

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ЗА РУБЕЖОМ И В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Е.Э. Степанов

stepanoveea@student.bmstu.ru

SPIN-код: 9237-9092

П.Ю. Жихарев

zhikharev@bmstu.ru

SPIN-код: 2488-8904

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены наиболее известные высокопрочные микролегированные стали с пределом текучести не менее 900 МПа от ведущих мировых производителей металлопроката. Проанализированы химический и фазовый составы этих материалов, их механические характеристики. Выявлено, что достижение комплекса требуемых потребителями свойств возможно при получении различных типов микроструктур: в высокопрочных марках сталей этого сегмента применены мартенситная, ферритная и бейнитная фазы; активно используется механизм дисперсионного упрочнения. Для достижения всех этих типов фазового состава производители прибегают к использованию термомеханической прокатки. Установлено, что производство материалов данного класса потенциально может быть освоено в условиях эксплуатируемых в РФ непрерывных широкополосных станов горячей прокатки.

Ключевые слова

Микролегирование, термомеханическая прокатка, легированные стали, высокопрочные сталели, прерванная закалка, широкополосные станы горячей прокатки, мартенсит отпуска, дисперсионное твердение

Поступила в редакцию 10.12.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. В связи с растущими требованиями по сокращению расходов энергоносителей, диктуемыми необходимостью уменьшения вредных выбросов, а также повышением экономической эффективности машиностроители по всему миру нацелены на снижение веса металлоконструкций. Это означает переход к применению материалов с более высокими, чем у существующих аналогов, механическими характеристиками. Технологические требования, однако, сохранены — это максимально высокая пластичность для применения операций формовки и гибки наравне с хорошей свариваемостью.

Для этих целей ведущими мировыми металлургическими компаниями разработаны специальные стали с особыми свойствами, которые удовлетворяют всем предъявляемым требованиям. Для автопроизводителей наиболее актуальны продукты класса прогрессивных сталей повышенной прочности (или AHSS — от англ. *Advanced High Strength Steel*), позволяющие сократить расход металла и уменьшить длину сварного шва при неизменной или повышенной прочности и

жесткости, в то время как для ряда других отраслей машиностроения необходимы стали с более высокими механическими характеристиками. Конструкционные стали этой группы представлены малоуглеродистыми микролегированными сталями — сталями группы HSLA (сокр. от англ. *High Strength Low Alloyed*). Эти материалы обладают условным пределом текучести $\sigma_{0,2} > 800$ МПа и находят свое применение в сильно нагруженных металлоконструкциях, таких как строительная техника, включая подъемные краны, бетононасосы и сооружения нефтегазовой отрасли.

В работе рассмотрена продукция ведущих мировых производителей (Tata Steel, JFE, SSAB, Voestalpine, Arcelor Mittal) с условным пределом текучести $\sigma_{0,2} \geq 900$ МПа: размерный сортамент, химический состав, механические свойства.

Стали ферритного класса. Этот сегмент высокопрочных материалов представлен продуктами серий XPF производства индийской группы компаний Tata Steel и серий Hiten производства японской компании JFE.

Tata Group — индийская транснациональная компания-конгломерат со штаб-квартирой в Мумбаи. Одна из крупнейших компаний в Индии по капитализации и выручке. Компания работает в области связи и информационных технологий, машиностроения, производства материалов, сферы услуг, энергетики, потребительских продуктов и химических веществ. Группа Tata имеет представительства в более чем 80 странах [1].

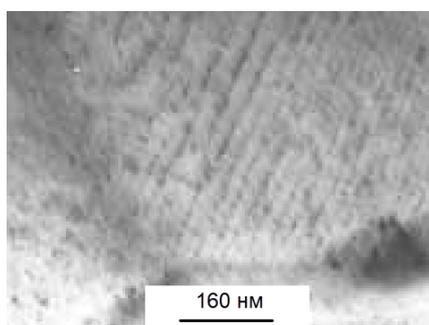


Рис. 1. Микроструктура стали XPF1000

Семейство высокопрочных сталей XPF разработано для удовлетворения потребностей автомобильной промышленности, где требуется высокая прочность наравне с хорошей свариваемостью и приемлемой формовкостью. Все продукты этой линейки характеризуются однофазной структурой, представляющей собой ферритную дисперсно-упрочненную матрицу. На рис. 1 представлена микрофотография стали XPF1000. При проведении теста на продольное растяжение ее условный предел текучести составляет $\sigma_{0,2} = 920$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b = 990$ МПа, а относительное удлинение при толщине листа более 3 мм $\delta = 16$ %. При аналогичных замерах в поперечном направлении эти характеристики составляют 960 МПа, 1010 МПа и 13 % соответственно.

