

Відомості про авторів:

Тесленко Тетяна Вікторівна, к. е. н., доцент кафедри економіки і менеджменту Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна.

Гордєєва Інна Олександрівна, к. т. н., доцент кафедри управління проектами Національної металургійної академії України, e-mail: Kaf.ur@metal.nmetau.edu.ua

УДК 669.017:621.771:621.785

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 10Г2ФБ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ В МЕЖКРИТИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР И УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Т. В. Ткач, асп.

Ключевые слова: *строительная низкоуглеродистая сталь, межкритический интервал, деформация, ускоренное охлаждение, прочность, вязкость*

Постановка проблемы. С повышением темпов строительства возникла необходимость повышения механических свойств строительных сталей. Разработка новых режимов прокатки может решить задачу повышения свойств строительных низкоуглеродистых сталей.

Анализ литературы. Проведенный анализ материалов исследований и публикаций показал, что много научных работ предыдущих лет посвящено разработке режимов прокатки, повышающих свойства строительных сталей. Применение термического упрочнения в потоке станов термомеханической или контролируемой прокатки повышает прочностные характеристики стали, однако вязкость при этом снижается. Таким образом, существует проблема повышения не только прочности, но и вязкости строительных сталей.

Цель статьи. Повышение механических свойств листового проката путём определения характера влияния деформации в межкритическом интервале (МКИ) температур и последующего охлаждения на формирование структуры низкоуглеродистой низколегированной строительной стали 10Г2ФБ.

Изложение материала. К прокату из строительных сталей как наиболее массовому виду готовой продукции предъявляют следующие требования: хорошая свариваемость, высокая прочность и вязкость, удовлетворительные пластические свойства, относительно невысокая цена. Строительные стали должны быть низкоуглеродистые и низколегированные, чтобы отвечать этим требованиям. Технология производства массового проката из строительных низкоуглеродистых сталей совершенствовалась более 50 лет. Наиболее распространенным методом прокатки строительных сталей является горячая прокатка. Однако горячекатаный прокат из низкоуглеродистых сталей имеет низкую прочность ($\sigma_T = 200 - 300$ МПа) и вязкость. В последние два десятилетия возникла необходимость получения проката из низкоуглеродистых сталей повышенной ($\sigma_T = 300 - 400$ МПа) и высокой прочности ($\sigma_T \geq 400$ МПа). Термическое упрочнение проката в потоке станов дает возможность решить эту проблему. Работы К. Ф. Стародубова, М. Л. Берштейна, И. Г. Узлова и их коллег [1 – 4] внесли большой вклад в разработку способов упрочнения проката.

Задачу получения проката повышенной и высокой прочности стали можно решить применением термического упрочнения в потоке стана, термомеханической прокатки или контролируемой прокатки.

Применение высокопрочных сталей для изготовления конструкций ответственного назначения ограничено из-за их повышенной склонности к хрупкому разрушению. Поэтому актуальной задачей является поиск путей повышения прочностных характеристик, а также повышения вязкости строительных сталей.

Результаты исследований. В качестве материала для исследований была выбрана сталь 10Г2ФБ, применяемая для изготовления листового проката. Для проведения исследований были использованы световая микроскопия и стандартные механические испытания: на растяжение, на ударную вязкость при температурах $-40 \div +20$ °С на образцах с острым надрезом (по Шарпи), ГОСТ 9454-78 определение твердости.

Эксперимент проводили следующим образом: исследуемые образцы выдержали в печи при температуре 1 000°C в течение 90 минут, а затем выдерживали по 10 минут при различных температурах в МКИ и деформировали на 45 % с последующим ускоренным охлаждением в масло. Исследовали структуру и механические свойства стали 10Г2ФБ после деформации при разных температурах в межкритическом интервале и ускоренного охлаждения. Межкритический интервал разбили на три части, в зависимости от структурного соотношения и их влияния на механические свойства: верхнюю, среднюю и нижнюю.

