

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

**В** общей стоимости изготовленной и смонтированной строительной стальной конструкции стоимость металлопроката составляет 60–70 %, поэтому применение технологичных видов проката и марок сталей ведет к снижению себестоимости конструкций. Расширение диапазона сталей, позволяющих повышать технологичность стальных конструкций не только по минимизации веса, но и по оптимизации критериев коррозионной стойкости и огнестойкости с эффективным использованием их в несущих металлических конструкциях различных зданий и сооружений, является одной из приоритетных задач, решаемых сегодня в инженерных подразделениях ООО «Метинвест».

Критерии определения целесообразности применения сталей высокой прочности по минимизации веса определяются видом силового воздействия (растяжение, сжатие, внецентренное сжатие, изгиб) и соотношением в конструкции несущих и вспомогательных (конструктивных) деталей, которые, как правило, выполняются из малоуглеродистых сталей.

Коэффициенты снижения веса определяются по известным формулам [1]:

при растяжении

$$p = \frac{F_{л3}}{F_{з3}} = \frac{R_{з3}}{R_{л3}} \frac{(p + g_{л3})}{(p + g_{з3})};$$

при сжатии

$$сж = \frac{F_{лз}}{F_{зз}} = \frac{R_{зз}}{R_{лз}} \frac{(p + g_{лз})}{(p + g_{зз})};$$

при внецентренном сжатии

$$вс = \frac{F_{лз}}{F_{зз}} = \frac{R_{зз}}{R_{лз}} \frac{вн.з}{вн.л} \frac{(p + g_{лз})}{(p + g_{зз})};$$

при изгибе

$$и = \frac{F_{лз}}{F_{зз}} = \frac{R_{зз}}{R_{лз}} \sqrt{\frac{R_{зз}^2 (p + g_{лз})}{R_{лз}^2 (p + g_{зз})}},$$

где  $F_{з3}$ ,  $F_{л3}$  – площади растянутых, сжатых, внецентренно сжатых и изгибаемых элементов из стали малоуглеродистой и стали повышенной прочности соответственно;  $з3$ ,  $л3$  – строительный коэффициент соответственно для конст-



**Е.И. Гезенцев**

начальник проектно-строительного отдела ООО «Метинвест Инжиниринг», г. Днепропетровск

рукций из малоуглеродистых и сталей повышенной прочности. Строительные коэффициенты снижают общую экономию, получаемую при применении сталей высокой прочности, поскольку вес конструктивных деталей остается практически постоянным и не зависит от прочностных показателей материала. Соотношение строительных коэффициентов может быть описано формулой  $л = 1 + \frac{-1}{з}$ , где  $т$  – теорети-

ческий коэффициент снижения веса элемента;  $p$  – нагрузка, эквивалентная нагрузкам, действующим на сооружение;  $g_{з}$ ,  $g_{л}$  – эквивалентные нагрузки от собственного веса конструкций из малоуглеродистой стали и стали высокой прочности.

Закон изменения коэффициента продольного изгиба в зависимости от величины  $R$  имеет вид:

$$\frac{100}{\sqrt{0,4 \frac{R_{л}}{R_{з}} + 1}},$$

где  $R_{з}$ ,  $R_{л}$  – расчетные сопротивления для сталей малоуглеродистых и сталей высокой прочности.

Установлено, что средняя экономия по весу металла в фермах, выполненных полностью из низколегированных сталей, составляет 10–12 %, в балках 12–15 %, в легких колоннах 8–10 %, в тяжелых – 18–20 % [1].

Технические характеристики рассматриваемой стали ТМСП определены ДСТУ EN 10025-4:2007 «Вироби гарячекатані з конструкційної сталі», предприятие, производящее данный высокопрочный прокат, сертифицировано (сертификат TUV NORD). С целью презентации стали S460M и ее основных показателей выполнен

тестовый расчет применительно к зданию РУ ДП № 3, проектируемому в комплексе сооружений ППО на ПАО Енакиевский металлургический завод. Это сооружение запроектировано в традиционной расчетной схеме, представляющей собой рамно-связевую этажерку с шарнирным опиранием стоек на фундаменты.