Химический состав стали XPF1000 содержит следующие элементы (% , не более): С — 0,130, Cr — 0,100, Mn — 1,700, Si — 0,500, Mo — 0,200, S — 0,50, P — 0,020, Ti — 0,100, V — 0,300, Al — 0,005, B — 0,80, Nb — 0,100 [1].

Поскольку физические размеры заготовок имеют значительное влияние на формирование микроструктуры и, соответственно, свойств стали, характеристика этого аспекта является немаловажной. Сортамент XPF1000 представлен

горячекатаными листами различной толщины: по состоянию на начало 2021 г. покупателям доступны типоразмеры 2,0; 2,5; 3,0 мм, при этом листы толщиной 4,25 и 4,50 мм находятся в разработке.

Обратимся к продукту линейки Hiten. JFE Steel — японская сталелитейная компания, вторая по величине в стране, уступающая по объему выпуска лишь Nippon Steel Corporation [2]. Филиалы компании JFE открыты более чем в 20 странах мира, включая США, Корею, Великобританию и Китай.

Один из наиболее известных продуктов компании — высокопрочная низколегированная малоуглеродистая сталь семейства HITEN (сокр. от англ. *High Tensile*). По аналогии с продуктом компании Tata Steel данная сталь имеет однофазную структуру — ферритную матрицу с включениями карбидов и применяется в той же отрасли, что и вышеупомянутая XPF.

Стоит, однако, отметить, что стали данного класса, будь то XPF или HITEN, могут широко применяться и вне автомобильной промышленности — одним словом, во всех металлоемких отраслях инженерии и машиностроения, где конструкторскими и эксплуатационными требованиями предъявляются высокая прочность и необходимость получения сварных соединений, поэтому HITEN стали часто служат материалом, который применяется, например, при производстве экскаваторов и передвижных кранов.

Для дальнейшего рассмотрения выберем сталь JFE-HITEN980S. Ее механические характеристики сопоставимы с параметрами XPF1000, однако японская сталь имеет более высокую пластичность и несколько меньшую прочность: условный предел текучести составляет $\sigma_{0,2} = 885$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b = 950$ МПа, а относительное удлинение $\delta = 25$ %. Ударная вязкость KCV ≥ 208 Дж при температуре 0 °С.

Химический состав стали JFE-HITEN980S содержит следующие элементы (% , не более): С — 0,180, Cr — 0,800, Mn — 1,200, Si — 0,350, Ni — 2,000, Cu — 0,700, Mo — 0,800, S — 0,02, P — 0,02, V — 0,080, Nb — 0,020 [2].

Сортамент японской стали представлен, как и в случае марки XPF, горячекатаными листами, однако их толщина находится в значительно бóльших пределах — заказчику предлагается диапазон от 5 до 63,5 мм, причем возможно производство и более толстых пластин. Очевидно, что в смысле номенклатуры изделий марка HITEN более вариативна и может применяться интенсивнее.

Стали с многофазной структурой. К материалам этой группы относится продукция линеек Strenx (шведская компания SSAB), Optim (финская компания Ruukki Construction), Amstrong (европейско-индийская компания Arcelor Mittal) и x-treme (австрийская компания Voestalpine).

SSAB — шведская металлургическая компания, основанная в 1978 г., с головным офисом в Стокгольме. Специализируется на производстве высококачественных сталей высокой прочности [4]. Ежегодный объем производства готового проката превышает 8 млн т. Основные производственные мощности расположены в Швеции, Финляндии и частично в США.

Стали Strenx производятся с применением процесса термомеханической прокатки. Их высокие механические характеристики обусловлены мелкозернистой

структурой, состоящей из нескольких фаз: мартенсита, мартенсита отпуска, а также остаточного аустенита с включениями дисперсных частиц (рис. 2) [3]. Данная сталь не подходит для горячей формовки (при температуре выше 400 °С), так как это приведет к микроструктурным изменениям и потере заявленных производителем механических свойств.



Рис. 2. Микроструктура стали SSAB 960MC

Шведским металлургам удалось добиться приемлемых механических характеристик при малом использовании легирующих элементов, которые, как известно, снижают экономическую эффективность продукта.

Химический состав стали SSAB 960MC содержит следующие элементы (% не более): С — 0,085, Cr — 1,080, Mn — 1,060, Si — 0,180, Ni — 0,070, Cu — 0,010, Mo — 0,110, S — 0,003, P — 0,010, V — 0,007, Nb — 0,002, Al — 0,036, Ti — 0,026, B — 0,002 [5].

Условный предел текучести стали SSAB 960MC $\sigma_{0,2} = 960$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b = 1000$ МПа, а относительное удлинение $\delta = 7$ %. Ударная вязкость KCV ≥ 27 Дж при температуре -40 °С [4].