Верхняя часть МКИ. При охлаждении аустенита в верхней части двухфазной области (рис. 1, а и б) и последующей выдержки при этих температурах в металле происходит зарождение зерен феррита, которые образуются на границах аустенитных зерен. Дефекты кристаллического строения аустенита с повышенной свободной энергией тоже способствуют гетерогенному зарождению феррита. После деформации при температуре 885°C образовалось 30 % феррита, который содержит 0,005 % углерода; для сравнения: феррит, образовавшийся при 735°C, содержит углерода 0,019 %. Следовательно, чем выше температура деформации в МКИ, тем меньшее количество доэвтектоидного феррита выделится, тем меньше концентрация углерода в α -фазе и тем ниже прочность и выше пластичность такого феррита.

Оставшийся аустенит (70 %) после дальнейшей деформации и охлаждения распадается на бейнит и мартенсит. Так как бейнитно-мартенситное превращение происходит по диффузионно-сдвиговому или сдвиговому механизму, то из-за повышенных скоростей охлаждения в таких структурах возникает высокая плотность дислокаций, что, в свою очередь, позитивно влияет на прочность, но негативно – на вязкость стали. В результате после деформации при температуре 885°C и дальнейшего охлаждения достигаются хорошие показатели прочности стали ($\sigma_b = 782 \text{ Н/мм}^2$ и $\sigma_T = 591 \text{ Н/мм}^2$), но ударная вязкость при минусовых температурах снижается ($KCV_{-40^\circ\text{C}} = 54 \text{ Дж/см}^2$).

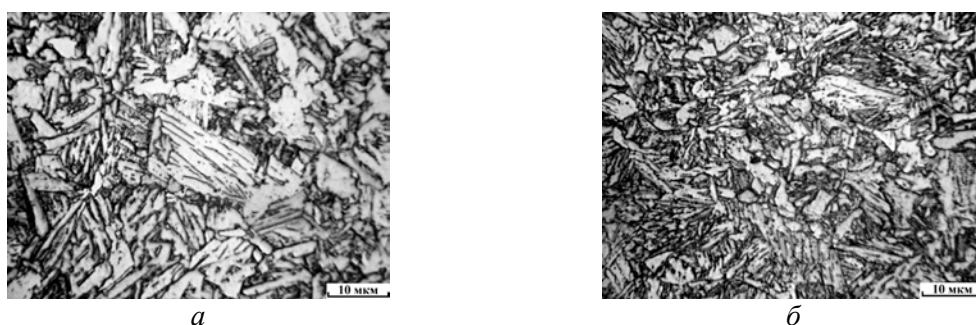


Рис. 1. Микроструктура стали после деформации в межкритическом интервале и последующего охлаждения: а – 885°C; б – 860°C

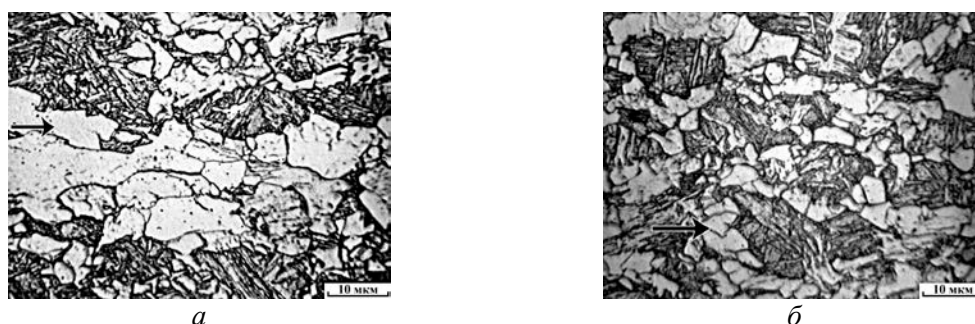


Рис. 2. Микроструктура стали после деформации в межкритическом интервале и последующего охлаждения при температуре 735°C