Проведено сравнение основных несущих конструкций каркаса, выполненных из составных двутавров – из сталей С245 и S460М, с расчетом в пространственной модели по программе SCAD. Результаты расчетов показали высокую степень экономии по весу основных конструкций.

**Сравнительная характеристика колонн здания РУ ДП-3, принимаемых из разных сталей**

Расчетное сопротивление		Сталь С245 $R_y = 2450 \text{ кг/см}^2$	Сталь С440 $R_y = 4400 \text{ кг/см}^2$
Коэффициент условий работы		0,95	0,95
Сечение стойки К2		1 – 360 × 12 2 – 300 × 20	1 – 368 × 10 2 – 260 × 16
Геометрические характеристики	$F \text{ (см}^2\text{)}$	163,2	120,0
	$W \text{ (см}^3\text{)}$	2401,28	1742,08
	$I_x \text{ (см}^4\text{)}$	48025,6	3484,6
	$I_y \text{ (см}^4\text{)}$	9005,184	4690,0
	$i_x \text{ (см)}$	17,154	17,04
	$i_y \text{ (см)}$	7,428	6,252
Расчетные сочетания усилий	$N \text{ (т)}$	80,0	80,0
	$M \text{ (т*м)}$	26,0	26,0
	$Q \text{ (т)}$	10,0	10,0
Проверка прочности	$= N/F + M/W \text{ (кг/см}^2\text{)}$	$490 + 1083 = 1573$	$667 + 1492,5 = 2159,5$
Гибкость	$l_x \text{ (м)}$	5,15	5,15
	$l_y \text{ (м)}$	14,6	18,2
	$x$	84,24	106,8
	$y$	68,64	82,8
Проверка устойчивости	$x_{уст} \text{ (кг/см}^2\text{)}$	1676,0	2838,22
	$y_{уст} \text{ (кг/см}^2\text{)}$	1978,4	3365,0
Погонный вес колонны (кг/м)		128,0	94,0
Вес всех колонн (т) (шесть колонн общей длиной 99,2 м)		12,7	9,3
Сечение стойки К1		1 – 276 × 8 2 – 300 × 12	1 – 220 × 8 2 – 240 × 10
Геометрические характеристики	$F \text{ (см}^2\text{)}$	94,08	65,6
	$W \text{ (см}^3\text{)}$	1089,347	588,489
	$I_x \text{ (см}^4\text{)}$	16340,198	7061,867
	$I_y \text{ (см}^4\text{)}$	5401,178	2304,94
	$i_x \text{ (см)}$	13,18	10,375
	$i_y \text{ (см)}$	7,6	5,928
Расчетные сочетания усилий	$N \text{ (т)}$	65,0	65,0
	$M \text{ (т*м)}$	1,0	1,0
	$Q \text{ (т)}$	3,0	1,5
Проверка прочности	$= N/F + M/W \text{ (кг/см}^2\text{)}$	$691 + 275,4 = 966,4$	$990,9 + 254,9 = 1245,8$
Гибкость	$l_x \text{ (м)}$	5,15	5,15
	$l_y \text{ (м)}$	5,15	5,15
	$x$	38,4	49,2
	$y$	79,2	100,8
Проверка устойчивости	$x_{уст} \text{ (кг/см}^2\text{)}$	628,43	1045,0
	$y_{уст} \text{ (кг/см}^2\text{)}$	721,53	1713,8
Погонный вес колонны (кг/м)		74,0	51,5
Вес всех колонн (т) (две колонны общей длиной 17,05 м)		2,52	1,76

