

**ВЛИЯНИЕ ДРОБНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ В ЧЕРНОВОЙ КЛЕТИ И СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛЯХ, МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ НИОБИЕМ И ВАНАДИЕМ, НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ ПРОКАТА**

**В. И. Большаков, д. т. н., проф., Г. Д. Сухомлин, д. т. н., проф.,  
Д. В. Лаухин, д. т. н., А. В. Бекетов, к. т. н., доц.,  
Х. А. Аскеров\*, к. т. н., С. В. Иванцов, доц., м.н.с.**

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры»*

*\* Азербайджанский архитектурно строительный университет*

Анализ развития строительства жилищного фонда Украины показывает тенденции к увеличению этажности зданий, что, в первую очередь, связано со значительным удорожанием земельных ресурсов, особенно в центральных частях мегаполисов. Вместе с тем, при увеличении этажности зданий может остро встать проблема обеспечения жесткости и прочности каркаса. При этом необходимо отметить, что использование металлических конструкций в современных каркасах зданий высотой до 25 этажей является в некоторых случаях более экономически эффективным по сравнению с железобетоном, а с увеличением этажности сталь является незаменимым материалом для основного каркаса здания [1].

По данным [2–4], большая эффективность может быть достигнута при замене сталей обыкновенного качества на высокопрочные класса С590, однако рекомендуемые ДБН стали данного класса содержат в значительных количествах дорогостоящие легирующие элементы, что приводит к удорожанию всего здания в целом.

В связи с вышеизложенным, исследования, направленные на снижение металлоемкости каркаса путем внедрения в строительство сталей повышенной прочности отечественного производства, являются весьма актуальными.

Расчет сечений конструкции ведется по величине напряжений от рабочей нагрузки на основе гарантируемой минимальной величины предела текучести стали [4–9]. В таблице 1 приведены наиболее распространенные отечественные стали для металлических конструкций.

Анализ требований действующей в строительстве нормативно-технической документации и данных табл. 1 показывает, что при возведении многоэтажных зданий с учетом действующих при этом нагрузок рекомендуется использовать свариваемые углеродистые стали класса прочности С245 – С285 (стали СтЗпс, СтЗГпс), хотя для наиболее нагруженных элементов, например колонн, могут быть использованы и стали более высокой прочности: С345 (марки 09Г2, 14Г2, 15ХСНД, 12Г2С1 и др.) [10]. В каркасах зданий повышенной этажности и при перекрытии значительных пролетов рационально применение низколегированных сталей высокой прочности классов С375 и С390 (например, марок 14Г2, 10Г2С1, 15ХСНД, 10ХСНД и др.). В современ-

## Строительство, материаловедение, машиностроение

ных зданиях (свыше 16 этажей) может быть оправдано применение сталей высокой прочности С440 и выше (например, 16Г2АФ, 18Г2АФпс, 12Г2СМР, 14Х2ГМР и др.) [11, 12].

Таблица 1

*Применяемые в строительстве стали по действующей  
нормативно-технической документации*

Наименование стали	Марки по действующим стандартам	
	Марка стали	Обозначение стандарта
С235	Ст3кп2	ГОСТ 380–88, ГОСТ 535–88
С245	Ст3пс5	ГОСТ 380–88, ГОСТ 535–88
	Ст3сп5	ГОСТ 380–88, ГОСТ 535–88
С255	Ст3Гпс, Ст3Гсп	ГОСТ 380–88
С275	Ст3пс	ГОСТ 380–88
С285	Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп	ГОСТ 380–88
С345	12Г2С	–
	09Г2С	ГОСТ 19282–73
С345Д	12Г2СД	–
	09Г2СД	–
С345К	10ХНДП	ГОСТ 19282–73
С375	12Г2С	–
С375Д	12Г2СД	–
С390	14Г2АФ	ГОСТ 19282–73
С390Д	14Г2АФД	ГОСТ 19282–73
С390К	15Г2АФДпс	ГОСТ 19282–73
С440	16Г2АФ	ГОСТ 19282–73
С440Д	16Г2АФД	ГОСТ 19282–73
С590	12Г2СМФ	–
С590К	12ГН2МФАЮ	–

Вместе с тем, в работе [13] были систематизированы данные по качественным характеристикам металлопроката, производимого отечественными металлургическими комбинатами, с целью определения наиболее перспективных марок сталей для современного высотного строительства. На основе приведенных в [13] данных можно сделать вывод, что при выборе стали для проектирования металлоконструкций каркасного строительства следует отдавать предпочтение низкоуглеродистым микрولةгированным сталям, поскольку они при одинаковом уровне прочности имеют более высокий уровень пластичности по сравнению с другими сталями. Несмотря на относительно высокую стоимость сталей этого типа, их применение в промышленном и гражданском строительстве является экономически целесообразным благодаря экономии

металла за счет уменьшения сечения и снижения металлоемкости изделий при использовании сталей повышенной прочности.

