

Заключение

1. В типовых железобетонных двускатных балках промышленных зданий применяется расположенная в нижней зоне сечения прямолинейная напрягаемая арматура, роль которой заключается в обеспечении трещиностойкости и прочности нормальных сечений, а прочность и трещиностойкость наклонных сечений обеспечивается увеличением толщины стенки и наличием ортогонального поперечного армирования.
2. Отгиб части продольной напрягаемой арматуры из нижней зоны сечения в пролете в верхнюю на опорах повышает трещиностойкость и прочность наклонных сечений, позволяет улучшить условия работы бетона опорной зоны балки, однако при изготовлении таких конструкций увеличивается трудоемкость и требуется дополнительное оборудование.
3. Предлагаемое конструктивное решение двускатной балки позволяет при прямолинейной напрягаемой арматуре сохранить положительные качества балок с отогнутой арматурой. При этом также положительно решаются вопросы объемно-планировочных параметров здания и эксплуатационные условия кровли.
4. По результатам опытного проектирования двускатной балки с прямолинейной напрягаемой арматурой и ломаным нижним поясом установлено, что разработанный усовершенствованный вариант стропильной балки имеет лучшие экономические показатели по расходу стали на 8,2%, расходу бетона – на 10,6%.
5. Двускатные балки с усовершенствованным вариантом конструктивного решения могут применяться в качестве основных несущих

щих конструкций производственных зданий промышленного и сельскохозяйственного назначения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леонгардт, Ф. Предварительно напряженный железобетон. – М.: Стройиздат, 1983. – 245 с.
2. Лин, Т.И. Проектирование предварительно напряженных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1960. – 438 с.
3. Шалобыта, Н.Н. К расчету прочности наклонных сечений железобетонных балок с предварительно напряженной отогнутой арматурой // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Т.М. Пецольд (отв. ред.), Е.А. Ровба [и др.] / Н.Н. Шалобыта, В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 238–242.
4. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры / Н.Н. Шалобыта, В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 1(61): Строительство и архитектура. – С. 78–81.
5. Совершенствование конструкций плит покрытий промышленных зданий / Г.И. Бердичевский, Ю.В. Дмитриев, Л.В. Сасонко [и др.] // Бетон и железобетон. – 1970. – № 8 – С. 20–22.
6. Технико-экономические показатели стропильных балок с отогнутой продольной арматурой / Н.Н. Цыганков, Ю.В. Дмитриев, Л.В. Сасонко [и др.] // Промышленное строительство. – 1970. – № 10 – С. 21–22.

Материал поступил в редакцию 14.01.13

MALINOVSKY V.N., KRIVITSKY P.V., MATVEENKO N.V. Improved version of the constructive decision reinforced concrete beams

In article the improved version of the constructive decision offered by author's girders is considered.

The developed constructive decision girders allows to keep at a rectilinear pretensioned reinforcement merits of girders with forward-bent armature in which for the account unbent parts of longitudinal armature raises crack resistance and durability of slope sectional views. Thus also questions on perfection of space-planning parameters of a building and operational conditions of a roof are positively solved.

УДК 624.014.2

Шалобыта Н.Н., Шалобыта Т.П.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СТАЛЕЙ
В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Введение. Научно-технический прогресс в области металлических конструкций развивается по нескольким основным направлениям, приоритетным из которых является повышение эффективности конструктивных форм строительных конструкций и сооружений на их основе с одновременным повышением надежности и долговечности и установлением областей их рационального применения в зданиях и сооружениях различного назначения. Совершенствование конструктивной формы направлено на достижение максимальной эффективности конструкции. Достигается это различными приемами, главными из которых принято считать: оптимизацию конструктивной формы; применение предварительного напряжения в конструкциях; проектирование систем с совмещением несущих и ограждающих функций в одном элементе; концентрацию материала в мощных конструкциях; преимущественное применение несущих конструкций в виде растянутых поверхностей (мембран) и нитей; широкое внедрение пространственных систем.