Сталь 960MC поставляется в листах толщиной от 3 до 10 мм.

Компания Ruukki Construction — финский производитель кровельных металлоконструкций с головным офисом в Хельсинки. Является дочерней компанией вышеупомянутой SSAB и имеет офисы во многих городах России.

Конструкционные стали Optim предназначены для использования в нагруженных металлоконструкциях, таких как крановые стрелы и другое подъемное оборудование, загрузочные воронки, балки и т. п. В холодном состоянии (при температуре около 20 °С) они обладают удовлетворительной пластичностью и могут быть пластически деформированы на гибочных машинах.

Сталь относится к мартенситно-бейнитному классу, что обуславливает ее высокие прочностные параметры и производится по технологии прямой закалки без последующего отпуска, имеет мелкозернистую структуру. Эта микролегирующая сталь обладает условным пределом текучести $\sigma_{0,2} = 960$ МПа, вре-

менным сопротивлением $\sigma_b \geq 980$ МПа, относительным удлинением $\delta \geq 7\%$ и ударной вязкостью KCV ≥ 27 Дж при температуре -40 °С [5].

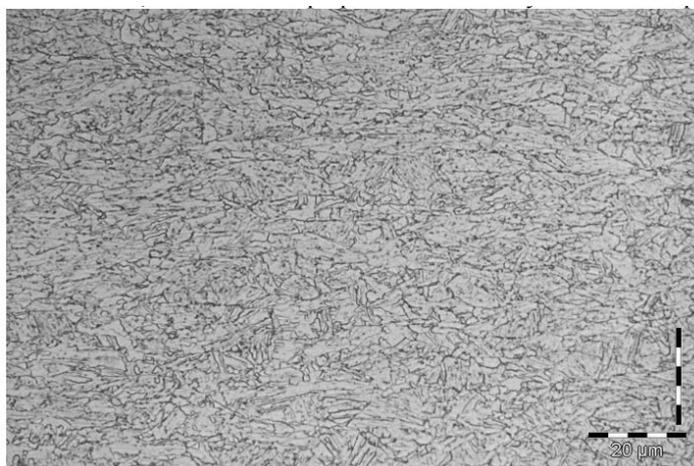


Рис. 3. Микроструктура стали Optim 960QC

На рис. 3 представлена микрофотография рассматриваемой стали, полученная после ее травления ниталом в ходе исследования механических и технологических характеристик [6].

На данный момент интенсивно ведутся исследования в области сварки высокопрочных сталей. Химический состав Optim 960QC был экспериментально получен в ходе одного из таких исследований [7]. Он содержит следующие элементы (% , не более): С — 0,110, Cr — 1,500, Mn — 1,200, Si — 0,250, Ni — 0,070, Mo — 0,700, S — 0,010, P — 0,020, V — 0,120, Nb — 0,002, Ti — 0,070, B — 0,005.

Стальные листы поставляются в различных исполнениях. Компания-производитель предлагает варианты толщиной от 3 до 10 мм (как и рассмотренная выше 960MC производства SSAB).

ArcelorMittal — одна из крупнейших металлургических компаний в мире, образованная слиянием люксембургской компании Arcelor и индийской Mittal Steel, зарегистрированная в Люксембурге. Имеет производственные мощности в 18 странах на четырех континентах, продукция реализуется в 160 странах.

Продукт Armstrong — высокопрочная низколегированная сталь, получаемая по технологии Q&T (закаляется после отдельного нагрева). Благодаря низкому содержанию углерода и легирующих элементов, поддается сварке и формуется при повышенных температурах.

Как сообщают M. Dunder и другие [8], микроструктура стали является двухфазной. Она мелкозерниста и состоит из двух компонент: мартенсита отпуска и бейнита. Благодаря такому внутреннему строению удалось достичь высоких прочностных характеристик при значительных параметрах пластичности. Условный предел текучести стали марки Armstrong Ultra 960QL составляет $\sigma_{0,2} \geq$

900 МПа, временное сопротивление $\sigma_b > 940$ МПа, относительное удлинение $\delta \geq 10$ % и ударная вязкость $KCV \geq 27$ Дж при температуре -40 °С [9].

Очевидно, что в контексте разработки новейших конкурентоспособных продуктов для машиностроительной отрасли важнейшее значение имеет содержание легирующих элементов, которые, с одной стороны, формируют структуру стали, а с другой — влияют на себестоимость ее производства. Химический состав стали Armstrong Ultra 960QL включает следующие элементы (% , не более): С — 0,7000, Cr — 0,5900, Mn — 1,4200, Si — 0,4700, Ni — 0,7900, Mo — 0,5600, S — 0,0030, P — 0,0200, V — 0,0500, Al — 0,060, Ti — 0,0700, B — 0,0007 [8].

