

Применение термомеханически упрочненного листового проката в стальном строительстве

Владислав Горбатенко
Менеджер по развитию новых продуктов
Кандидат технических наук
ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»



❖ **Термомеханический контролируемый процесс (ТМСП)** - технология прокатки, при которой конечная мелкозернистая микроструктура металла достигается микролегированием, прокаткой в диапазоне температур 900-700°C и контролируемым охлаждением.

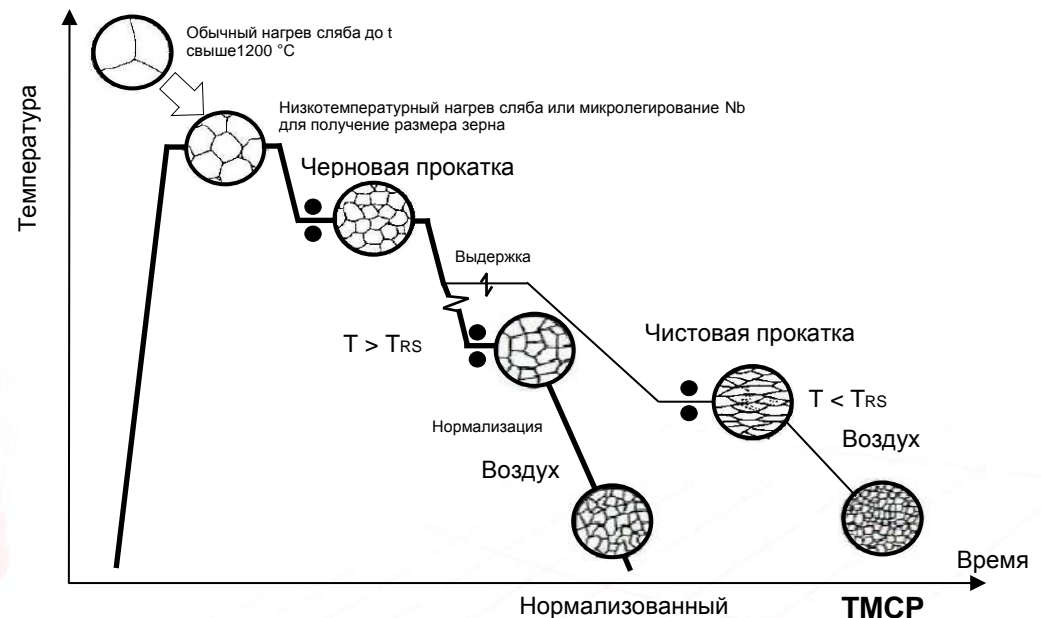
❖ В отличие от стандартных технологий прокатки ТМСП-процесс позволяет получить уникальную мелкозернистую структуру металла, которая обеспечивает высокую прочность и хорошую формуемость. ТМСП-прокат имеет низкий углеродный эквивалент, что обуславливает хорошую свариваемость.

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

❖ ТМСП-прокат изготавливается по EN 10025-4:2007 (ДСТУ EN 10025-4:2007), а также EN 10149-2:1995.

❖ ТМСП-прокат широко применяется в областях техники, где требуется снижение веса металлоконструкций с одновременным повышением прочностных характеристик - строительство, ветрогенерация, судостроение, машиностроение. Благодаря высокой прочности, свариваемости и устойчивости к хрупкому растрескиванию прокат может применяться в конструкциях с температурой эксплуатации до -50°C с гарантированными значениями ударной вязкости.

Сравнение технологии нормализующей прокатки и ТМСП



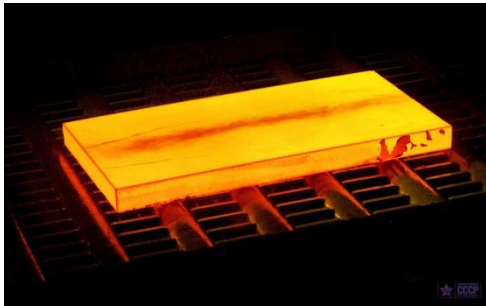
ТМСП – это:

