

УДК 621.77:669.15-194:620.18

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

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

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»*

Современные и наиболее перспективные технологии возведения высотных зданий подразумевают использование высокопрочного стального каркаса. Основными элементами каркаса, которые воспринимают наибольшие усилия, являются: колонны, балки и междуэтажные перекрытия. При изготовлении этих элементов находят все большее применение профили, сваренные из отдельных листов [1-3]. Однако необходимо отметить, что отечественный толстолистовой металлопрокат не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к материалу для современных каркасов высотных зданий или большепролетных сооружений, так как он имеет высокую анизотропию механических свойств.

Таким образом, возникла необходимость в разработке новых и усовершенствовании существующих технологий прокатки толстолистового металлопроката для достижения комплекса механических свойств, удовлетворяющих современным требованиям строительной индустрии.

Традиционными способами термической обработки проката из конструкционных сталей, применяемыми в промышленности, являются нормализация и термическое улучшение [4-6].

Нормализация – предусматривает нагрев металлопроката в аустенитную область с последующим охлаждением на воздухе. Это приводит к распаду аустенита в температурном интервале перлитного превращения. Нормализация позволяет измельчать структуру, повысить прочностные и вязкопластические свойства. За счет своей простоты и отсутствия необходимости в специальных охлаждающих устройствах такая термическая обработка является одним из наиболее доступных способов повышения механических свойств конструкционных сталей. Однако для строительных сталей повышенной и высокой прочности нормализация применима только в сочетании со значительным легированием [7].

Термическое улучшение – состоит из закалки из аустенитной области и последующего высокого отпуска (~ 650 °С), что повышает прочностные характеристики, не уменьшая при этом пластичность, повышает хладостойкость и позволяет снизить расход стали при изготовлении металлических конструкций на 15...20 % [7, 8]. При одинаковом химическом составе операция термического улучшения дает большие показатели роста прочностных характеристик в сравнении с нормализацией, однако требует наличия сложного охлаждающего оборудования.

Традиционная контролируемая прокатка (КП) – представляет собой разновидность процесса термомеханической обработки сталей и сплавов, харак-

термизирующегося регламентированными, в зависимости от химического состава, условиями нагрева металла, температурными и деформационными параметрами процесса и заданными режимами охлаждения металла на различной стадии пластической обработки, результатом чего является измельчение аустенитного, α , следовательно, и ферритного зерна, что приводит к одновременному повышению прочности и вязкости стали [9]. Высокий комплекс механических свойств сталей контролируемой прокатки обеспечивается наличием микролегирующих элементов Nb или V и низкого содержания углерода [10-12].

Рекристаллизационная контролируемая прокатка (РКП) с последующим ускоренным охлаждением (УО) была разработана в 1980-90-х годах в качестве одной из разновидностей термомеханической обработки с целью достижения высокой прочности, ударной вязкости и свариваемости высокопрочный низкоуглеродистых низколегированных сталей [13]. Улучшение свойств РКП+УО толстого листа связано с различными механизмами упрочнения, наиболее важным из которых является измельчение зерна, при помощи которого можно одновременно повысить и прочность, и пластичность стали.

Термическая обработка с прокатного нагрева – представляет собой термическую обработку с прокатного нагрева в технологическом потоке прокатного стана. Было показано, что значительная экономия энергии, связанная с применением тепла прокатного нагрева, сопровождается существенным упрочнением проката благодаря фиксации дислокационной и тонкой структуры, сформировавшейся в результате деформации [14, 15]. В продолжение этих работ проф. В. И. Большаковым с сотрудниками была показана возможность осуществления ускоренного охлаждения в потоке стана сразу после контролируемой прокатки [16-18]. Показано, что при использовании прямой закалки низкоуглеродистых низколегированных сталей могут быть достигнуты более высокие механические свойства, чем у легированных сталей, при значительном сокращении затрат.

Третье поколение термомеханического контролируемого процесса. Является новым методом горячей прокатки, направленной на повышение скорости зарождения феррита за счет выделения частиц VN внутри аустенитного зерна в сталях с повышенным содержанием ванадия [19]. Третье поколение термомеханического контролируемого процесса проиллюстрировано на рисунке 1. Для осуществления процесса необходимо соответствующее содержание ванадия и азота в стали, а прокатку следует вести в черновой и чистовой группах [19].