Основное применение данной марки стали — телескопические стрелы подъемных кранов различных конфигураций, а также другие тяжело нагруженные сварные ответственные конструкции. Поставляется такая сталь в листах толщиной от 5 до 39 мм, пластинах до 75 мм, что значительно превышает вариативность сортамента сталей от концерна SSAB.

Voestalpine AG — международная сталелитейная компания, находящаяся в Линце, Австрия. Компания производит сталь, автомобили, железнодорожные системы, оборудование и инструментальные стали. 60 % персонала работает в Австрии. Кроме мощностей в Линце компании принадлежат крупные заводы в Леобене, Штирии и в Кремсе в Нижней Австрии.

В контексте работы интересна высокопрочная низкоуглеродистая сталь Alform Plate 960M x-treme. Она имеет следующие механические характеристики: условный предел текучести $\sigma_{0,2} > 960$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b \geq 980$ МПа, относительное удлинение $\delta > 10$ % и ударная вязкость $KCV \geq 30$ Дж при температуре -40 °С [10]. В комплексе ее микроструктура представляет собой смесь бейнитного феррита, бейнита и мартенсита.

Листовая сталь Alform plate 960M применяется в областях машиностроения, требующих низкой массы при высоких показателях прочности и хорошей свариваемости материала (что обеспечивается низким содержанием легирующих элементов и, как следствие, низкому углеродному эквиваленту), — например, в строительной технике, однако основное ее назначение — холодная формовка при температуре до 580 °С.

Химический состав стали Alform plate 960 M x-treme содержит следующие элементы (% , не более): С — 0,080, Cr — 0,610, Mn — 1,650, Si — 0,330, Ni — 0,026, Cu — 0,016, Mo — 0,290, S — 0,001, P — 0,011, V — 0,078, Nb — 0,035, Al — 0,038, Ti — 0,014, B — 0,002.

Как и предыдущие стали в данном обзоре, продукт австрийских металлургов поставляется в виде листового проката, с номенклатурой толщин от 6 до 30 мм [10].

Стали мартенситного класса. Стали семейства HYD производства вышеупомянутой компании JFE являются пионерами в области ТМСП (сокр. от англ. *Thermo-mechanically controlled process*). Эти высокопрочные микролегированные стали сочетают в себе высокие механические и технологические характеристики, изотропию свойств.

Стали семейства HYD отличаются от всех остальных рассмотренных сплавов тем, что их прочностные характеристики обусловлены иным механизмом: производственная линия включает в себя участки термомеханической прокатки, последующего прямого охлаждения (прямой закалки), а также участок непрерывной термообработки (НОР-процесс: сталь отпускается и затем ускоренно охлаждается на той же технологической линии, где были проведены закалка и пластическая деформация).

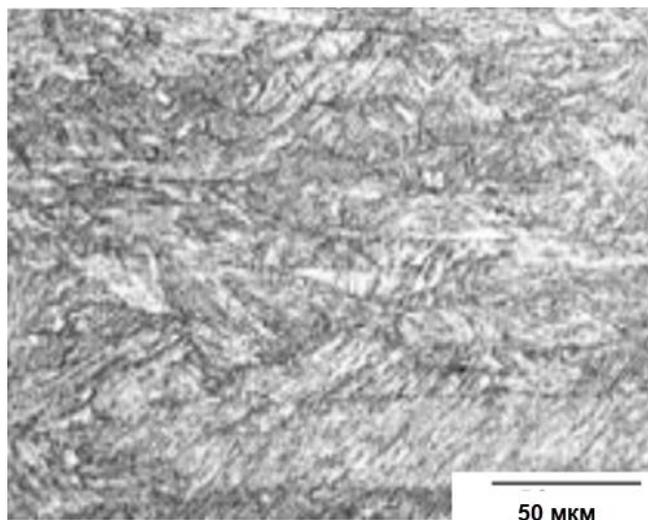


Рис. 4. Микроструктура стали JFE HYD960LE [11]

JFE HYD960LE — высокопрочная сталь, которая в результате пластической деформации и термической обработки приобретает структуру реечного (или пакетного, дислокационного) мартенсита (рис. 4). Интересен тот факт, что при сохранении прочностных показателей сталь с такой микроструктурой обладает более высоким относительным удлинением, чем рассмотренные ранее аналоги. Механические характеристики соответствуют следующим значениям: условный предел текучести составляет $\sigma_{0,2} \geq 930$ МПа, временное сопротивление $\sigma_b > 950$ МПа, относительное удлинение $\delta \geq 12$ % и ударная вязкость $KCV \geq 27$ Дж при температуре -40 °C [12].