ТМ - Thermo-Mechanical

С - Controlled

Р – Process

**Термомеханический
контролируемый процесс**



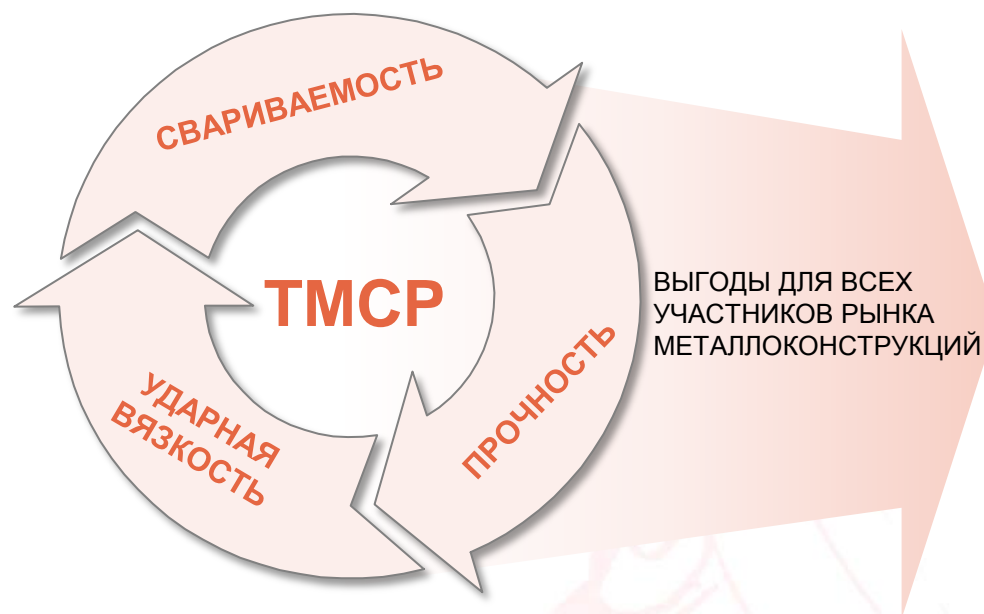
Преимущества ТМСП проката

Свойства:

1. Химический состав – **низкий углеродный эквивалент**
2. Механические характеристики – **высокая прочность, высокая ударная вязкость**

Экономия:

1. **Сокращение затрат на переработку** – уменьшение затрат на сварочные материалы и нагрев металла, отсутствие дополнительной т/о
2. **Снижение веса металлоконструкций** в сравнении с традиционными марками



Участники строительства

Выгоды от использования ТМСП-проката

ПРОЕКТИРОВЩИКИ

- большая свобода в выборе проектных решений
- улучшение эксплуатационных свойств конструкций в самых экстремальных условиях (низкие температуры..)

ПРОИЗВОДИТЕЛИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

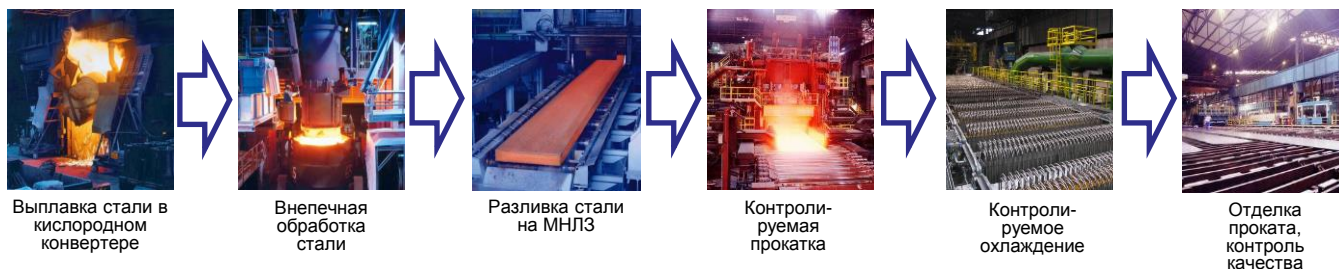
- упрощение сварочных работ – меньше времени на предварительный нагрев металла
- снижение затрат на сварку и улучшенные свойства сварных соединений

ЗАКАЗЧИКИ

- **минимизация веса металлоконструкций**
- сокращение фазы производства металлоконструкций – **сокращение сроков строительства**

Применение **ТМСП-проката** несёт существенные выгоды для всех участников производства стальных конструкций, позволяя снизить издержки и ускорить реализацию проектов