Расчетное сопротивление		Сталь С245 $R_y = 2450 \text{ кг/см}^2$	Сталь С440 $R_y = 4400 \text{ кг/см}^2$
Коэффициент условий работы		0,95	0,95
Сечение стойки КЗ		1 – 360 × 12 2 – 400 × 20	1 – 368 × 10 2 – 260 × 16
Геометрические характеристики	$F \text{ (см}^2\text{)}$	203,2	120,0
	$W \text{ (см}^3\text{)}$	3123,95	1742,08
	$\ell_x \text{ (см}^4\text{)}$	62478,93	34841,6
	$\ell_y \text{ (см}^4\text{)}$	21338,52	4690,0
	$i_x \text{ (см)}$	17,535	17,04
	$i_y \text{ (см)}$	10,25	6,25
Расчетные сочетания усилий	$N \text{ (т)}$	205,0	205,0
	$M \text{ (т*м)}$	0	0
	$Q \text{ (т)}$	14,0	14,0
Проверка прочности	$= N/F + M/W \text{ (кг/см}^2\text{)}$	1008,86	1708,33
Гибкость	$\ell_x \text{ (м)}$	5,15	5,15
	$\ell_y \text{ (м)}$	5,15	5,15
	$x$	49,8	82,8
	$y$	30,0	30,0
Проверка устойчивости	$x_{уст} \text{ (кг/см}^2\text{)}$	954,28	2717,0
	$y_{уст} \text{ (кг/см}^2\text{)}$	896,0	3365,0
Погонный вес колонны (кг/м)		160,0	94,0
Вес всех колонн (т) (одна колонна общей длиной 4,59 м)		0,73	0,43

К числу перспективных прочностных преимуществ этих сталей можно отнести их повышенные прочностные характеристики при действии усилий, направленных перпендикулярно поверхности, т.е. «поперек проката». В сочетании с оптимизацией технологии сварочных работ по уменьшению времени на предварительный нагрев металла это свойство позволяет выполнять жесткие узлы соединений как балок с колоннами, так и других элементов по традиционной методике конструкции узлов и в условиях предприятия-изготовителя конструкций, что гарантирует высокую надежность соединений и уменьшает трудозатраты на мехобработку (расверловка отверстий под несущие болты) и обязательную в этом случае контрольную сборку [2, 3].

Кроме прочности, необходимой для эффективной эксплуатации металлоконструкций при минимизации веса, существенным фактором, влияющим на несущую способность, является их огнестойкость, т.к. вследствие нерегулярного повышения температуры окружающей среды балки, колонны, фермы и другие элементы металлоконструкций теряют прочность и деформируются, в результате чего происходят обрушения как отдельных частей, так и целиком зданий [4].

Для зданий и сооружений металлургических предприятий сохранение несущей способности их конструкций и, как следствие, повышение уровня безопасности является приоритетной задачей при проектировании. В то же время, следуя требованиям ДБН В.1.1-7-2002 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва», проектировщик объектов металлургического комплекса сталкивается с проблемой сочетания противопожарных требований – обеспечения нормируемого предела огнестойкости – с задачами антикоррозионной защиты металлоконструкций, находящихся, как правило, в среднеагрессивной внешней среде, характерной для большинства производственных участков. Применение в проектах способов огнезащиты, рекомендуемых типовой серией 400-0-17 «Конструктивные решения по защите металлических конструкций от воздействия огня», или новых материалов вспучивающихся красок и минераловатных плит не дает эффективной защиты, особенно в узлах соединений конструкций. Мероприятия по выполнению огнезащиты дорогостоящие, продолжительны во времени, в случае применения красок покрытия требуют периодического восстановления, что не всегда осуществимо в условиях действующего производства.