Одной из наиболее перспективных технологий производства высокопрочного проката из малоуглеродистых микрولةгированных сталей является контролируемая прокатка [14].

Стали, произведенные по технологии контролируемой прокатки имеют ферритно-перлитную структуру и обладают высоким комплексом механических свойств [15]:  $\sigma_T$  – не ниже 500 МПа,  $\sigma_B$  – не ниже 590 МПа и  $\delta_5$  – не менее 20 %. Однако в настоящее время такие стали не могут использоваться в строительстве, так как в структуре металла присутствует ферритно-перлитная полосчатость, приводящая к значительной анизотропии свойств по трем направлениям (вдоль, поперек и по толщине металлопроката), что не допускается требованиями действующей в строительстве нормативно-технической документации.

Вместе с тем, сотрудниками ГВУЗ «ПГАСА» совместно с ПАО «ММК им. Ильича» был разработан новый режим контролируемой прокатки, применение которого позволило значительно снизить анизотропию механических характеристик листового проката по трем направлениям [16] за счет снижения ферритно-перлитной полосчатости.

Исследования и испытания, проведенные в работе [16], были направлены на повышение дисперсности феррита и перлита, но при этом отсутствуют количественные данные о структурных отклонениях, которые влияют на механические свойства. В связи с этим, целью настоящей работы была оценка изменений ферритно-перлитной полосчатости в зависимости от изменений режимов контролируемой прокатки на комплекс механических свойств толстолистового проката в пределах марочного состава.

Химический состав исследуемых сталей, прокатанных по штатному и предложенному в [16] режимам приведен в таблице 2.

Для количественной оценки слабых отклонений параметров ферритно-перлитной структуры в зависимости от изменений содержания углерода и колебаний температурно-деформационных режимов контролируемой прокатки был определен коэффициент перлитной полосчатости (КПП). Для этого были созданы монтажи, сочетающие 6 снимков микроструктур, которые были сделаны на  $\frac{1}{4}$  толщины листа для каждой из сталей. Далее на всех монтажах провели по 20 параллельных линий одинаковой длины на равных расстояниях перпендикулярно к ферритно-перлитным полосам.

После нанесения линий подсчитали количество пересечений каждой линии с перлитной составляющей, при этом за одно пересечение считали если длина перлитной полосы к толщине соотносится не менее чем 5 : 1. Затем определили среднее арифметическое всех 20 сечений для каждого монтажа, а полученную величину принимали за КПП.

Анализ монтажей для всех концентраций углерода, приведенных в таблице 2 показывает, что при снижении содержания углерода в стали наблюдается и некоторое снижение полосчатости, расстояние между полосами увеличивается, а сами полосы утоняются, соответственно снижая значения КПП. Однако протяженность перлитных полос остается практически неизменной и,

## Строительство, материаловедение, машиностроение

следовательно, понижение КПП незначительно даже при снижении содержания углерода в стали от 0,11 до 0,07 %.

Таблица 2

*Химический состав и механические свойства толстых листов, прокатанных по штатным и предложенным режимам*

Режим прокатки	Химический состав, %							
	C	Mn	Si	V	Nb	Ti	S	P
10Г2ФБ – 0,11 % С								
Штат.	0,11	1,62	0,25	0,061	0,032	0,017	0,005	0,016
Эксп.	0,11	1,62	0,25	0,061	0,032	0,017	0,005	0,016
10Г2ФБ – 0,09 % С								
Штат.	0,09	1,63	0,24	0,091	0,038	0,018	0,004	0,014
Эксп.	0,09	1,63	0,24	0,091	0,038	0,018	0,004	0,014
Х70 - 0,07 % С								
Штат.	0,07	1,56	0,29	0,063	0,048	0,019	0,005	0,014
Эксп.	0,07	1,56	0,29	0,063	0,048	0,019	0,005	0,014