Схема производства термомеханически упрочненного проката



Сортамент ТМСП проката МК Азовсталь/ ММК им. Ильича

Стандарт	Предприятие	Марки стали	Геометрические размеры, мм
ДСТУ EN 10025-4	МК Азовсталь	S275M/ML, S355M/ML, S420M/ML, S460M/ML	8-50 x 1500-3200 x 6000-12200
	ММК им. Ильича	S275M/ML, S355M/ML, S420M/ML, S460M/ML	6-50 x 1500-2700 x 6000-12000
EN 10149-2:1995	МК Азовсталь	S315MC, S355MC, S420MC, S460MC, S500MC, S550MC, S600MC*, S650MC*, S700MC*	8-50 x 1500-3200 x 6000-12200
	ММК им. Ильича	S315MC, S355MC, S420MC, S460MC	6-50 x 1500-2700 x 6000-12000

* Находится на стадии опытного освоения

✿ В условиях Группы МЕТИНВЕСТ листовой ТМСП прокат производится в соответствии со стандартом ДСТУ EN 10025-4:2007, EN 10149-2:1995 и другой нормативно-технической документацией на Metallургическом комбинате «АЗОВСТАЛЬ» (стан 3600) и Мариупольском металлургическом комбинате им. Ильича (стан 3000).

✿ На стане 3000 ММК им. Ильича серийно производится прокат с пределом текучести до 460 МПа (S460M/ML).

✿ Оборудование стана 3600 МК АЗОВСТАЛЬ с современной установкой контролируемого охлаждения позволяет освоить производство ТМСП проката вплоть до S700MC (в настоящее время освоены марки S420M/ML – S460M/ML, S315MC – S550MC).

- ✿ ТМСП-прокат сертифицирован и стандартизирован в Украине (**ДСТУ EN 10025-4:2007**)
- ✿ Термомеханически упрочненный прокат внесен в перечень марок, рекомендуемых к применению в стальном строительстве Украины (**ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування¹⁾**)
- ✿ Термомеханически упрочненный прокат МЕТИНВЕСТ используется при строительстве зданий, сооружений и мостов в Украине и Европе.



¹ Согласно приказу №167 от 10.06.2014 г. Министерства регионального развития, строительства и ЖКХ Украины, ДБН В.2.6-198:2014 с 01.01.2015 р. заменяет ДСТУ Б В.2.6-194:2013 и ДБН В.2.6-163:2010 в части раздела 1

Область применения

Примеры использования



Промышленное и гражданское строительство

- Строительные металлоконструкции – колонны, фермы, элементы перекрытий и пр.
- Элементы мостов и эстакад



Оффшорные конструкции

- Несущие части оффшорных платформ
- Элементы морских буровых установок



Производство ветрогенераторов

- Элементы башен ветрогенераторов



Тяжелое и общее машиностроение

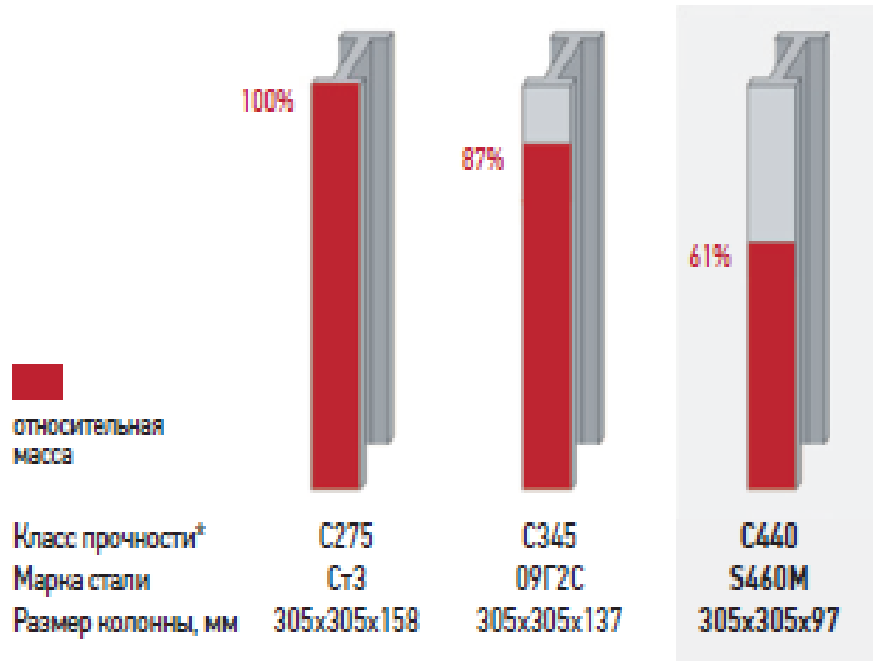
- Стрелы автокранов, рамы грузовых автомобилей и сельскохозяйственной техники, силовые детали
- Обшивка боковых и торцевых стен вагона, рама полувагона
- Элементы турбин, гидро- и турбогенераторы