Под оптимизацией конструктивной формы понимают такое решение конструкции, ее геометрических параметров, марок стали и расчета, при котором сооружения отвечают заданным архитектурно-конструктивным требованиям. Отсюда вытекают и другие направле-

ния совершенствования строительных металлических конструкций. Прежде всего, это совершенствование материала путем широкого применения сталей высокой и повышенной прочности с пределом текучести 300–400 МПа, а также высокопрочных и особо высокопрочных сталей с пределом текучести до 1200–2000 МПа. Изготовление конструкций из высокопрочных сталей существенно снижает их массу, что в значительной степени впоследствии сказывается и на снижении других расходов, таких как изготовление, транспортировка, монтаж, и является основной причиной их интенсивного применения в мировой практике строительства в первую очередь уникальных мостовых конструкций и многоэтажного строительства [1, 2].

Развитие высокопрочных конструкционных сталей в большинстве стран (США, Япония и т.д.) происходит в основном по двум направлениям: использование уже хорошо зарекомендовавших себя сталей с применением новых режимов термической обработки в сочетании с некоторой модификацией состава, а также разработка специальных сталей, обеспечивающих после термической обработки сочетание высокой прочности и пластичности.

В связи с введением на территории Республики Беларусь Европейских норм и технических документов по проектированию кон-

Шалобыта Николай Николаевич, кандидат технических наук, зав. кафедрой строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Шалобыта Татьяна Петровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

струкций из высокопрочных сталей [8, 9] особый интерес вызывает практическое применение некоторых из них: высокопрочных, микролегированных и высококачественных (с высокими эксплуатационными показателями).

Более трех десятилетий в качестве нового эффективного конструкционного материала при изготовлении несущих конструкций многоэтажных зданий (особенно при количестве этажей более 40), мостов, каркасов промышленных зданий, морских сооружений, а также изготовлении большегрузных портовых кранов и др. используются стали с высокими прочностными характеристиками — высокопрочные стали HSS (highstrengthsteel) — новое поколение сталей, отличающихся от традиционных сталей (например классов S235 ÷ S355) улучшенными физико-механическими свойствами (рис. 1 [2]).

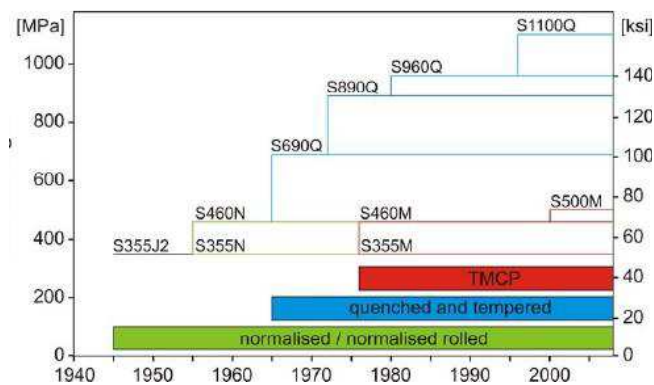


Рис. 1. Хронология появления высокопрочных сталей

В западной и отечественной литературе приняты различные подходы к определению понятия «высокопрочные стали». В американской литературе высокопрочными HSS называют стали, имеющие предел текучести от 260 до 560 МПа. При таком разделении в группу highstrength попадают все стали, кроме мягких малоуглеродистых. Стали, имеющие предел текучести 560 МПа и выше, относят к особо высокопрочным VHSS (veryhighstrengthsteel). Встречаются и более детализированные классификации, включающие три или четыре группы сталей. В отечественной литературе высокопрочными принято называть стали, имеющие предел прочности выше 1300-1500 МПа.

Важными характеристиками высокопрочных сталей, помимо высоких значений предела прочности и предела текучести, являются трещиностойкость и сохранение на приемлемом уровне пластичности. Большое внимание уделяется также такой их характеристике, как свариваемость.