Процесс Сумитомо. Является одним из видов прокатного производства, который позволяет в кратчайшие сроки с высокой экономичностью выпускать большое количество листовой стали, характеризующейся высокими показателями низкотемпературной вязкости. При получении высоковязкой стали процессом Сумитомо в наибольшей мере используется эффект измельчения зерна. При прокатке по методу Сумитомо высокий комплекс механических свойств обеспечивается нагревом металла чуть выше температуры A_{c3} с последующей прокаткой, в результате чего вязкость стали не понижается [20].

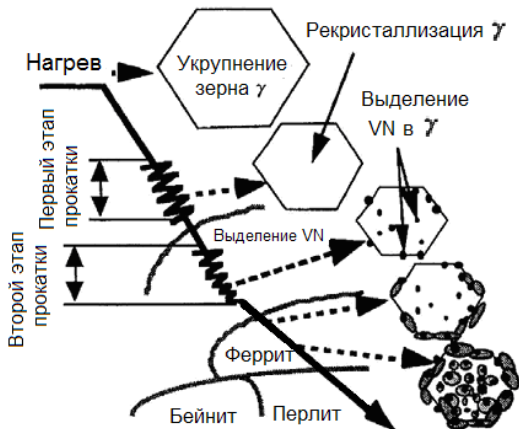


Рис. 1. Изменение структуры толстолистового проката из сталей с повышенным содержанием ванадия во время проведения термомеханического контролируемого процесса [19]

Описанные выше технологии производства листового проката обобщены и представлены на рисунке 2.

Сравнительный анализ наиболее распространенных методов получения листового проката позволил выделить основные факторы, которые обеспечивают получение высокого уровня механических характеристик:

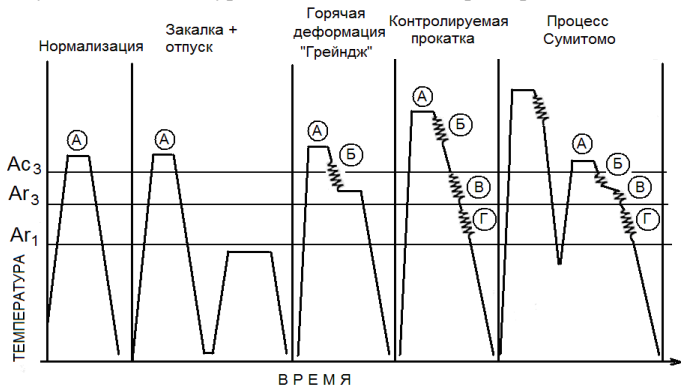


Рис. 2. Сравнительная схема производства толстолистового проката для строительных металлических конструкций

А. Измельчение исходного зерна аустенита путем нагрева стали до температуры, лишь слегка превышающей точку A_{c3} .

Б. Измельчение зерна аустенита путем прокатки в интервале температур его рекристаллизации.

В. Введение полосы деформации в структуру путем прокатки аустенита в интервале температур ниже температуры рекристаллизации (очевидный рост протяженности границ).

Г. Измельчение зерна за счет динамического возврата или рекристаллизации деформированного феррита путем прокатки в межкритическом интервале температур металла с аустенито-ферритной структурой.

На рисунке 3 показано, как изменяется микроструктура стали на отдельных этапах процесса Сумитомо в сравнении с обычными процессами прокатки с контролируемым охлаждением и прокатки с нормализацией.