## Сравнительная характеристика балок здания РУ ДП-3, принимаемых из разных сталей

Расчетное сопротивление		Сталь С245 $R_y = 2450 \text{ кг/см}^2$	Сталь С440 $R_y = 4400 \text{ кг/см}^2$
Коэффициент условий работы		0,95	0,95
Сечение балки на отм. +11.650 +15.200 +18.200 +20.900		1 – 368 × 10 2 – 250 × 16	1 – 300 × 8 2 – 200 × 10
Геометрические характеристики	$F \text{ (см}^2\text{)}$	116,8	64,0
	$W \text{ (см}^3\text{)}$	1683,06	713,33
	$I_x \text{ (см}^4\text{)}$	33661,27	11413,33
	$I_y \text{ (см}^4\text{)}$	4169,73	1334,61
	$i_x \text{ (см)}$	16,98	13,36
	$i_y \text{ (см)}$	5,98	4,57
Расчетные сочетания усилий	$N \text{ (т)}$	10,0	10,0
	$M \text{ (т*м)}$	23,0	23,0
	$Q \text{ (т)}$	25,0	25,0
Проверка прочности	$= N/F + M/W \text{ (кг/см}^2\text{)}$	$85,62 + 1366,6 = 1452,2$	$156,3 + 3224,3 = 3380,6$
Прогиб	$f \text{ (мм)}$	16,68	20,64
Погонный вес балок (кг/м)		92,0	50,0
Вес всех балок (т) (общая длина 74,0 м)		6,81	3,7
Сечение балок покрытия		1 – 368 × 10 2 – 200 × 16	1 – 280 × 8 2 – 200 × 10
Геометрические характеристики	$F \text{ (см}^2\text{)}$	100,8	62,4
	$W \text{ (см}^3\text{)}$	1387,98	658,45
	$I_x \text{ (см}^4\text{)}$	27759,62	9876,8
	$I_y \text{ (см}^4\text{)}$	2136,4	1334,53
	$i_x \text{ (см)}$	16,6	12,58
	$i_y \text{ (см)}$	4,61	4,63
Расчетные сочетания усилий	$N \text{ (т)}$	3,0	3,0
	$M \text{ (т*м)}$	12,0	12,0
	$Q \text{ (т)}$	7,0	7,0
Проверка прочности	$= N/F + M/W \text{ (кг/см}^2\text{)}$	$29,76 + 865 = 894,76$	$48,1 + 1822,5 = 1870,6$
Прогиб	$f \text{ (мм)}$	8,31	10,92
Погонный вес балок (кг/м)		79,0	49,0
Вес всех балок (т) (общая длина 27,0 м)		2,1	1,3
Сечение балки по оси Б		1 – 660 × 12 2 – 300 × 20	1 – 568 × 12 2 – 200 × 16
Геометрические характеристики	$F \text{ (см}^2\text{)}$	199,2	132,16
	$W \text{ (см}^3\text{)}$	4785,99	2430,3
	$I_x \text{ (см}^4\text{)}$	167509,6	72907,7
	$I_y \text{ (см}^4\text{)}$	9009,504	2141,5
	$i_x \text{ (см)}$	29,0	23,5
	$i_y \text{ (см)}$	6,73	4,03
Расчетные сочетания усилий	$N \text{ (т)}$	20,0	20,0
	$M \text{ (т*м)}$	80,0	80,0
	$Q \text{ (т)}$	20,0	20,0
Проверка прочности	$= N/F + M/W \text{ (кг/см}^2\text{)}$	$100,4 + 1672 = 1772,0$	$151,3 + 3291,8 = 3443,1$
Прогиб	$f \text{ (мм)}$	16,68	20,64
Погонный вес балок (кг/м)		156,0	104,0
Вес всех балок (т) (общая длина 12,2 м)		1,9	1,3

Общий вес конструкций

Обозначение	Сталь С245 $R_y = 2450 \text{ кг/см}^2$	Сталь С440 $R_y = 4400 \text{ кг/см}^2$
К1	2,52	1,76
К2	12,7	9,3
К3	0,73	0,43
Б1а	6,81	3,7
Б11 и Б5	2,1	1,3
Б9	1,9	1,3
<b>Всего</b>	<b>26,76</b>	<b>17,79</b>
<b>Экономичность применения стали С440 – 33,52 %</b>		

Приемлемым решением комплекса этих задач может стать проектирование конструкций с использованием новых марок конструкционных сталей с повышенными показателями огнестойкости. Строительные конструкции из таких сталей под нагрузкой при воздействии высокой температуры дольше сохраняют свою несущую способность по сравнению с обычными сталями при прочих равных условиях.

