder with the use of the accelerated cooling in the rolling mill are represented. It is shown that the accelerated cooling of the rolled metal down to the temperature 830-850 °C made it possible to obtain the H-girder of class 345, and the temperature reduction to 680-700 °C led to further 20-50MPa increase of the strength characteristics.

Key words: low-carbon steel, mechanical properties, structural-phase states.

В настоящее время при производстве арматуры и фасонных профилей применяются технологии термомеханического упрочнения, обеспечивающие повышение механических свойств без использования дорогостоящих легирующих добавок [1, 2]. Целенаправленное управление эксплуатационными свойствами проката и разработка оптимальных режимов его упрочнения должны базироваться на знании процессов структурообразования при различных технологических воздействиях [3].

Целью настоящей работы, продолжающей исследования, начатые в [3-9] являлось изучение формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств низкоуглеродистых сталей 09Г2С и 09Г2СФ, используемых для производства двутаврового профиля ДП155 класса 345 при ускоренном охлаждении в линии сортового стана 450.

Для производства опытных партий использовались непрерывнолитые заготовки сечением 150*200 мм из стали марки 09Г2С химического состава по ГОСТ 19281 и из стали марки 09Г2СФ.

Функционально установка ускоренного охлаждения (УУО) состоит из участков избирательного и общего охлаждения, расположенной между ними камеры сброса отработанной воды и отсечного устройства. От передних и задних концов опытных раскатов отбирались пробы длиной 350-400 мм для исследования микроструктуры и определения механических свойств.

Температурно-скоростные параметры опытной прокатки и последующего ускоренного охлаждения проката в УУО представлены в таблице 1. Полученные результаты исследования механических свойств низкоуглеродистой стали приведены в таблице 2. Видно, что горячекатаный двутавр (температура перед холодильником 1010-1030°C, режим Р1) химического состава по ГОСТ 19281 не обеспечивает прочностных свойств класса 345 по ГОСТ 19281. Охлаждение раската по режиму Р3 (до 830-850°C) при прочих равных условиях позволило увеличить предел текучести проката на 30-65 МПа и получить требуемый комплекс свойств. Дальнейшее снижение температуры до 680-700 °С (режим Р2) привело к росту предела текучести еще на 20-50 МПа.

Таблица 1 – Режимы охлаждения проката

№ плавки	№ режима	V, м/с	T, °C		Давление на подводах, атм				
					I			II	
			после 3 клетки	перед холод	1н	1с	2в	3н	4в
585439	P1	5,5	1100-1130	1010-1030	-	-	-	-	-
585439	P2	5,5	1090-1120	680-700	2,4	4,5	2,3	3,1	3,1
585439	P3	5,5	1120-1160	830-850	2	3	2	2,1	2,2
485913	P4	5,5	1120-1160	830-850	2	3	2	2,1	2,2

Таблица 2 – Механические свойства проката

№ режима	Характеристики	Маркировка									
		полки				стенка					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P1	σ_b , МПа	485	475	475	475	480	490	495	480	480	495
	σ_T , МПа	340	315	325	325	315	350	355	350	345	345
	δ_5 , %	39	36	32	30	38	36	34	38	38	38
P2	σ_b , МПа	530	520	540	510	710	600	620	540	550	740
	σ_T , МПа	425	410	430	400	670	530	540	450	460	680
	δ_5 , %	30	30	30	29	22	22	22	30	28	18
P3	σ_b , МПа	495	510	510	490	590	520	495	495	490	510
	σ_T , МПа	370	390	390	360	500	400	365	370	350	380
	δ_5 , %	33	30	30	33	26	32	36	36	38	36

№ режима	Характеристики	Маркировка									
		полки				стенка					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Р4	σ_b , МПа	530	540	520	510	560	-	530	-	560	-
	σ_T , МПа	430	440	405	390	465	-	425	-	450	-
	δ_5 , %	27	28	31	26	24	-	30	-	30	-

Микролегирование стали 09Г2С ванадием и ускоренное охлаждение в УУО по режиму Р4 (температура 830-850 °С) обеспечивает тот же уровень прочностных характеристик, что и охлаждение до 680-700 °С (режим Р2) стали 09Г2С без ванадия.

Исследование распределения значений предела текучести по элементам профиля режимов Р1, Р2 и Р3 показало (рисунок 1), что с увеличением интенсивности охлаждения проката в УУО растет разброс значений предела текучести по ширине стенки профиля: для режимов Р2 и Р3 эта разница достигает 230 и 150 МПа, соответственно. Максимальные значения получены вблизи места сочленения полки и стенки ускоренно охлажденного двутавра, минимальные – в центральной части стенки. Такой характер распределения прочностных свойств говорит о более интенсивном охлаждении соответствующих участков профиля, обусловленным конструктивными особенностями УУО.

Значения ударной вязкости всех исследованных режимов и сталей при всех видах испытаний значительно превышают требования стандарта. Максимальное сопротивление хрупкому разрушению двутавра из стали 09Г2С показали образцы проката, охлажденного по режиму Р2.