Группа японских исследователей во главе с Nagao Akihide [11] в ходе анализа свойств уточнила химический состав стали JFE HYD 960LE. Химический состав стали JFE HYD 960LE содержит следующие элементы (%): С — 0,130, Cr — 1,000, Mn — 1,500, Si — 0,370, Mo — 0,600, S — 0,002, P — 0,010, V — 0,080.

Сортамент толщин листа, доступный промышленности, сопоставим с номенклатурой для стали Armstrong производства ArcelorMittal. Японская компания предлагает листы толщиной от 6 до 50 мм, а также плиты до 63,5 мм.

Сравнительный анализ. Сравнение рассмотренных ранее продуктов с точки зрения их механических характеристик удобно провести при анализе сводной таблицы.

Видно, что все стали обладают примерно одинаковым пределом текучести, легкие флуктуации которого с учетом порядка анализируемой величины особого интереса не представляют. В то же время любопытно распределение параметров, характеризующих пластические свойства: стали с ферритной структурой здесь выглядят привлекательнее, чем многофазные или мартенситные. Особенно выделяется японская JFE-HITEN980S с относительным удлинением в 25 %, однако она обладает самими низкими прочностными характеристиками в сравнении с анализируемыми аналогами. В связи с этим она, вероятно, имеет большую тенденцию к применению в металлоемких областях промышленности, требующих операций гибки и раздачи, например, в автомобильной отрасли.

Механические свойства высокопрочных сталей

Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, не менее	Временное сопротивление σ_b , МПа, не менее	Относительное удлинение δ , %, не менее	Микроструктура стали
XPF1000-UC	920 (продольное направление)	990 (продольное направление)	16 (продольное направление)	Феррит
	960 (поперечное направление)	1010 (поперечное направление)	13 (поперечное направление)	
JFE-HITEN980S	885	950	25	Феррит
SSAB 960MC	960	1000	7	Смесь мартенсита и остаточного аустенита
Optim 960QC	960	980	7	Смесь мартенсита и бейнита
Amstrong Ultra 960QL	960 (лист до 50 мм)	980	10	Смесь мартенсита отпуска и бейнита
	900 (лист свыше 50 мм)	940		
Alform plate 960M x-treme	960 (лист до 50 мм)	980	10	Смесь бейнита и мартенсита
JFE HYD 960LE	960 (лист до 50,8 мм)	980	12	Мартенсит
	930 (лист от 50,8 до 63,5 мм)	950		

Об экономическом аспекте производственного процесса можно сделать следующий вывод: стали ферритного класса дороже, чем их мартенситные аналоги, однако они более технологичны — обладают более высокой пластичностью, что может быть важно в некоторых областях инженерии. Стоимость обусловлена наличием дорогих легирующих элементов (например, ванадия), которые повышают устойчивость феррита и запускают механизм дисперсионного твердения.

Технология производства. Высокая прочность конечного продукта может быть достигнута различными технологическими путями: как при закалке готовых листов, что практикуется при производстве продукции на толстолистовых станах, так и при использовании термомеханической прокатки. Во втором случае, как правило, применяется технология прерванной закалки, что позволяет формировать механические свойства полосы с прокатного нагрева и не прибегать к дополнительной термообработке. Последний способ характерен для широкополосных станов.

Технология термомеханической прокатки (или ТМСП — от англ. *Thermomechanically controlled process*) не нова. Она получила свое развитие в 80-х годах XX века во многих странах, в том числе в Японии, США и СССР, в ответ на возросшие требования к качеству и свойствам металлопроката. Ее применение позволяет значительно снизить склонность сталей к холодному растрескиванию и улучшить их свариваемость.

В случае ТМСП критически важным является контроль состояния металла в ходе операций подогрева слябов, прокатки и охлаждения. Участки производственной линии включают в себя зоны термомеханической прокатки и ускоренного охлаждения. Схема прокатки для обычного процесса и ТМСП схематично показана на рис. 5 (зигзагообразная линия иллюстрирует процесс прокатки).