В готовых листах, прокатанных по экспериментальным режимам, наблюдаются более низкие значения КПП, чем в листах, прокатанных по штатной технологии. Это, с одной стороны, связано с уменьшением общей протяженности перлитных полос вследствие более частого прерывания их ферритом. С другой стороны, перлитные полосы становятся более размытыми по ширине за счет формирования вокруг одной протяженной множества мелких перлитных колоний, соотношение длины к ширине которых не превышает 5 : 1. Такие сверхмелкие колонии не учитывали в подсчете пересечений линий исходя из условия методики. Необходимо отметить, что более высокие значения прочностных, пластических и вязкостных характеристик в листах, прокатанных по предложенному режиму, связаны не только с повышением дробности перлитных полос, но также с измельчением зерна феррита и насыщением его субзерненными границами (табл. 3).

Таблица 3

*Влияние прерывистости перлитных полос на механические свойства толстых листов, прокатанных по штатным и предложенным режимам*

Сталь	Режим прокатки	КПП	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$KCV^{20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$KCV^{60}$ , Дж/см <sup>2</sup>
10Г2ФБ (0,11 %С)	штатная	19,4	520	590	34	146	139
	эксперим	–	550	620	35	161	157
10Г2ФБ (0,09 %С)	штатная	18,5	535	595	35	135	117
	эксперим	9,8	545	610	36	153	138
Х70 (0,07 %С)	штатная	13,2	520	580	33	110	105
	эксперим	–	535	600	35	159	137

Для выявления влияния ферритно-перлитной полосчатости на изменение значений ударной вязкости были проведены динамические испытания листов толщиной 18 и 40 мм из стали S355j2, изготовленной по предлагаемому режиму.

Все образцы для испытаний на ударный изгиб вырезали из поверхностных областей, так чтобы длина образцов совпадала с направлением прокатки, при этом V-образный концентратор напряжений наносили со стороны плоскости прокатки. Для листов толщиной 40 мм испытывали дополнительную партию образцов, вырезанных на расстоянии  $\frac{1}{4}$  от поверхности листа, надрез наносили со стороны параллельной плоскости прокатки.

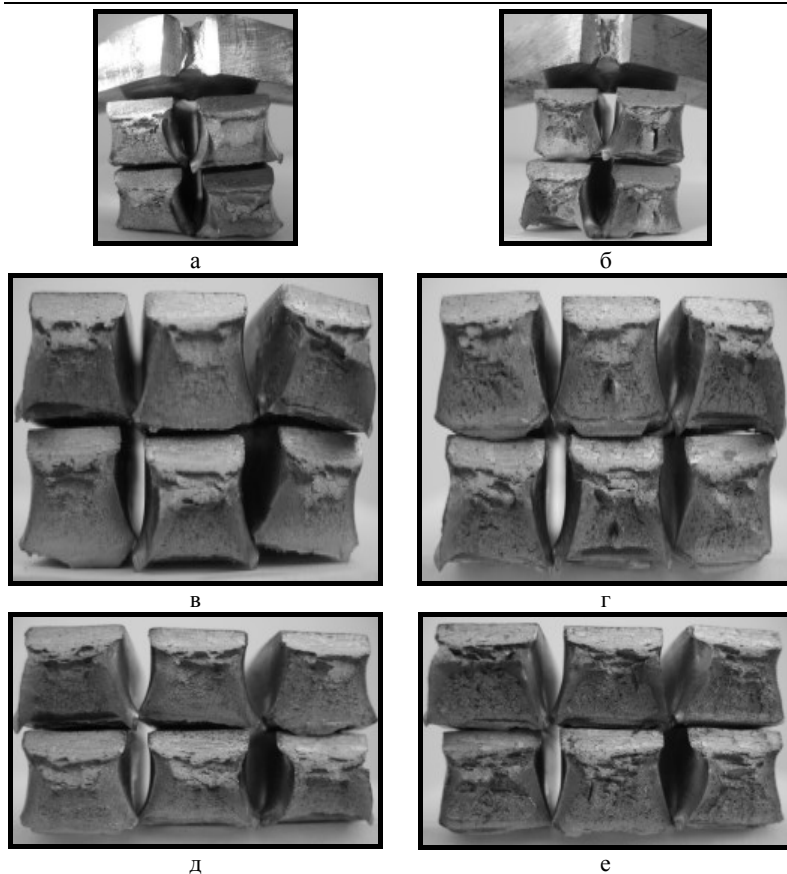
Такое расположение образцов было выбрано с целью исследования количества вязкой составляющей в изломе в зависимости от температуры испытаний (+20 и – 40 °С), прерывистости перлитных полос (режимов прокатки) и увеличения толщины проката от 18 до 40 мм.