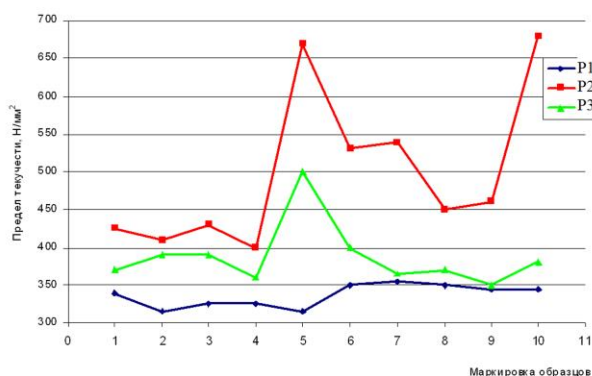


Рисунок 1 – Распределение предела текучести по элементам профиля

Исследование макроструктуры ускоренно охлажденного двутавра выявило неоднородность в сечении профиля, которая проявляется в виде двух участков различной травимости: наружного (поверхностного) слоя и основного сечения (рисунки 2 и 3). Видно, что на полках профиля при ускоренном охлаждении по режимам Р2 и Р3 получен равномерный по толщине упрочненный поверхностный слой, с ростом интенсивности охлаждения увеличивается его сплошность и толщина. В местах сочленения полок и стенки профиля при охлаждении последнего по режиму Р2 прокаливаемость практически сквозная. В центральной части стенки упрочненный слой минимален и располагается с одной стороны (верх профиля при прокатке), а при охлаждении по режиму Р3 упрочненный слой на стенке получен только вблизи места ее сочленения с полкой. Такой характер распределения слоя объясняет разброс прочностных свойств по сечению двутавра. Проведенные металлографические исследования уточнили структурный состав и глубину упрочненного слоя (рисунок 4).



Рисунок 2 – Макроструктура двутавра режима Р2

Микроструктура по элементам профиля проката определяется условиями охлаждения. В поверхностном слое полка проката, упрочненного по режиму Р2, формируется структура продуктов отпуска мартенсита. В слоях, прилегающих к поверхностному, получены структуры, образованные в результате распада переохлажденного аустенита по промежуточному механизму [10]. Структура продуктов распада переохлажденного аустенита по промежуточному механизму неоднородна по глубине. На участках, прилегающих к поверхностному слою, характерно наличие в бейнитной составляющей равномерно распределенных мелких выделений избыточной фазы. При удалении от поверхности проката происходит увеличение количества выделений по полю шлифа и по границам бейнитных пакетов. В более глубоких слоях образуются структуры механической смеси феррита и пакетов бейнита с выделениями зерен избыточного феррита. Количество механической смеси феррита и бейнита уменьшается с удалением от поверхности проката в результате снижения скорости охлаждения и происходит образование структуры, состоящей из феррита и перлита.

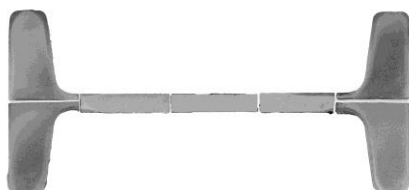
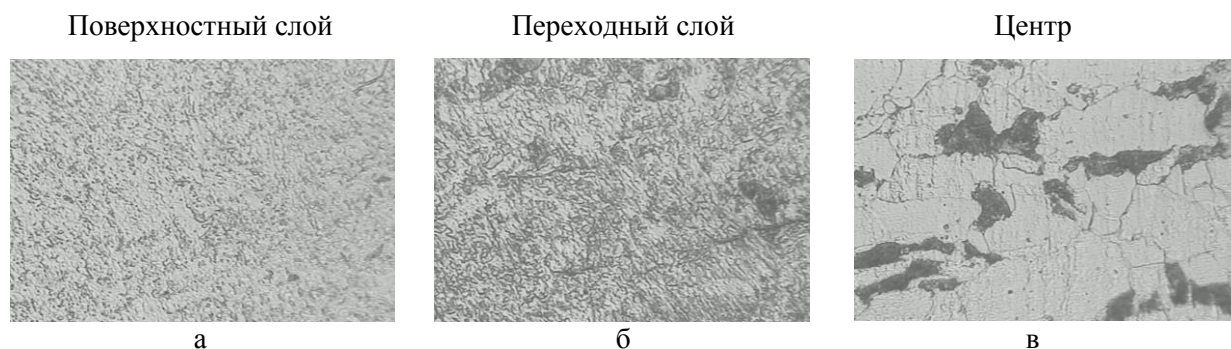


Рисунок 3 – Макроструктура двутавра режима Р3



а) образец VI-A; б) образец VI-A; в) образец VI-A

Рисунок 4 – Микроструктура двутавра режима Р3, $\times 400$

Формирование структуры стали на стенке профиля в местах интенсивного охлаждения аналогичное. Для проката, охлажденного по режиму Р3, характерно отсутствие поверхностного слоя продуктов отпуска мартенсита. Строение структуры в упрочненных слоях аналогично рассмотренному при распаде переохлажденного аустенита по промежуточному механизму.