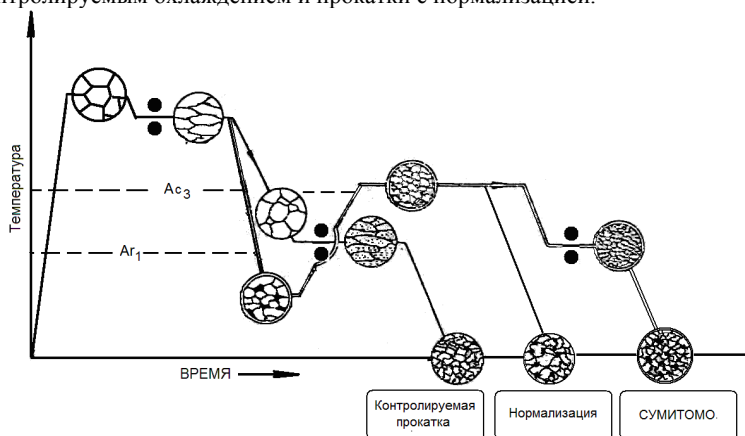


Рис. 3. Схема микроструктурных изменений при получении листовой стали методом контролируемой прокатки, высокотемпературной прокаткой с последующей нормализацией и процессом Сумитомо

Вместе с тем, анализ оборудования отечественных металлургических предприятий [21] показывает, что наиболее перспективным технологическим режимом производства листового проката для строительных металлических конструкций является контролируемая прокатка. С другой стороны, анализируя рисунки 2 и 3 можно сделать вывод, что технология классической контролируемой прокатки приводит к формированию в структуре стали крупных и неоднородных зерен, что обусловлено ростом зерна аустенита при высокотемпературном нагреве сляба (1 100...1 250°C).

Таким образом, усовершенствование технологии классической контролируемой прокатки путем корректировки температурно-временных процессов прокатки в черновой клетке позволит получить достаточно мелкозернистую структуру, в общих чертах аналогичную структуре, получаемой в результате процесса Сумитомо. Как следствие, комплекс эксплуатационных характеристик готового металлопроката будет значительно выше поперек, вдоль и по толщине листа.

В связи с этим, целью настоящей работы было повышение комплекса механических свойств толстых листов, изготовленных по технологии контроли-

руемой прокатки путем сохранения полигонизованной структуры горячедеформированного аустенита и создание условий для ее наследования выделяющимся перед чистой прокаткой доэвтектоидным ферритом.

Температурно-деформационный режим контролируемой прокатки обычно осуществляют следующим образом: нагрев слывов в методической печи до температур 1 100...1 200°C, гомогенизирующая выдержка около 4...6 часов, черновая прокатка с окончанием деформации при температурах 980...1 100°C охлаждение раскатов до температур 720...820°C, чистовая прокатка до необходимой толщины и замедленное охлаждение до комнатной температуры.

Чтобы компенсировать нежелательное влияние снижения степени деформации, ответственной за создание мелкого зерна и получения высокой ударной вязкости в готовом прокате, предлагается повысить дисперсность и устойчивость полигонизованной структуры, формирующейся к моменту окончания горячей деформации аустенита.

Таким образом, предлагаемый режим включает в себя повышение дробности высокотемпературной деформации. Увеличение числа циклов деформации при той же суммарной степени деформации способствует получению более развитой полигональной структуры аустенита, а увеличение продолжительности деформации с одновременным снижением температуры конца черновой прокатки и фиксирует субграницы. Полученная деформированная, насыщенная субзерненными границами структура аустенита благоприятна для обеспечения однородности конечной структуры (рис. 4).

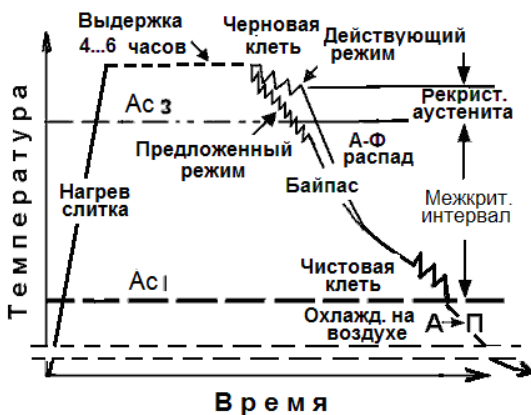


Рис. 4. Схемы действующего и предложенного режимов контролируемой прокатки

Температурно-деформационные параметры предложенного режима предписывают окончание деформации в черновой клетке в температурном диапазоне, в котором не протекает рекристаллизация, что является необходимым условием для формирования мелкого зерна феррита в процессе охлаждения в межкритическом интервале температур.