Использование в практике строительства высокопрочных сталей классов прочности (HSS – S460 ÷ S690) и особо высокопрочных сталей (VHSS) классов с прочностью до 1100 МПа предъявляет к ним те же требования, что и для обычных сталей, т.е. при высоких прочностных характеристиках они должны обладать как хорошей вязкостью и пластичностью, так и свариваемостью. Сочетание данных основополагающих требований весьма часто оказывается труднодостижимым, поскольку улучшение какого-либо одного из данных свойств может привести к ухудшению других (например, увеличение процентного содержания углерода в составе стали при ее производстве, с одной стороны, увеличивает ее прочностные свойства, но с другой стороны – снижает ее свариваемость и т.д.). По этой причине в настоящее время в мире разработано несколько видов конструкционных сталей, отличающихся друг от друга различными значениями параметров отмеченных выше свойств, при этом классы HSS-сталей с пределом текучести до 690 МПа, как правило, получают только лишь путем изменения химического состава или изменением производственного процесса. Так, к примеру, в Японии был специально разработан особый вид высококачественных сталей. Его отличительная особенность – постоянный предел текучести для проката стали толщиной в диапазоне 16–100 мм [7]. В случае обычной стали, предел текучести уменьшается по мере увеличения толщины пластины, что и отражается в стандартах на материал (рис. 2). Используя новый вид стали, проектировщики получили возможность не только задействовать более высокий предел текучести утолщенного

листвого проката, но и проектировать более экономичные несущие конструкции за счёт уменьшения толщины проката при одних и тех же нагрузках, обеспечивая высокий уровень их надежности.

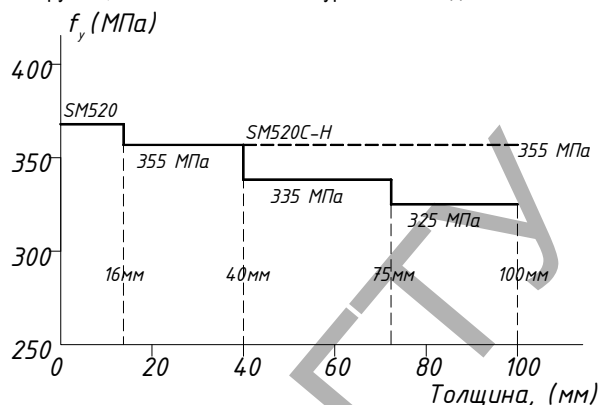


Рис. 2. Сравнение пределов текучести традиционной и высококачественной сталей класса SM 520 (по стандарту) JIS

Выбор высокопрочной (высококачественной) стали для практического применения в качестве конструкционного материала напрямую зависит от конкретных требований, предъявляемых в каждом отдельном случае к материалу, функциональному назначению конструкции, условий эксплуатации и т.д. Так, например, для конструкций, к которым предъявляются особые требования к ударной вязкости, выбор материала стали ограничивается условиями эксплуатации. Известно, что ударная вязкость стальных изделий уменьшается с понижением температуры, в связи с чем возникает опасность их хрупкого разрушения. Однако использование высокопрочных сталей с высокой ударной вязкостью позволяет проектировать конструкции в районах, характеризующихся очень низкими (высокими) температурами (рис. 3) [2]. Применение стали данного вида позволяет: во-первых, выполнять формообразование в холодном состоянии с уменьшенным радиусом изгиба, и, во-вторых, стальные изделия могут использоваться в районах с низкими температурами, поскольку ударная вязкость такой стали не уменьшается даже при крайне низких температурах.

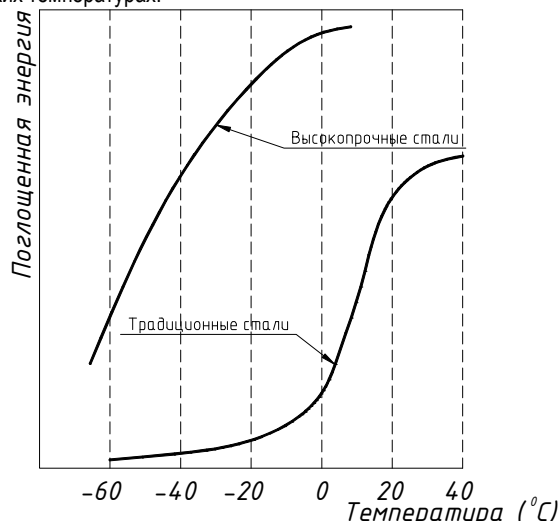


Рис. 3. Сравнение кривых изменения ударной вязкости сталей

Необходимо отметить, что для высокопрочных сталей их химический состав и качество значительно зависят от процесса производства, контролируемого изготовителем, механической обработки, которой сталь подвергается в процессе изготовления из нее конкретной конструкции (резка, сверление, сварка и т.д.). Количество и виды легирующих элементов в химическом составе HSS-сталей не являются неизменными и варьируются в зависимости от того, какими свойствами должна обладать сталь в каждом конкретном случае (таблица 1).