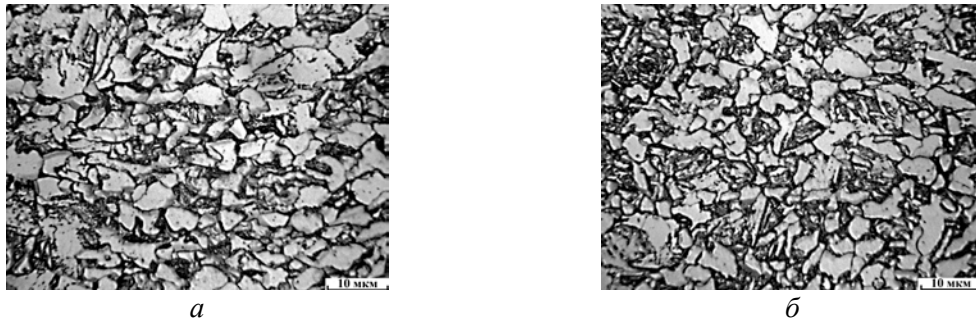


Рис. 3. Микроструктура стали после деформации в межкритическом интервале и последующего охлаждения: а – 810°С; б – 785°С

Нижняя часть МКИ. При понижении температуры и переходе через линию Ag_3 начинается образование зародышей феррита из гомогенизированного метастабильного аустенита. В двухфазной области одновременно с аустенитом деформируется выделившийся в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения доэвтектоидный феррит (75 %). После охлаждения образовавшиеся зерна феррита вытянуты вдоль направления деформации и содержат развитую сеть субзеренных границ. Соответственно, чем ниже температура деформации в МКИ, тем больше образуется α -фазы и тем большее количество зерен феррита подвергается деформационному упрочнению. На рисунке 2 а показан полигональный феррит, размеры зерен которого достигают в среднем 10 мкм. На рисунке 2 б обозначены мелкие зерна феррита размером 3,3 мкм. Этот феррит образовался после деформации и охлаждения, так как время между деформацией и закалкой достигает 3 – 5 секунд, получается мелкозернистая структура.

Таблица

Результаты механических испытаний, средние значения

№	t, °С	$L_{0,2}$, мм	δ_5 , %	Ψ , %	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	KCV ⁺²⁰ , Дж/см ²	KCV ⁻⁴⁰ , Дж/см ²
1	885	25,0	16,0	65,5	591	783	109	54
2	860	25,0	15,7	64,0	640	777	100	56
3	810	25,0	16,7	61,5	543	772	92	78
4	760	25,0	16,5	61,5	539	772	104	79
5	735	25,0	14,25	47,5	631	790	59	53

После деформации во время охлаждения оставшийся аустенит распадается на дисперсный углеродистый мартенсит, бейнит и некоторое количество остаточного аустенита. Образовавшийся после закалки стали в нижней части МКИ температур мартенсит содержит повышенную концентрацию углерода 0,75 %, для сравнения, мартенсит, образовавшийся после охлаждения при температуре 860°С, содержит 0,23 % углерода. Повышенная концентрация углерода в мартенсите приводит к повышению прочности ($\sigma_B = 790$ Н/мм²; $\sigma_T = 631$ Н/мм²), а также является причиной охрупчивания стали. При этом напряжения, возникшие в мартенсите, повышают склонность к образованию трещин, что значительно влияет на понижение вязкости стали в целом, она становится хрупкой и при -40 °С и при +20°С (см. табл.), что важно для конструкционных строительных сталей. После деформации при температурах нижней части МКИ и ускоренного охлаждения микроструктура стали состоит из полигональных зерен феррита с большим количеством субзеренных границ; мелких зерен феррита, выделившегося в процессе деформации и закалки; дисперсного углеродистого мартенсита и бейнита.