Дистрибуция/ Ремонт

- Восстановительный ремонт отдельных изнашивающихся узлов вышеприведенного оборудования в условиях конечного потребителя либо специализированных ремонтных предприятий

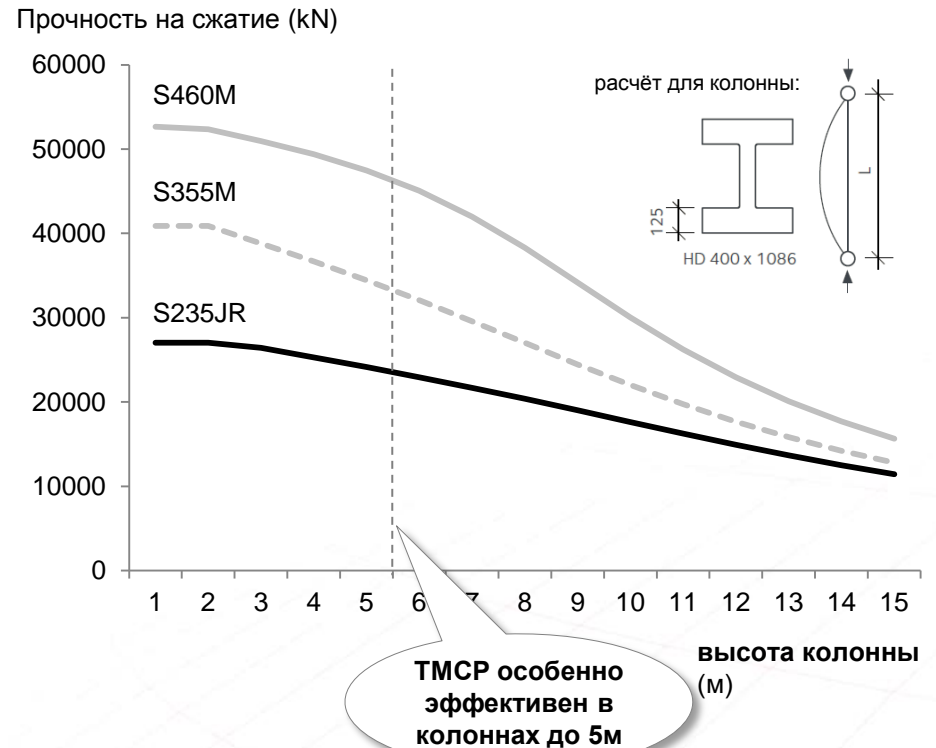
Применение ТМСП-проката в колоннах зданий



* Согласно ГОСТ 27772-88

** Расчетная нагрузка – 4250 кН

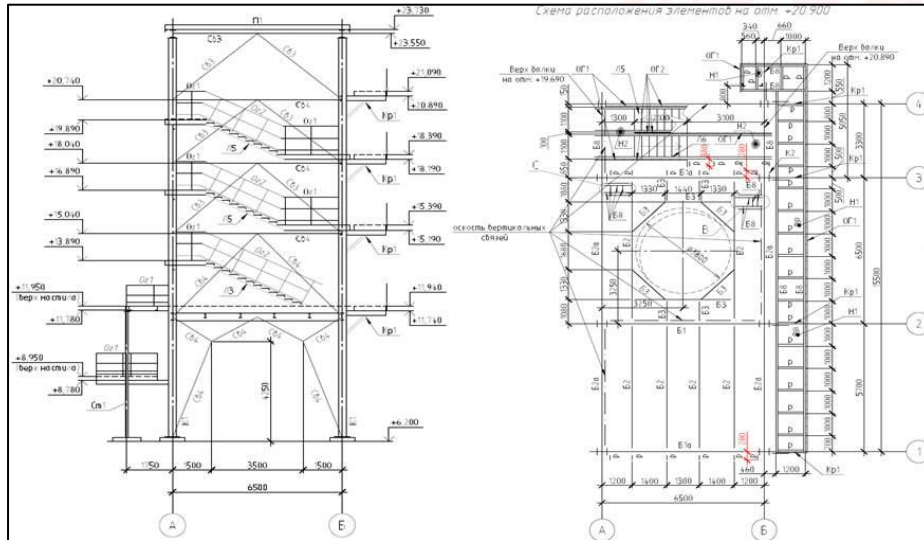
Зависимость прочности на сжатие и высоты колонны