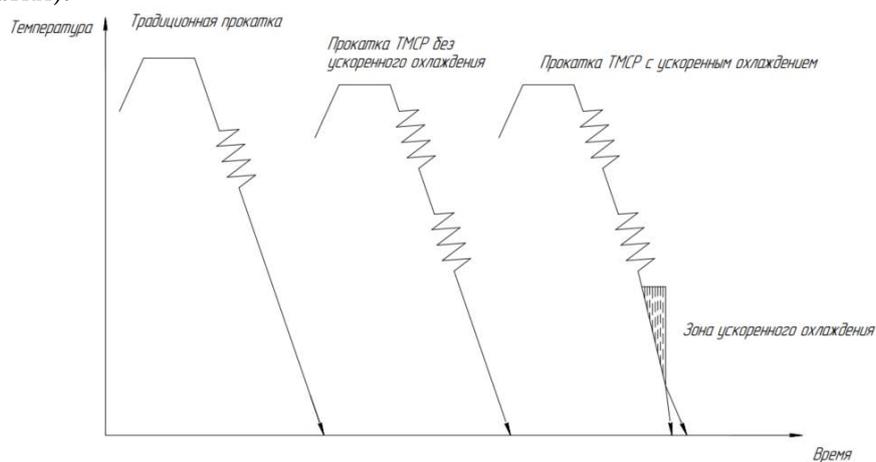


Рис. 5. Схема процессов прокатки

Цель такой обработки — получить требуемую микроструктуру стали, чаще всего мелкозернистую ферритную. Зависимость между временным сопротивлением и углеродным эквивалентом для сталей в прокатанном состоянии (без последующей обработки), произведенных традиционным методом и термомеханической прокаткой (ТМСП), изображена на рис. 6 [13].

С момента своего создания технология стала более вариативной — было разработано множество различных ее модификаций, позволяющих получать различные микроструктуры и, соответственно, свойства. Для примера можно выделить две из них:

1) прокатка начинается при температуре нормализации (A_3), последующее охлаждение со скоростью около $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$. Цель процесса — измельчить зерно и подавить формирование феррита и перлита с последующим образованием бейнита;

2) проходы осуществляются при температуре как выше A_3 , так и ниже нее (в аустенит-ферритной области), а при температуре ниже A_1 процесс прокатки прерывается, и начинается ускоренное охлаждение. Рекристаллизованные зерна при деформации приобретают вытянутую форму, что способствует формированию мелкодисперсного феррита [14].

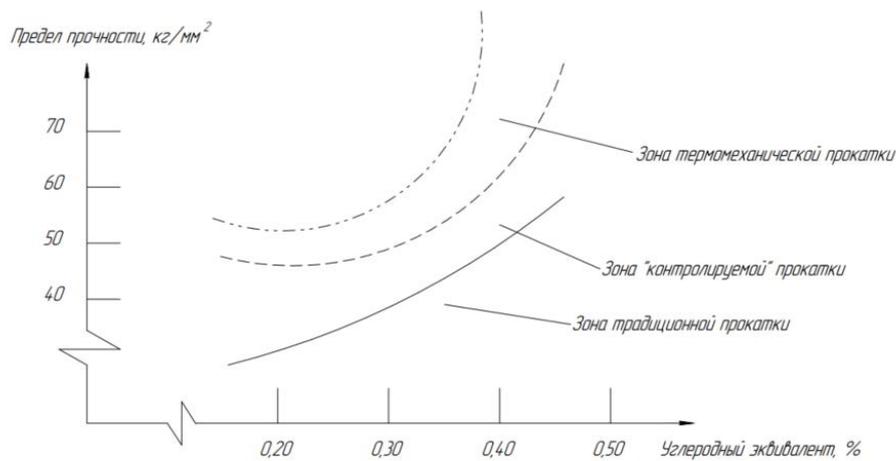


Рис. 6. Зависимость временного сопротивления от углеродного эквивалента для сталей, произведенных по разным технологиям

Таким образом, при варьировании режимов прокатки, времени выдержки между проходами и типа охладителя можно получить совершенно разные по структуре и свойствам стали.

Закалка и отпуск (Q & T) — процессы, широко применяемые для обработки стали и придания ей заданных свойств. В настоящее время участки закалки и отпуска могут быть расположены как на линии адъюстажа, так и отдельно. Важную роль играют скорость охлаждения при закалке, которая зависит от типа охладителя, и температура отпуска, поскольку только правильный подбор режимов обеспечивает получение стали с хорошим сочетанием прочности и пластичности [15].

Как Q & T, так и ТМСР-технологии имеют перед собой одну и ту же цель — получить сталь, которая будет удовлетворять всем предъявляемым к ней требованиям. Ключевая разница между технологиями состоит в сортаменте: Q & T применяется для толстых листов, а ТМСР — для тонких.

Заключение. Представленные на рынке стали обладают достоинствами и недостатками в зависимости от сферы их применения. Например, стали линеек НІТЕН и ХРР больше подходят для применения в автомобильной промышленности и судостроении, так как имеют более высокую пластичность. Тем не ме-

нее, современные мировые производители предлагают широкую номенклатуру продукции, которая способна удовлетворить требования потребителей из разных областей машиностроительной индустрии.