Таким образом, промышленные эксперименты по ускоренному охлаждению образцов из низкоуглеродистой стали позволили установить закономерности формирования структуры, фазового состава и механических свойств.

Установлено, что горячекатаный двутавр из стали 09Г2С не обеспечивает прочностных свойств класса 345 по ГОСТ 19281, тогда как ускоренное охлаждение проката до температуры 830-850°C позволило получить двутавр класса 345, уменьшение температуры до 680-700 °C привело к дальнейшему росту прочностных характеристик на 20-50 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-420530 p_a.

Библиографический список

1. Юрьев А.Б. Термомеханическое упрочнение строительной арматуры. – Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
2. Ефимов О.Ю. Структурно-фазовые состояния и технология производства упрочненной стальной арматуры и чугунных валков. – Новокузнецк: Изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2008. – 300 с.
3. Ефимов О.Ю., Юрьев А.Б., Громов В.Е. и др. Формирование структурно-фазовых состояний в арматуре большого диаметра // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 54-56.
4. Белов Е.Г., Чинокалов В.Я., Полторацкий Л.М. и др. Влияние ускоренного охлаждения на формирование структурно-фазовых состояний и механические свойства двутавра // Проблемы черной

металлургии и материаловедения. – 2009. - №3. - С.62-67.

5. Белов Е.Г., Ефимов О.Ю., Полторацкий Л.М. и др. Особенности формирования геометрических размеров и механических свойств двутавровой балки при прокатке с принудительным охлаждением // Тезисы докладов Бернштейновских чтений по термомеханической обработке металлических материалов. – М.: МиСИС, 2009. - С.32.

6. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Кондратова О.А., Белов Е.Г., Костерев В.Б. Формирование механических свойств поверхности низкоуглеродистой стали при термомеханическом упрочнении // Обработка металлов. - 2017. - №2(75). – С. 38-44.

7. Белов Е.Г., Ефимов О.Ю., Полторацкий Л.М. и др. Формирование геометрических размеров и механических свойств двутавровой балки для шахтных монорельсовых дорог // Известия вузов. Черная металлургия. - 2009. - № 12. - С.18-21.

8. Белов Е. Г., Чинокалов В. Я., Полторацкий Л. М., Ефимов О. Ю., Громов В. Е. Влияние ускоренного охлаждения на формирование структурно-фазовых состояний и механические свойства двутавра // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2009. - №3. – С. 1-6.

9. Белов Е.Г., Полторацкий Л.М. Ефимов О.Ю., и др. Формирование структуры и механических свойств при ускоренном охлаждении двутавровой балки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. - № 2. - С. 33-37.

10. Металлография железа. Т.2. Перев. с англ. Под ред. Ф.Н. Тавадзе. – М.: Металлурги, 1972. – 284 с.

УДК 669.146+669.018.298.3

КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ БОРА И АЗОТА НА ОБРАТИМУЮ ОТПУСКНУЮ ХРУПКОСТЬ

Мазничевский А.Н.^{1,2}, Сприкут Р.В.¹, Заславский А.Я.^{1,2}, Гойхенберг Ю.Н.²

¹ООО «Ласмет»,

г. Челябинск, chiefteh@lasmet.ru, mail@lasmet.ru

²Южно-Уральский государственный университет,

г. Челябинск, goikhenbergyn@susu.ru

Аннотация: Проведено сравнительное исследование склонности борсодержащих и молибденсодержащих сталей к обратимой отпускной хрупкости с помощью сериальных кривых испытаний ударной вязкости и микрофрактографии изломов, полученных на сканирующем электронном микроскопе. Определён характер разрушения ударных образцов в зависимости от условий их отпуска (температуры и скорости охлаждения). Показано, что борсодержащие стали промышленного производства не проявляют склонности к обратимой отпускной хрупкости. Установлено, что введение бора в сталь с низкой концентрацией азота (0,004 мас. %) приводит к снижению абсолютной величины ударной вязкости, но при этом не охрупчивает сталь. Увеличение концентрации азота до 0,016 мас. % приводит к охрупчиванию, независимо от концентрации вводимого бора (в пределах до 0,025 мас. %).

Ключевые слова: борсодержащая сталь, бор, азот, механические свойства, обратимая отпускная хрупкость, молибден, никель, ударная вязкость, улучшение свойств стали.

COMPLEX INFLUENCE OF BORON AND NITROGEN ON TEMPERED MARTENSITE EMBRITTLEMENT

Maznychevsky A.N.^{1,2}, Sprikut R.V.¹, Zaslavsky A.Ya.^{1,2}, Goichenberg Yu.N.²

¹ООО Lamet, Chelyabinsk, chiefteh@lasmet.ru, mail@lasmet.ru

²South Ural State University, Chelyabinsk, goikhenbergyn@susu.ru

Abstract: A comparative study of the propensity of boron-containing and molybdenum-containing steels to tempered martensite embrittlement was carried out. Investigation conducted by serial curves of toughness tests and studying of fracture microfractograms obtained with a scanning electron microscope. The character of destruction of samples is determined depending on the conditions of their tempering (temperature and cooling rate). It is shown, that boron-containing steel of industrial production does not show a