Средняя часть МКИ. При температурах 810°С и 785°С (рис. 3, а и 3, б) из аустенита образовалось 75 – 80 % ферритной фазы. Образовавшиеся ферритные зерна претерпевают деформацию, в конечной структуре стали их размер достигает 3 – 3,3 мкм. Последующее ускоренное охлаждение фиксирует мелкозернистую структуру феррита, полученную при деформации. Оставшиеся 25 – 20 % аустенита после охлаждения превращаются преимущественно в бейнит, небольшое количество мартенсита, а также в структуре сохраняется небольшое количество остаточного аустенита. При деформации в средней части МКИ структура состоит из смешанных составляющих: мелкозернистого феррита, бейнита и мартенсита, остаточного аустенита. Преобладание в структурном соотношении

мелкозернистого феррита влияет на понижение склонности к хрупкому разрушению стали, также в комплексе все структурные составляющие обеспечивают высокую прочность, а пластичность при этом остается на прежнем уровне или снижается незначительно (см. табл).

Вывод. Сталь 10Г2ФБ, закаленная после деформации при температурах верхней и нижней двухфазной области, показывает высокую прочность, но вязкость при этом снижается. Охрупчивание стали после УО от 885 – 860°C объясняется большим содержанием в структуре мартенсита и бейнита, а при охлаждении от 735°C – укрупнением зерен феррита.

Дополнительным рычагом для управления свойствами готовых изделий может быть регулируемое ускоренное охлаждение, с помощью которого можно управлять соотношением структурных составляющих в оставшемся аустените в МКИ, количество которого можно выбирать с помощью температуры конца деформации.

Перспективно дальнейшее изучение комплекса структур стали, полученных в диапазоне температур от 810°C до 770°C при ускоренном охлаждении, так как при высокой прочности, вязкость возрастает, а пластичность остается на уровне.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Бернштейн М. Л.** Термомеханическая обработка металлов и сплавов : учеб. [в 2 т.] / М. Л. Бернштейн. – М. : Metallurgia, 1968. – 1 172 с.
2. **Бернштейн М. Л.** Термомеханическая обработка металлов и сплавов : учеб. / М. Л. Бернштейн, В. А. Замовский, Л. М. Капуткина. – М. : Metallurgia, 1983. – 480 с.
3. **Большаков В. И.** Упрочнение строительных сталей: учеб. / В. И. Большаков. – Д. : Січ, 1993. – 332 с.
4. **Стародубов К. Ф.** Термическое упрочнение проката : учеб. / К. Ф. Стародубов, И. Г. Узлов, В. Я. Савенков и др. – М. : Metallurgia, 1970. – 368 с.

SUMMARY

Problem definition. With an increase of construction rate the necessity of mechanical properties of structural steel improvement has arised. The development of new modes of rolling can solve the problem of increasement the properties of structural low-carbon steels.

Purpose: to increase the properties of sheet metal by determining the effect of deformation in the intercritical interval (ICI) temperatures and subsequent cooling on the structure and properties of structural low-carbon low alloy steel.

Analysis of recent research: a lot of scientific works of the previous years were dedicated to the increasement the properties of structural steel. Application of thermomechanical or controlled rolling enhances the strength characteristics of steel, but the lowers toughness. Thus, it is necessary to increase not only the strength, but also toughness of structural steel.

Results: Deformation at different temperatures of the intercritical interval was carried out followed by cooling in oil. As a result it was established that, such treatment at, the top and bottom of the intercritical interval increases the strength, but the toughness is reduced.

The embrittlement of the steel after accelerated cooling from 885 – 860°C can be explained by the large content of martensite and bainite in the structure, and from 735°C by enlargement of ferrite grains. Toughness and strength increased simultaneously only in a narrow range of temperatures (810 – 770°C).

Conclusion. The structure and mechanical properties of steel 10G2FB after deformation at various temperatures of the intercritical interval and the accelerated cooling were determined. As a result it was established that the microstructure of the steel after cooling is a mixture of ferrite, bainite, martensite, and small amounts of residual austenite. Depending on the selected end temperature of deformation in the intercritical interval and subsequent cooling of these components the ratio of the structure is different, which affects the properties of the steel.

On the basis of the received results further study of the structure of steel produced in the temperature interval 810°C – 770°C with accelerated cooling is promising, as strength and toughness are increased and the ductility is not reduced significantly.