По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что как в европейском, так и в азиатском регионах существует ряд производителей, предлагающих очень похожие по характеристикам высокопрочные низколегированные стали (принимая, безусловно, во внимание тот факт, что в данном обзоре внимание было уделено лишь наиболее известным зарубежным компаниям).

Кроме того, хотя значения механических характеристик рассмотренных сталей лежат в довольно узком диапазоне, достичь их можно разными способами. Выбор технологии производства определяется комплексом требований к продукту, а также тем оборудованием, которое есть в наличии у производителя. Производители, перечисленные в обзоре, могут поставлять как толстолистовой, так и тонколистовой металл.

Особый интерес представляет возможность использования опыта зарубежных производителей для расширения номенклатуры производимых сталей в России, поскольку на данный момент сопоставимых по характеристикам продуктов в стране нет.

Литература

- [1] Hot-rolled XPF1000-UC. *tatasteleurope.com: веб-сайт*. URL: <https://www.tatasteleurope.com/sites/default/files/tata-steel-automotive-hr-XPF1000-uc-datasheet-EN.pdf> (дата обращения: 18.02.2021).
- [2] JFE-HITEN high strength steel plates. *jfe-steel.co.jp: веб-сайт*. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-002.pdf> (дата обращения: 18.02.2021).
- [3] Miřcian M., Frátrik M., Kajánek D. Influence of welding parameters and filler material on the mechanical properties of HSLA steel S960MC welded joints. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 2, art. 305. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11020305>
- [4] Strenx 960MC. *ssab.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.ssab.ru/products/brands/strenx/products/strenx-960-mc> (дата обращения: 18.02.2021).
- [5] Optim QC structural steels. *oxycoupage.com: веб-сайт*. URL: https://www.oxycoupage.com/FichiersPDF/Ruukki_Pdf/English/Optim-QC-structural-steels.pdf (дата обращения: 02.03.21).
- [6] Hemmulia M., Laitinen R., Liimatainen T. et al. Mechanical and technological properties of ultra-high strength optim steels. *Proc. 1st Int. Conf. In Super High Strength Steels*, 2005. URL: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/LINK/71.pdf> (дата обращения: 18.02.2021).
- [7] Siltanen J., Tihinen S., Komi J. Laser and laser gas-metal-arc hybrid welding of 960 MPa direct-quenched structural steel in a butt joint configuration. *J. Laser Appl.*, 2015, vol. 27, no. S2, art. S29007. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4906386>
- [8] Dunder M., Vuherer T., Samardžić I. Weldability prediction of high strength steel S960QL after weld thermal cycle simulation. *Metalurgija*, 2014, vol. 53, no. 4, pp. 627–630.
- [9] High strength steels. *industeel.arcelormittal.com: веб-сайт*. URL: <https://industeel.arcelormittal.com/products/high-strength-steels/ultra-high-strength-960mpa/armstrong-960/> (дата обращения: 18.02.2021).

- [10] High-strength and ultra-high-strength thermomechanically rolled fine-grained steels. *voestalpine.com*: веб-сайт. URL: https://www.voestalpine.com/alform/en/content/download/4494/file/voestalpine_heavy_plate_TTD_ALFORM_620-1100_E_0319.pdf (дата обращения: 18.02.2021).
- [11] Nagao A., Ito T., Obinata T. Development of YP 960 and 1 100 MPa class ultra high strength steel plates with excellent toughness and high resistance to delayed fracture for construction and industrial machinery. *JFE Tech. Rep.*, 2011, no. 11, pp. 13–18.
- [12] High tensile strength steel plate for construction machinery. *jfe-steel.co.jp*: веб-сайт. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/b06.html> (дата обращения: 11.03.21).
- [13] Thermo-mechanical control process: part one. *totalmateria.com*: веб-сайт. URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=366> (дата обращения: 11.03.21).
- [14] What are TMCP (thermo-mechanically controlled processed) steels? *twi-global.com*: веб-сайт. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-tmcp-thermo-mechanically-controlled-processed-steels> (дата обращения: 14.03.21).
- [15] What is quenched and tempered steel? *shapecut.com*: веб-сайт. URL: <https://shapecut.com.au/blog/what-is-quenched-and-tempered-steel/> (дата обращения: 14.03.21).