В настоящее время разработана и испытана огнестойкая сталь двух марок – 06БФ и 06МБФ, которая производится в России. При этом доказано, что основой для сталей, огнестойких до 700 °С, может служить система Cr-Mo-V-Nb,

причем согласно анализу полученных результатов содержание элементов должно находиться в следующих пределах: С 0.06–0.09, Si 0.2–0.4, Cr 0.3–0.5, Mo 0.25–0.40, V 0.07–0.11, Nb 0.02–0.05, Ti 0.01.

Сравнивая эти данные с химическим составом ТМСП-стали марки S460M, можно сделать вывод, что показатели содержания основных химических элементов близки к приведенным в данных испытаниях. Это позволяет заключить, что сталь S460M также обладает повышенной огнестойкостью. Так, при испытании балок из сталей 06БФ и 06МБФ классов прочности С255 и С345 без огнезащиты установлено, что огнестойкость по сравнению с балками из обычной стали повысилась на 30 % и составляет 45 мин [5, 6].

Таким образом, можно сделать вывод, что эффективным способом повышения технологичности строительных металлоконструкций по огнестойкости является применение в проектах стали марки S460M, что позволит конструкциям выполнять требуемые функции при воздействии пожара в течение времени, необходимого для принятия действенных противопожарных мер.

**ТМСП – это:**

**ТМ** - Thermo-Mechanical

**С** - Controlled

**Р** - Process

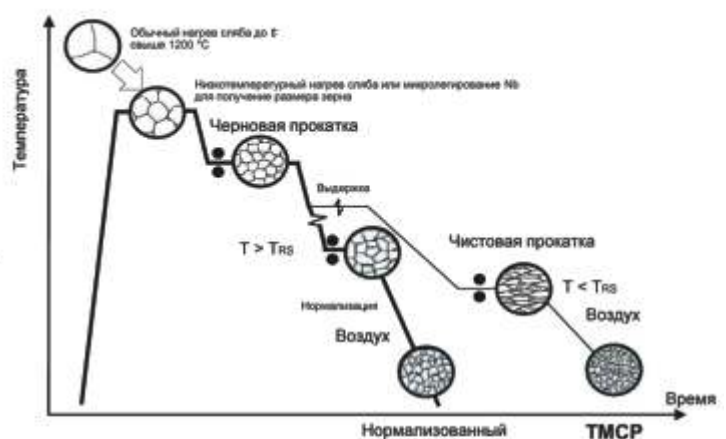
**Термомеханический контролируемый процесс**

инновационная технология прокатки, при которой конечная мелкозернистая микроструктура металла достигается прокаткой в диапазоне температур 900-700 °С и микролегированием

ТМСП отличается от других способов отсутствием дополнительной термообработки вне потока и минимальным использованием легирующих элементов