Таблица 1 [9]. Максимальное содержание элементов в химическом составе высокопрочных сталей

Марка	Качество	Максимальное содержание элементов, %														
		C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
S460Q S500Q S550Q S620Q S690Q		0,22	0,86	1,80	0,025	0,012	0,016	0,0060	1,60	0,55	0,74	0,07	2,1	0,07	0,14	0,17
S460Q S500Q S550Q S620Q S690Q	L	0,22	0,86	1,80	0,025	0,012	0,016	0,0060	1,60	0,55	0,74	0,07	2,1	0,07	0,14	0,17
S460Q S500Q S550Q S620Q S690Q	L1	0,22	0,86	1,80	0,025	0,012	0,016	0,0060	1,60	0,55	0,74	0,07	2,1	0,07	0,14	0,17

Таблица 2 [9]. Механические свойства стали в состоянии после закалки и отпуска

Наименование		Минимальный предел текучести R_{t0} МПа, при номинальной толщине, мм			Предел прочности R_m МПа, при номинальной толщине, мм			Минимальное относительное удлинение при разрыве, % $l_0 = 5,65\sqrt{S_0}$
Согласно EN10027-1	Согласно EN10027-2	>3 ≤50	>50 ≤100	>100 ≤150	>3 ≤50	>50 ≤100	>100 ≤150	
S460Q S460QL S460QL1	1,8908 1,8906 1,8916	460	440	400	от 550 до 720		от 500 до 670	17
S500Q S500QL S500QL1	1,8924 1,8909 1,8984	500	480	440	от 590 до 770		от 540 до 720	17
S550Q S550QL S550QL1	1,8904 1,8926 1,8986	550	530	490	от 640 до 820		от 590 до 770	16
S620Q S620QL S620QL1	1,8914 1,8927 1,8987	620	580	560	от 700 до 890		от 650 до 830	15
S690Q S690QL S690QL1	1,8931 1,8928 1,8988	690	650	630	от 770 до 940	от 760 до 930	от 710 до 900	14

В настоящее время одним из главных факторов, сдерживающих широкое применение HSS-сталей в строительстве, являются высокие издержки при ее производстве по сравнению со сталями традиционных классов. В соответствии с Европейскими нормами [3] HSS-стали поставляются главным образом как закаленные с отпуском (Q&T) или термомеханически обработанные с контролем качества сталь (TMCP). В первом случае высокие прочностные свойства (до 1100 МПа) достигаются при минимальном значении предела текучести, а во втором случае умеренные прочностные характеристики (до 500 МПа) могут быть получены с высокими показателями по свариваемости сталей. При этом высокопрочные стали с минимальным пределом текучести от 460 до 690 МПа в закаленном с отпуском состоянии (Q&T) в целом обладают высокими прочностными характеристиками в сочетании с высокой ударной вязкостью, достаточной пластичностью и улучшенными показателями по свариваемости по сравнению с мягкими сталями традиционных марок [1, 3, 4]. Стальной прокат из данных сталей существенно снижает массу конструкции по сравнению с ее изготовлением из традиционных марок сталей и поэтому наиболее широко применяется при проектировании «гибридных» несущих конструкций, например, двутавровых балок с полками из высокопрочной стали и стенкой из мягкой стали, днищ резервуаров и т.д.