Степанов Евгений Эдуардович — студент кафедры «Оборудование и технологии прокатки», МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Жихарев Павел Юрьевич — старший преподаватель кафедры «Оборудование и технологии прокатки», МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Степанов Е.Э., Жихарев П.Ю. Разработка высокопрочных низкоуглеродистых сталей за рубежом и в Российской Федерации. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 01(66). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-01-766>

DEVELOPMENT OF HIGH-STRENGTH LOW-CARBON STEELS ABROAD AND IN THE RUSSIAN FEDERATION

E.E. Stepanov

stepanoveea@student.bmstu.ru

SPIN-code: 9237-9092

P.Yu. Zhikharev

zhikharev@bmstu.ru

SPIN-code: 2488-8904

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers the most famous high-strength microalloyed steels with a yield strength of at least 900 MPa from the world's leading manufacturers of rolled metal. The chemical and phase compositions of these materials and their mechanical characteristics are analyzed. It was revealed that the achievement of a set of properties required by consumers is possible when obtaining various types of microstructures: martensitic, ferritic and bainitic phases are used in high-strength steels of this segment; the mechanism of dispersion strengthening is actively used. To achieve all these types of phase composition, manufacturers resort to the use of thermomechanical rolling. It has been established that the production of materials of this class can potentially be mastered under the conditions of continuous wide-strip hot rolling mills operated in the Russian Federation.

Keywords

Microalloying, thermomechanical rolling, alloy steels, high-strength steels, interrupted quenching, wide strip hot rolling mills, temper martensite, precipitation hardening

Received 10.12.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Hot-rolled XPF1000-UC. *tatasteleurope.com: website*. URL: <https://www.tatasteleurope.com/ts/sites/default/files/tata-steel-automotive-hr-XPF1000-uc-datasheet-EN.pdf> (accessed: 18.02.2021).
- [2] JFE-HITEN high strength steel plates. *jfe-steel.co.jp: website*. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-002.pdf> (accessed: 18.02.2021).
- [3] Miřcian M., Frátrik M., Kajánek D. Influence of welding parameters and filler material on the mechanical properties of HSLA steel S960MC welded joints. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 2, art. 305. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11020305>
- [4] Strenx 960MC. *ssab.ru: website* (in Russ.). URL: <https://www.ssab.ru/products/brands/strenx/products/strenx-960-mc> (accessed: 18.02.2021).
- [5] Optim QC structural steels. *oxycoupage.com: website*. URL: https://www.oxycoupage.com/FichiersPDF/Ruukki_Pdf/English/Optim-QC-structural-steels.pdf (accessed: 02.03.21).
- [6] Hemmulia M., Laitinen R., Liimatainen T. et al. Mechanical and technological properties of ultra-high strength optim steels. *Proc. 1st Int. Conf. In Super High Strength Steels*, 2005. URL: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/LINK/71.pdf> (accessed: 18.02.2021).
- [7] Siltanen J., Tihinen S., Komi J. Laser and laser gas-metal-arc hybrid welding of 960 MPa direct-quenched structural steel in a butt joint configuration. *J. Laser Appl.*, 2015, vol. 27, no. S2, art. S29007. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4906386>

- [8] Dunder M., Vuherer T., Samardžić I. Weldability prediction of high strength steel S960QL after weld thermal cycle simulation. *Metalurgija*, 2014, vol. 53, no. 4, pp. 627–630.
- [9] High strength steels. *industeel.arcelormittal.com: website*. URL: <https://industeel.arcelormittal.com/products/high-strength-steels/ultra-high-strength-960mpa/armstrong-960/> (accessed: 18.02.2021).
- [10] High-strength and ultra-high-strength thermomechanically rolled fine-grained steels. *voestalpine.com: website*. URL: https://www.voestalpine.com/alform/en/content/download/4494/file/voestalpine_heavy_plate_TTD_ALFORM_620-1100_E_0319.pdf (accessed: 18.02.2021).
- [11] Nagao A., Ito T., Obinata T. Development of YP 960 and 1 100 MPa class ultra high strength steel plates with excellent toughness and high resistance to delayed fracture for construction and industrial machinery. *JFE Tech. Rep.*, 2011, no. 11, pp. 13–18.
- [12] High tensile strength steel plate for construction machinery. *jfe-steel.co.jp: website*. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/b06.html> (accessed: 11.03.21).
- [13] Thermo-mechanical control process: part one. *totalmateria.com: website*. URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=366> (accessed: 11.03.21).
- [14] What are TMCP (thermo-mechanically controlled processed) steels? *twi-global.com: website*. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-tmcp-thermo-mechanically-controlled-processed-steels> (accessed: 14.03.21).
- [15] What is quenched and tempered steel? *shapecut.com: website*. URL: <https://shapecut.com.au/blog/what-is-quenched-and-tempered-steel/> (accessed: 14.03.21).

Stepanov E.E. — Student, Department of Rolling Equipment and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Zhikharev P.Yu. — Senior Lecturer, Department of Rolling Equipment and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Stepanov E.E., Zhikharev P.Yu. Development of high-strength low-carbon steels abroad and in the Russian Federation. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 01(66). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-01-766.html> (in Russ.).