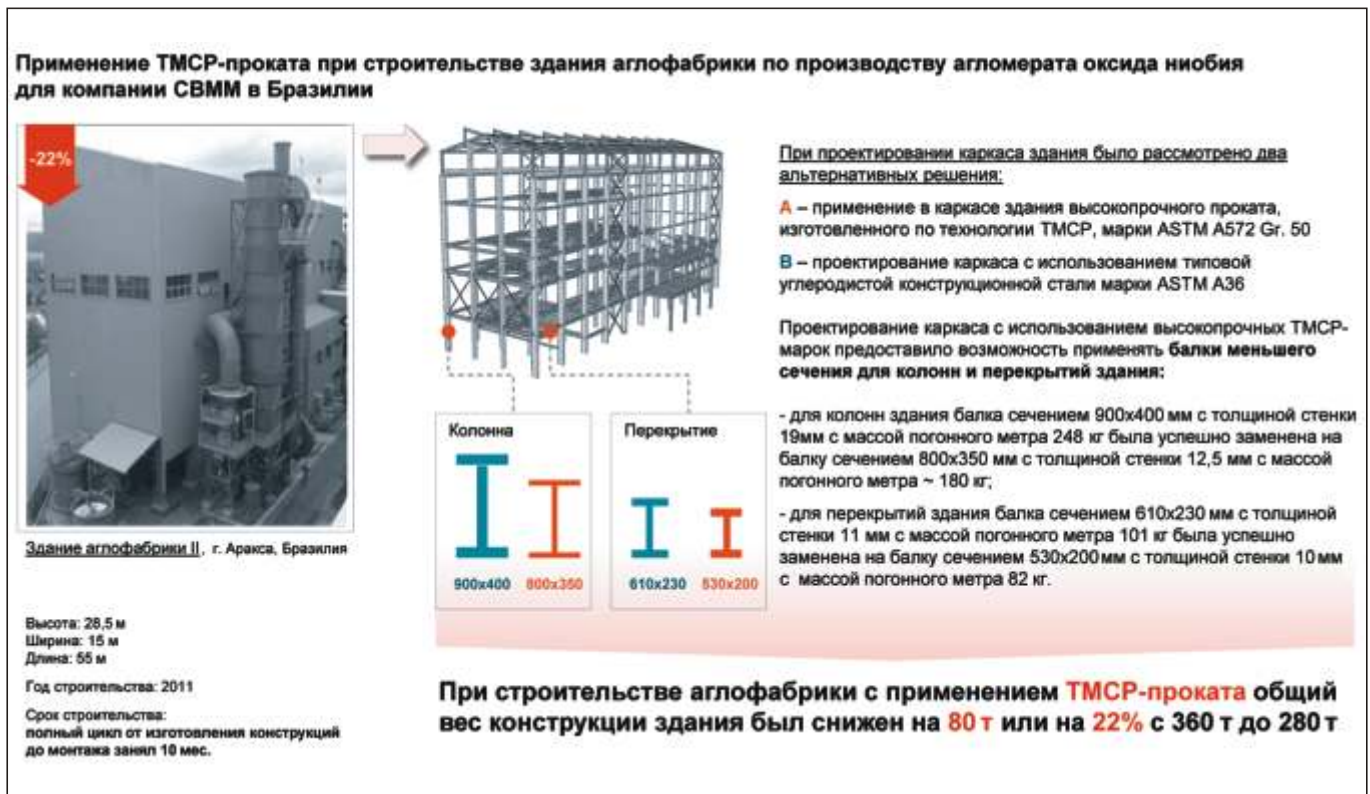
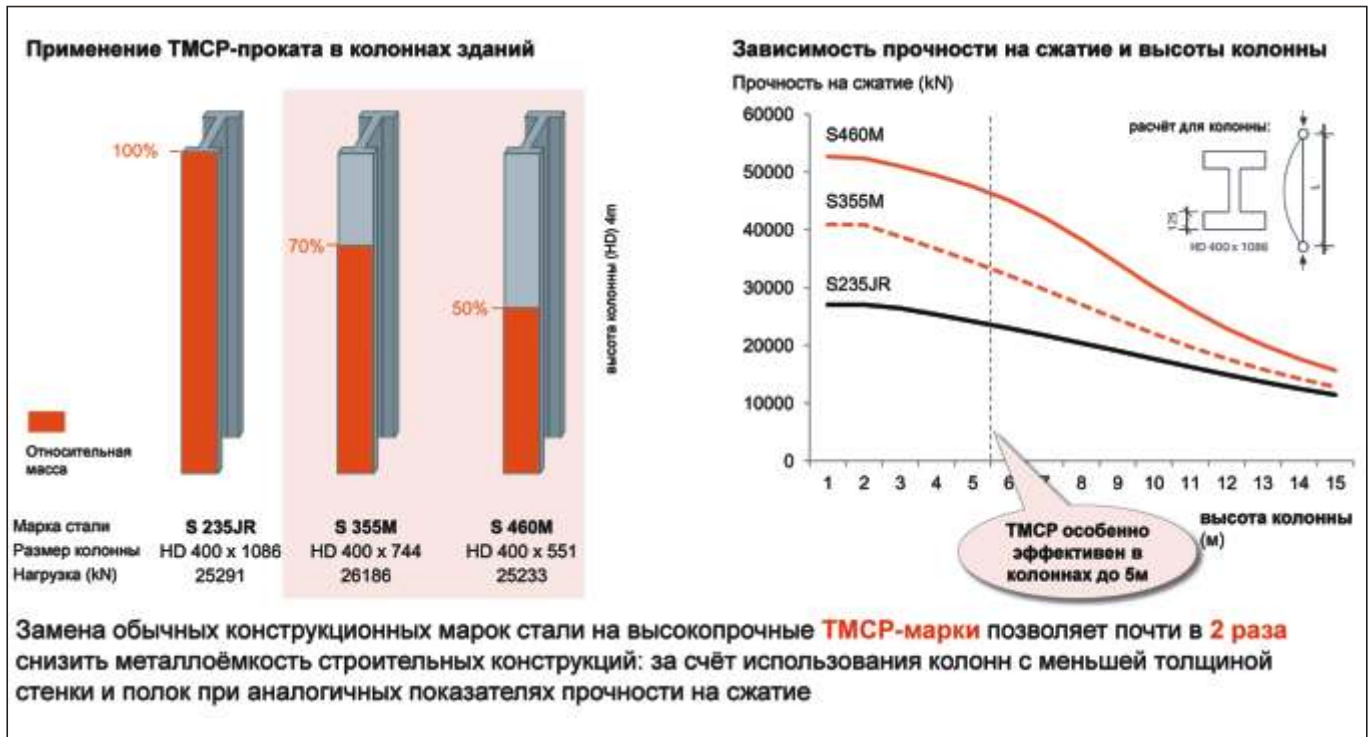
ТМСП-прокат изготавливается по ДСТУ EN 10025-4:2007