Макрофрактографические исследования показали, что поверхность всех образцов характеризуется почти полным отсутствием металлического блеска, наличием гребешков и значительными утяжками, что соответствует вязкому характеру разрушения. Количество вязкой составляющей составляло более 95 % (рис. 1). При этом ни один образец не достиг полного разделения тела на две части (разделенные на снимках образцы представлены после долома). Результаты испытаний на ударный изгиб представлены в таблице 4.

*Таблица 4*

*Результаты проведенных испытаний на ударный изгиб*

№ п/п	Маркировка	$KCV, \text{ Дж/см}^2$	Температура испытаний, °С	Место отбора образца
Толщина проката 18,0 мм				
1	3.1.7	284	+20	поверхность
2	3.1.8	274	«	«
3	3.1.9	284	«	«
4	3.1.10	245	–40	«
5	3.1.11	250	«	«
6	3.1.12	244	«	«
Толщина проката 40,0 мм				
7	2.1.10	238	+20	поверхность
8	2.1.11	251	«	«
9	2.1.12	254	«	«
10	2.1.13	184	–40	«
11	2.1.14	217	«	«
12	2.1.15	207	«	«
13	2.1.16	237	+20	1/4 толщины
14	2.1.17	253	«	«
15	2.1.18	267	«	«
16	2.1.19	172	–40	«
17	2.1.20	179	«	«
18	2.1.21	186	«	«



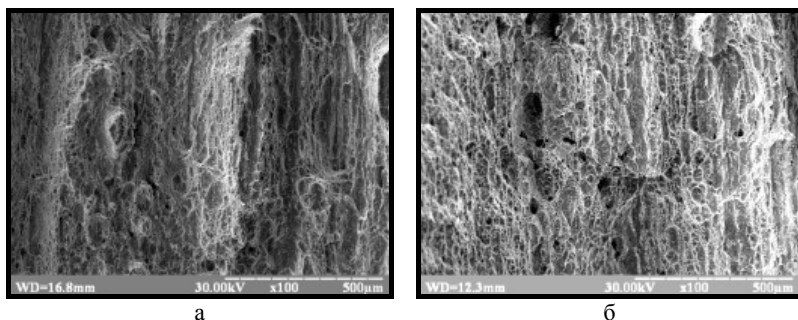
**Рис. 1.** Макроструктура поверхностей разрушения образцов стали S355j2 толщиной 18 мм – а, б и 40 мм – в, г – поверхность, д, е  $\frac{1}{4}$  толщины, испытанных при положительных  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  – а, в, д; и отрицательных  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  – б, г, е температурах.  $\times 2$

Микрофрактографический анализ V-образных образцов толстолистовой стали показал, что в поверхностях разрушения для стали, прокатанной по экспериментальному режиму, присутствуют ферритные прослойки (вязкие участки), которые часто прерывают перлитные полосы (рис. 2). Такое формирование структуры феррита и перлита способствует повышению значений ударной вязкости в образцах, прокатанных по экспериментальным режимам.

Для листов, прокатанных по режимам горячей деформации, характерно наличие большого разброса значений ударной вязкости в зависимости от направления надреза и способа вырезки образцов. Это связано с наличием разви-

той перлитной полосчатости, присущей этой обработке. В образцах, прокатанных по экспериментальным режимам, наблюдается выравнивание значений ударной вязкости для всех вариантов вырезки образцов, температуры испытания или исходной толщины листа.

Микроструктурный анализ изломов показал, что повышение показателей ударной вязкости связано с более частым прерыванием перлитных полос ферритной составляющей. Таким образом, распространение трещины затруднено из-за более частых пересечений с границами и субграницами зерен.