Микролегированные стали или высокопрочные низколегированные ВПНЛ или HSLA (highstrengthlowalloysteelormicroalloyedsteel) стали получили это наименование из-за того, что они содержат в своем составе от 0,07 до 0,12% углерода, до 2% марганца и добавки

малых количеств ниобия, ванадия, титана и бора, суммарное количество которых практически не превышает 0,1%...0,2%. Эти элементы, вместо того чтобы входить в кристаллическую решетку железа как легирующие агенты, соединяются с углеродом и азотом в матрице, образуя тонкодисперсные карбиды, нитриды и карбонитриды. Эти соединения способствуют измельчению зерна и обуславливают твердение матрицы за счет их выделения в ферритных зернах. Стали HSLA обладают улучшенными механическими свойствами и/или большей сопротивляемостью коррозии, вызываемой атмосферными воздействиями, по сравнению с традиционными углеродистыми сталями [5]. Уменьшение размеров зерен и упрочнение дисперсными частицами являются главными механизмами, посредством которых достигается увеличение предела текучести микролегированных сталей при одновременном сохранении желаемых уровней пластичности и свариваемости.

При рассмотрении влияния указанных элементов (в первую очередь это ванадий, ниобий, титан, бор) на свойства и структуру низколегированных сталей необходимо учитывать степень их сродства к углероду, азоту, кислороду и сере. По степени сродства к азоту титан и ванадий значительно превосходят ниобий, к кислороду и сере – титан превосходит ниобий и ванадий. Ванадий и ниобий образуют стойкие карбиды и нитриды, имеющие высокую температуру растворения в аустените, поэтому они способствуют измельчению зерна. Нитриды титана практически не растворяются до температуры плавления. При увеличении содержания ванадия и ниобия повышаются и прочностные характеристики стали. Наиболее суще-

ственное влияние на повышение предела текучести оказывает ниобий, а затем ванадий. Ниобий в количестве 0,02% замедляет рост зерна и обеспечивает получение мелкозернистой стали. Большие количества ниобия не столь эффективны, но усиливают дисперсионное твердение. Для получения такого же эффекта упрочнения содержание ванадия должно быть в 2–3 раза выше количества ниобия. Низколегированная сталь HSLA-V [6] содержит небольшие добавки ванадия (менее 0,12%), которые способствуют резкому увеличению их прочности по сравнению со стандартными низколегированными углеродисто-марганцевыми сталями при одновременном удовлетворении всех требований в отношении пластичности, свариваемости и ударной вязкости. Низколегированная сталь титаном в горячекатаном состоянии характеризуется высокой прочностью, но низкой пластичностью и ударной вязкостью, причем повторный нагрев до 650°C продолжительностью до 20 ч сопровождается небольшим разупрочнением без улучшения пластичности и вязкости. Повышение температуры нагрева до 680–700°C (даже кратковременная выдержка) сильно снижает уровень прочностных характеристик и существенно повышает значения ударной вязкости. Такое изменение механических свойств низколегированной стали с титаном при нагреве объясняется изменением формы нахождения титана в стали. В горячекатаном состоянии титан при общем количестве 0,1% располагается в нитридах (около 0,025%) и оксидах (около 0,002%), а также частично в твердом растворе (около 0,02%). После низкотемпературного нагрева (отжига) количество твердорастворного титана резко уменьшается (примерно на порядок) и обычно не превышает 0,003%. Выделение титана из твердого раствора сопровождается существенным повышением ударной вязкости при одновременном снижении прочности. Было установлено, что микродобавки циркония в очень малых количествах (до 0,18%) существенно влияют на распад структурных превращений, а также, измелчая структурные составляющие, заметно повышают прочностные и вязкие свойства стали. Такое влияние циркония объясняется его способностью образовывать в процессе горячей пластической и термической обработки специальные карбиды и нитриды. Оптимальным содержанием циркония в стали с точки зрения хладостойкости является 0,065–0,10%. Бор является очень важным легирующим элементом с точки зрения его влияния на фазовые превращения, протекающие как в процессе кристаллизации, так и в процессе термической обработки. Бор в большей степени, чем углерод, влияет на фазовые превращения, протекающие на границах зерен аустенита, смещает эвтектическую точку влево и вызывает сужение области существования аустенита. Бор также оказывает пластифицирующие действия и повышает технологичность при волочении.