Схема ТМСП процесса



Обозначение ТМСП-сталей	Химический состав, %													Механические свойства*			
	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера	Нобий	Ванадий	Титан	Хром	Никель	Молибден	Медь	Никель	Алюминий мм.	$R_{m, \text{тип}}$ МПа	$R_m$ МПа	Мин. удлинение после разрыва, %
S275M	0,13	0,50	1,50	0,030	0,025	0,05	0,08	0,05	0,30	0,30	0,10	0,55	0,01	0,02	275	370-530	24
S275ML				0,025	0,020												
S355M	0,14	0,50	1,60	0,030	0,025	0,05	0,10	0,05	0,30	0,50	0,10	0,55	0,015	0,02	355	470-630	22
S355ML				0,025	0,020												
S420M	0,16	0,50	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,05	0,30	0,80	0,20	0,55	0,025	0,02	420	520-680	19
S420ML				0,025	0,020												
S460M	0,16	0,60	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,05	0,30	0,80	0,20	0,55	0,025	0,02	460	540-720	17
S460ML				0,025	0,020												

\*  $R_{m, \text{тип}}$  – значения предела текучести для толщин не более 16мм;  $R_m$  – значения предела прочности для толщин не более 40мм



Параллельно необходимо разработать и испытать конструктивные формы, способные воспринимать воздействие огня максимально продолжительное время при действии эксплуатационных нагрузок в условиях реального пожара.

В настоящее время возникла насущная потребность в уточнении требований ДБН В.1.1-7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» в части определения пределов огнестойкости металлоконструкций промышленных зданий и сооружений, находящихся в условиях реального пожара.