Сохраненная таким способом полигонизованная структура аустенита, содержит большое количество дополнительных центров гетерогенного зарождения феррита (полигональные границы, их стыки и узловые точки). Снижение температуры окончания черновой деформации ниже Асз приводит к образованию мелких зародышей феррита, которые фиксируют полигональную субструктуру, предотвращая рекристаллизацию и рост зерен аустенита. К моменту начала чистовой деформации зародыши несколько увеличиваются в размерах, однако столкновения друг с другом сдерживают их рост, обеспечивая мелкозернистую ферритную структуру. В чистовой клетке в мелких ферритных зёрнах формируются дополнительные полигональные малоугловые границы, что приводит к одновременному повышению прочностных и пластических характеристик в готовых листах (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения механических свойств толстых листов из стали 10Г2ФБ толщиной 22 мм, прокатанных по действующему и предложенному режиму

Технология	Направление прокатки	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ_Z , %	KCV^{20} Дж/см ²
Штатная	Вдоль	513 ± 24	614 ± 25	22,5 ± 1,8	—	—
	Поперек	548 ± 33	635 ± 27	20,9 ± 1,9	—	189 ± 84
	в Z-напр.	230 ± 25	320 ± 34	—	42 ± 5	—
Предл.	Вдоль	560 ± 20	660 ± 23	21,2 ± 2,6	—	—
	Поперек	610 ± 21	690 ± 24	20,6 ± 2,4	—	212 ± 59
	в Z-напр.	450 ± 23	510 ± 27	—	68 ± 5	—
ТУ 14–1–5293	Вдоль	480–500	590–690	≥ 20	—	≥ 98,1

Наиболее чувствительной величиной, тонко реагирующей на изменение всего комплекса механических характеристик толстолистового проката в Z-направлении является относительное сужение (ψ_Z).

Европейские стандарты ISO 7778–83 и отечественный ГОСТ 28870–90, выделяют три группы качества при испытании в Z-направлении это: Z 15, Z 25 и Z 35. Цифра является средним значением по результатам испытаний трех образцов. Чем выше значение ψ_Z , тем меньше вероятность образования продольных трещин при сварке, а их возникновение практически исключено уже при $\psi_Z \geq 25\%$.

В соответствии со стандартом EN 10164:2005 толстые листы, прокатанные по предложенному и действующему режимам дополнительно испытывали на растяжение в Z-направлении при этом оценивали величину относительного сужения ψ_Z на соответствие группе качества Z35.

Фактическое значение относительного сужения в Z-направлении в листах, изготовленных по предложенному режиму на 20...25 % выше, чем полученное по штатной технологии, и почти в 2 раза превышает требования норм соответствия классу качества Z 35.

Выводы

1. Толстолистовой металлопрокат, производимый отечественными металлургическими комбинатами, имеет большой разброс прочностных и пластических

свойств вдоль, поперек и по толщине листа, что не позволяет применять его в полной мере при изготовлении строительных металлических конструкций.

2. Экономически целесообразно повышать конкурентоспособность отечественного металлопроката путем разработки новых или корректировки уже существующих технологических схем производства без привлечения дополнительных инвестиций на приобретения нового производственного оборудования.

3. Сравнительный анализ наиболее распространенных методов получения листового проката показал, что в условиях отечественных металлургических комбинатов наиболее перспективной технологией получения высокопрочного металлопроката является контролируемая прокатка.

4. Одним из путей повышения комплекса механических свойств толстых листов, изготовленных по технологии контролируемой прокатки является корректировка температурно-деформационных режимов черновой прокатки.

5. Предложен режим контролируемой прокатки, который включает в себя повышение дробности высокотемпературной деформации при той же суммарной степени деформации.

6. Показано, что прокатка листов по предложенному режиму позволила значительно увеличить комплекс и снизить анизотропию свойств по сравнению с традиционной контролируемой прокаткой.