**Рис. 2.** Микрофрактографический анализ образцов из стали S355j2, прокатанной по экспериментальному режиму: а – лист толщиной 18, б – 40 мм

#### **Выводы:**

1. В каркасах зданий повышенной этажности и при перекрытии значительных пролетов рационально применение низколегированных сталей высокой прочности, которые в условиях отечественных металлургических предприятий в настоящее время могут производиться по технологии контролируемой прокатки.
2. Для широкого внедрения сталей контролируемой прокатки в строительную индустрию необходимым является снижение анизотропии свойств металлопроката по трем направлениям (вдоль, поперек и по ширине) путем снижения феррито-перлитной полосчатости.
3. Разработана экспериментальная методика количественной оценки дробления феррито-перлитных полос, которая была проверена при оценке влияния режимов контролируемой прокатки на структуру металла.
4. Показано, что в листах, прокатанных по режимам, предложенным в работе [16], наблюдаются более низкие значения коэффициента прерывистости перлитных полос и более высокие значения комплекса механических свойств, чем в листах, прокатанных по технологии классической контролируемой прокатки.
5. Общее диспергирование перлита совместно с измельчением и насыщением субзернными границами феррита приводит к повышению ударной вязкости.
6. Снижение протяженности перлитных полос за счет более частого прерывания их ферритной составляющей приводит к выравниванию значений ударной вязкости в листовом прокате толщиной 18 и 40 мм.
7. В структурах металла, сформированных после предложенных режимов прокатки, распространение трещины затруднено из-за более частых пересечений магистральной трещиной границ и субграниц.

Список использованных источников

1. Жербин М. Широкое применение стальных конструкций в строительстве – важный фактор его совершенствования / Михаил Жербин, Владимир Большаков // Нові технології в будівництві. – 2001. – №2. – С. 10–14.
2. Жербин М. М. Высокопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование) / Жербин М. М. – К. : „Будівельник”, 1974. – 160 с.
3. Жербин М. М. Металлические конструкции / М. М. Жербин, В. А. Владимирский. – К. : Вища школа, 1986. – 215 с.
4. Эффективная технология упрочняющей термообработки изделий из инструментальных и конструкционных марок сталей / Л. Н. Дейнеко, И. Ю. Крипак, В. С. Никитченко, та ін. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. – Ч. 1. – 2003. – С. 62–66.
5. Большаков В. И. Новые материалы и технологии в промышленном и гражданском строительстве / Большаков В. И. – К. : Вища школа, 1990. – 52 с.
6. Жербин М. М. Металлические конструкции / М. М. Жербин, В. А. Владимирский. – К. : Вища школа, 1986. – 215 с.
7. Большаков В. И. Использование сталей повышенной прочности в новом высотном строительстве и реконструкции / В. И. Большаков, О. В. Разумова. – Дніпропетровськ: Пороги, – 2008. – 216 с.
8. Большаков В. И. Основы формирования стальных каркасов многоэтажных и высотных зданий / В. И. Большаков, М. М. Жербин, О. В. Разумова. – Днепропетровск, ПГАСА, 2003. – 124 с.
9. Жербин М. М. Новая концепция модернизации и надстройки существующих малоэтажных жилых зданий до любого количества этажей / М. М. Жербин, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Gaudeamus, 2000. – 50 с.
10. Большаков В. И. Разработка и использование сталей повышенной и высокой прочности в строительстве / Большаков В. И. // Вісник Академії будівництва України. – 1997. – №1. – С. 21–26.
11. Мельников Н. П. Металлические конструкции: Современное состояние и перспективы развития / Мельников Н. П.. – М. : Стройиздат, 1983. – 543 с.
12. Харт Ф. Атлас строительных конструкций. – Многоэтажные здания / Ф.Харт, В. Хенн, Х. Зонтаг – М. : Стройиздат, 1977. – 351 с.
13. Большаков В.И. Обоснование выбора материала для строительных металлических конструкций / В.И. Большаков, Г.М. Воробьев, Д.В. Лаухин [та ін.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2008. – Вып.45, Ч.3. – С. 116–122.
14. Контролируемая прокатка / В. И. Погоржельский, Д. А. Литвиненко, Ю. А. Матросов, А. В. Иваницкий. – М. : Металлургия, 1979. – 183 с.
15. Касаткин Б. С. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций / Б. С. Касаткин, В. Ф. Мусияченко. – К. : Техника, 1970. – 187 с.
16. Лаухин Д.В. Формирование структур полигонизации и рекристаллизации в аустените и феррите при контролируемой прокатке низкоуглеродистых микрелегированных сталей / Д.В. Лаухин // Новини науки Придніпров'я. – 2011. – №1. – С. 15 – 24.