**Применение ТМСП-проката при строительстве одного из самых высоких транспортных мостов в мире**



**Выздух Мийо**, г. Мийо, Франция

Макс. высота: 343 м  
 Ширина: 32 м  
 Длина: 2460 м  
 Год завершения строительства: 2004  
 Стоимость проекта: 400 млн. €  
 Срок строительства: 38 мес.  
 Гарантия: 120 лет

Конструкция одного из самых высоких мостов в мире состоит из трёх основных элементов:



**Стальные пилоны**

Семь пилонов высотой 88,92 м и весом около 700 т. К каждому из них крепятся 11 пар вант, поддерживающих дорожное полотно

**Стальное полотно**

Полотно насчитывает 8 пролётов. Шесть центральных пролётов имеют длину 342 м каждый, а два крайних — 204 м. Полотно состоит из 173 центральных кессонов, настоящих позвоночных сооружений, к которым плотно припаяны боковые настилы и крайние кессоны. Центральные кессоны состоят из секций по 4 м в ширину и 15-22 м в длину при общем весе в 90 т

**Бетонные опоры**

7 опор высотой от 75 до 245 м

**Сталь в конструкциях**

**S355N S460M**

3 200т 1 400т

23 500т 12 500т

**Выгоды от применения стальных конструкций при строительстве моста:**

- **снижение веса полотна моста на 70%** в сравнении с бетонным решением (36 тыс.т против 120 тыс.т)
- **снижении высоты балки коробчатого сечения полотна до 4,2 м** (меньше воздействие ветровой нагрузки)
- **безопасность:** предварительная сварка и сборка конструкций снизили объём работ на высоте
- **минимизация количества поддерживающих вант и нагрузки на фундамент**
- **большой нормативный срок эксплуатации – 120 лет**
- **экономия общих затрат на проект**

Вес конструкции моста для стального варианта в сравнении со строительством в бетоне снижен на 60 %

**Активное применение ТМСП-проката в мостостроении в Европе**



**Мост Эрасмус**  
г. Роттердам, Нидерланды

Макс. высота: 139м  
 Ширина: н.д.  
 Длина: 802м  
 Год завершения строительства: 1996  
 Вес металлоконструкций: 6 800т  
**4 200т листа марки S355M**



**Зресуннский мост**  
г. Мальмо, Швеция – г. Копенгаген, Дания

Макс. высота: 203,5м  
 Ширина: 23,5м  
 Длина: 7 845м  
 Год завершения строительства: 2000  
 Вес металлоконструкций: 82 000т  
**60 000т листа марки S460M**  
**16 000т листа марки S420M**



**Мост Ильверич**  
г. Дюссельдорф, Германия

Макс. высота: н.д.  
 Ширина: 33м  
 Длина: 5 910м  
 Год завершения строительства: 2002  
 Вес металлоконструкций: 7 500т  
**(вкл. лист марки S460M)**



**Мост Еннеёс Хеерма**  
г. Амстердам, Нидерланды

Макс. высота: 26м  
 Ширина: 38м  
 Длина: 230м  
 Год завершения строительства: 2001  
 Вес металлоконструкций: 2 480т  
**(вкл. лист марки S460M)**

[1] Лихтарников Я.М. Металлические конструкции. Методы технико-экономического анализа при проектировании. – М.: Стройиздат, 1968.  
 [2] Сахновский М.М. Технологичность строительных стальных конструкций. – К.: Будівельник, 1970.  
 [3] Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. – М.: Стройиздат, 1964.  
 [4] Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Пожарная безопасность и наука, 2001.

[5] Муратов А.Н. Разработка состава и технологии промышленного производства проката из огнестойкой стали для строительных конструкций. Автореферат диссертации, 2007.  
 [6] Пехотиков А.В. Огнестойкость изгибаемых стальных конструкций // Автореферат диссертации, 2007.  
 [7] Мосалков И.Л. и др. Огнестойкость строительных конструкций, 2001.

Надійшла 04.12.2014 р.