Использованная литература:

1. 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.
2. Проектирование металлических конструкций / В. В. Бирюлев, И. И. Кошин, И. И. Крылов, А. В. Сильвестров. – Ленинград: Стройиздат, 1990. – 432 с.
3. Мандриков А. П. Примеры расчета металлических конструкций / Мандриков А. П. – М.: Стройиздат, 1991. – 431 с.
4. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов / Новиков И. И. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
5. Большаков В. И. Экономические предпосылки применения стали повышенной прочности при реконструкции зданий первых массовых серий / В. И. Большаков, О. Ю. Щеглова, Д. А. Вязовая // Матеріалознавство та термічна обробка матеріалів. – 2003. – №2–3 – С 40–45.
6. Тушинский Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. / Тушинский Л. И. – Новосибирск: Наука. – 1990. – 306 с.
7. Parrini C. New heat treatment for high-strength, low-alloy steels as an alternative to controlled rolling / C.Parrini, N. Pizzimenti, A.Rozzi // Microalloying 75, Washington. – 1975. – P. 288–301.
8. Тылкин М. А. Структура и свойства строительной стали / М. А. Тылкин, В. И. Большаков, П. Д. Одесский. – М.: Металлургия, 1983. – 287 с.
9. Hanemann H. Stahl und Risen / H. Hanemann // Verlag Stahleisen GmbH. – 1925. – P. 1117–1122.

10. Pickering F. B. Constitution and Properties of Steels / F. B. Pickering, R. W. Cahn, P. Haasen, E. J. Kramer // *Materials Science and Technology*. – 1992. – Vol. 7. – P. 184–217.
11. Phillips R., Chapman I. // *ISI publication 204* / Phillips R., Chapman I. – 1966. – P. 615–622.
12. Jones I. D., Rothwell I. D. // *ISI publication 108* / I. D. Jones, I. D. Rothwell – 1968. – P. 78–82.
13. Priestner R., Early, C., Randall, J. // *ISI publication 206* / R. Priestner C. Early, J. Randall, – 1968. – P. 1252–1262.
14. Siwecki T. Recrystallization controlled rolling of HSLA steels / T. Siwecki, B. Hutchinson, S. Zając // *Proceedings of the International Conference "Microalloying '95"*, 1995. – Pittsburg, RA, USA, 1995. – P. 197–211.
15. Большаков В. И. Электронномикроскопическое исследование тонкой структуры низколегированной стали после контролируемой прокатки и прямой закалки / В. И. Большаков, К. Ф. Стародубов, И. В. Куксенко // *Доклады АН УССР. Серия А. Физико-математические и технические науки*. – 1983. – №8. – С. 76–78.
16. Большаков В. И. Электронно-микроскопическое исследование дислокационной структуры высокопрочной строительной стали / В. И. Большаков, Л. Г. Орлов, М. А. Тылкин // *Термическая обработка металлов*. – 1973. – №3. – С. 19–23.
17. Большаков В. И. Повышение качества и надежности строительных сталей в результате субструктурного упрочнения / В. И. Большаков, И. А. Монгайт, Л. И. Котова, Н. Э. Погребная // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1985. – № 8. – С. 42–46.
18. Большаков В. И. Роль структурно-технических факторов и особенностей получения развитой субструктуры в строительных сталях в результате ТМО / В. И. Большаков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1986. – № 2. – С. 31–33.
19. Закалка стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки / В. И. Большаков, Л. Г. Орлов, В. Е. Ваганов та ін. // *Современные проблемы термического упрочнения проката*. – 1994. – С. 47–51.
20. Kimura T. Use of Fine Inclusions in Microstructure Control of Steels / T. Kimura // *Final report of Research Committee of the Iron and Steel Institute of Japan 1995*. – Tokyo, 1995. – P. 89–101.
21. Бойко В.С. Организация производства листов толщиной до 50 мм на стане 3000 Мариупольского меткомбината им. Ильича / В.С. Бойко, Э.Н. Шебанич, В.С. Голи-Оглу, И.Г. Саркиц, А.В. Мурашкін, Ю.Н. Белобров, В.Т. Лебедь, А.Л. Остапенко // *Металл и литье Украины*. – 2002. – №7-8. – С. 45-46.
22. Cuddy L. J. Thermomechanical Processing of Austenite / L. J. Cuddy // *TMS of AIME. Warrendale (PA)*. – 1982. – P. 129–140.