REFERENCES

1. Bernshteyn M. L. Termomekhanicheskaya obrabotka metallov i splavov : ucheb [v 2 t.]. / M. L. Bernshteyn. – M. : Metallurgiya, 1968. – 1172 s.
2. Bernshteyn M. L. Termomekhanicheskaya obrabotka metallov i splavov: ucheb. / M. L. Bernshteyn, V. A. Zamovskiy, L. M. Kaputkina. – M. : Metallurgiya, 1983. – 480 s.
3. Bolshakov V. I. Uprochnenie stroitelnykh staley: ucheb. / V. I. Bolshakov. – D. : Sich, 1993. – 332 s.
4. Starodubov K. F. Termicheskoe uprochnenie prokata: ucheb. / K. F. Starodubov, I. G. Uzlov, V. Ya. Savenkov i dr. – M. : Metallurgiya, 1970. – 368 s.

Відомості про автора:

Ткач Татьяна Вадимовна, аспирант кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ПГАСА, e-mail: tani4ka.ua@yandex.ua.

УДК 624.014 : 693.977

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОБ'ЄМНО-ПЛАНУВАЛЬНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ КАРКАСІВ МАЛОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ З ЛСТК

О. Г. Зінкевич, к. т. н., доц.

Ключові слова: *каркаси малоповерхових будівель, ЛСТК, обшивка каркаса, діафрагми жорсткості, просторова жорсткість каркаса*

Постановка проблеми. Малоповерхове будівництво займає значні обсяги в будівельній галузі. Згідно з прогнозами, будівництво індивідуальних малоповерхових житлових будинків в Україні (1...3 поверхи) складатиме до 30 % від загального обсягу будівництва житла [1].

Сьогодні у світовій практиці та в будівельній галузі України застосовується цілий ряд технологій зведення малоповерхових житлових будинків із різних матеріалів. Однією з найбільш ефективних і розповсюджених є каркасна технологія, історія використання якої нараховує близько 4 000 років.

Каркасна технологія досить гнучка з погляду забезпечення необхідної енергоефективності огорожувальних конструкцій – мінімальне насичення несучими елементами створює значний об'єм для розміщення теплоізоляційних матеріалів різних типів і товщини. Таке рішення дозволяє широко впроваджувати технології екожитла – застосування місцевих екологічно чистих, відновлюваних матеріалів (солома – для зведення стін; очерет, торф – для покрівлі) [2].

Необхідно зазначити, що в Україні зведення житлових будинків на основі дерев'яного каркаса з подальшим заповненням місцевими матеріалами практикувалося майже у всіх регіонах. Тобто технології екожитла для України не є принципово новими, а скоріше забутими.

Однією із широко розповсюджених каркасних технологій є зведення малоповерхових будівель на основі каркаса з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) [3; 4]. Конкурентоздатність каркаса з ЛСТК порівняно з дерев'яним каркасом значно зростає для тих країн або територій, де деревина не є промисловим матеріалом.

Незважаючи на запровадження в Україні деяких нормативних документів, що встановлюють правила проектування каркасів будівель з легких сталевих тонкостінних конструкцій [5], нормативне забезпечення недостатнє.

Так, наприклад, у багатьох країнах, де такі технології набули поширення, розробляються рекомендаційні матеріали, які значно спрощують оцінку можливості реалізації певних об'ємно-планувальних рішень або їх коригування та розробку конструктивних рішень [3; 6; 7].

Для поширення технології каркасного будівництва з ЛСТК в Україні необхідна розробка рекомендацій, що відображають особливості конструкцій такого типу на основі діючих нормативних документів.

Аналіз публікацій. Особливості конструктивних рішень каркасів з ЛСТК розглянуті у працях Е. Л. Айрум'яна [4], Я. Брудки [8], В. W. Schafer [9], W. W. Yu [10] та ін.

У низці праць наведено результати досліджень та експериментальних випробувань сталевих тонкостінних профілів, розкритих листовою обшивкою, та жорсткості вузлів їх з'єднання (О. Iuorio [9], Т. Pekoz, А. Simaan, В. W. Schafer, G. Winter та ін.).