Высококачественная сталь с высокими эксплуатационными свойствами HPS (high performance (weathering) steel) характеризуется высокими пластическими свойствами, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью, свариваемостью [4]. Сталь этого вида обладает также повышенной усталостной прочностью, легкостью формообразования (благодаря низким значениям углеродного эквивалента) [7]. Стали данной категории с индексацией (W) при определенных атмосферных условиях (при обязательном наличии влаги и кислорода) придают изделию повышенную сопротивляемость коррозии в сравнении с обыкновенными углеродисто-марганцевыми сталями путем образования на их наружной поверхности защитного слоя. Конструкции, изготовленные из такой стали, не требуют покраски.

Таким образом, в мировой практике в настоящее время высокопрочные (высококачественные) стали начали широко применять при проектировании ответственных уникальных большепролетных несущих конструкций (фермы, рамы, арки), в несущих конструкциях

нестандартных неразводных и разворачиваемых мостов, элементов подвесных конструкций [1, 3, 5, 6].

Заключение. В отечественной строительной практике в настоящее время применяются низкоуглеродистые и низколегированные стали в основном только в горячекатаном и нормализованном состояниях. Уровни прочности этих сталей не удовлетворяют требованиям современных металлоконструкций с позиции уровня свойств надежности и технологичности. Развитие материалов для строительства и проведение исследований в этой области за последнее время было главным образом направлено на оптимизацию свойств сталей, особенно высокопрочных. Высококачественные микро- и низколегированные стали после регламентированной прокатки и термомеханического упрочнения могут широко применяться при изготовлении каркасов промышленных зданий, колонн, стропильных и подстропильных ферм, подкрановых конструкций, покрытий промышленных зданий, резервуаров и других объектов. Одним из главных достоинств современных стальных конструкций является их высокая надежность в эксплуатации. Особенно это проявляется в конструкциях, работающих в тяжелых условиях, например, в многоэтажных, высотных зданиях и сооружениях. Применение высокопрочных сталей позволяет осуществить ряд принципиально новых конструктивных решений и создать менее металлоемкие, но более экономичные и надежные конструкции.

Введение на территории Республики Беларусь Европейских норм и технических документов по проектированию конструкций из высокопрочных сталей [8, 9], приобретение практического опыта по применению новых стальных материалов повышенной и высокой прочности для надежных современных металлических конструкций является одним из необходимых условий интенсификации строительной отрасли Республики Беларусь и интеграции в мировой процесс исследований и разработок.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Eleni Gogou Use of high strength steel grades for economical bridge design // Civil Engineering and Geosciences. – Amsterdam: Delft University of Technology Iv-Infra.
2. Prof. Dan Dubina The politechnica University of Timisoara // Performance and benefits of using high strength steels. – ECCS Annual Meeting Aalesund, 18 September 2008. – Technical Meeting Session.
3. Anders Samuelsson, Falko Schröter. High performance steels in Europe- Production Processes, mechanical and Chemical Properties, Fabrication Properties. – PhD, SSAB Oxelösund, Sweden, Dr.-Ing., Dillinger Hütte GTS, Germany.
4. Colin Macdougall¹, Robert G. Driver², Gilbert Y. Grondin. A State-of-the-Art Review of High Performance Steel for Bridge Design. Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Queen's University, Kingston, Canada, Associate Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg. University of Alberta, Edmonton, Canada.
5. Key to Metals: Application of Micro-alloyed HSLA Steel: Part One.
6. HSLA-V, Vanadium steel technology: HSLA-V Steel. High-Strength Low-Alloy steel Micro-alloyed with Vanadium.
7. SMDI - Steel Market development Institute: High Performance Steel Bridges.
8. EN 10025- 6. Hot rolled products of structural steels - Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
9. Проектирование стальных конструкций: ТКП EN 1993-1-12-2009 (02250). Еврокод 3. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – Ч. 1-12: Дополнительные правила применения EN 1993 для стали марок до S700.

Материал поступил в редакцию 03.02.13

SHALOBYTA N.N., SHALOBYTA T.P. Prospects of application effective staley in modern construction

The general characteristic and scopes high-strength staley is given in article.