Замена обычных конструкционных марок стали на высокопрочные ТМСП-марки позволяет значительно снизить металлоёмкость строительных конструкций: за счёт использования колонн с меньшей толщиной стенки и полок при аналогичных показателях прочности на сжатие

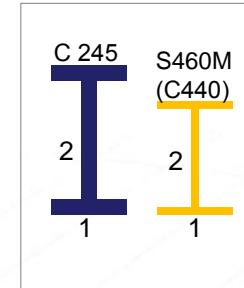
Снижение металлоемкости при использовании ТМСП- проката в промышленном строительстве

- ❖ ООО «Гипрометз» выполнило тестовый расчет объекта распределительного устройства доменной печи №3 ПАО ЕМЗ в комплексе сооружений установки пылеугольного вдувания. Цель работ - определение возможных зон применения стали S460M в зданиях каркасного типа. Основные несущие конструкции каркаса выполнены из составных сварных двутавров, материал конструкций - сталь класса С245. Исследована возможность замены этих элементов на составные сварные двутавры из стали S460M (класс прочности С440 по ГОСТ 27772). Расчет конструкций выполнен в пространственной модели методом конечных элементов по программе SCAD.
- ❖ Определяющими являются показатели расчета по второму предельному состоянию, ввиду чего перспективной для применения проката из данной марки стали может быть расчетная схема каркаса с жесткими соединениями элементов в узлах. Сравнительный анализ на основании расчета показывает экономию для элементов с жесткими соединениями в узлах **33,52%.**



Сечения колонн и балок идентичного применения из стали С245 и С440

	Сталь С245 $R_y=2450 \text{ кг/см}^2$	Сталь С440 $R_y=4400 \text{ кг/см}^2$
K1	1-276*8 2-300*12	1-220*8 2-240*10
K2	1-360*12 2-300*20	1-368*10 2-260*16
K3	1-360*12 2-400*20	1-368*10 2-260*16
Балки на отм. +11.650, +15.200, +18.200, +20.900	1-368*10 2-250*16	1-300*8 2-200*10
Балки покрытия	1-368*10 2-200*16	1-280*8 2-200*10



Общий вес конструкций

	Сталь С245 $R_y=2450 \text{ кг/см}^2$	Сталь С440 $R_y=4400 \text{ кг/см}^2$
K1	2,52	1,76
K2	12,7	9,3
K3	0,73	0,43
Б1а	6,81	3,7
Б11 и Б5	2,1	1,3
Б9	1,9	1,3
Всего	26,76	17,79

Снижение металлоемкости конструкций при применении стали S460M (C440) взамен С245 составляет **33,52%**



г. Киев, реконструкция
ресторанного комплекса
с усилением несущих
конструкций по адресу: ул.
Крещатик, 29

(2-й этаж 8-ми этажного жилого
здания в историческом центре)



Балка, S460M

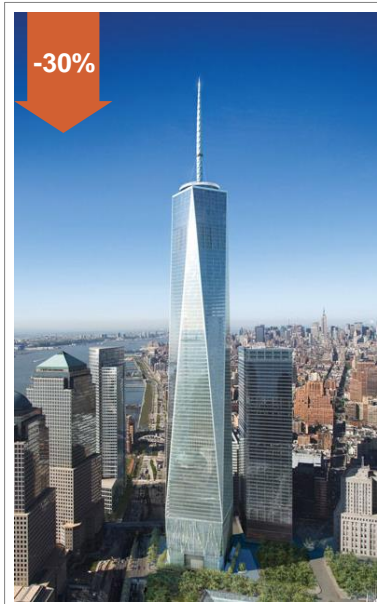
Колонна, 09Г2С

Старое железобетонное
перекрытие, исключаемое
из работы



Сварная балка, S460M
(полка 40 мм., стенка 20 мм.,
перфорированная под проводку
коммуникаций с целью
минимизации высоты
перекрытия)

Применение ТМСП-проката в современных коммерческих зданиях



Всемирный торговый Центр

Местоположение:
г. Нью-Йорк, США

Год завершения строительства:
2014 (план)

Высота: 541м
Количество этажей: 104



Башня Хёрста

Местоположение:
г. Нью-Йорк, США

Год завершения строительства:
2002

Высота: 201м
Количество этажей: 47



Мапфре Башня

Местоположение:
г. Барселона, Испания

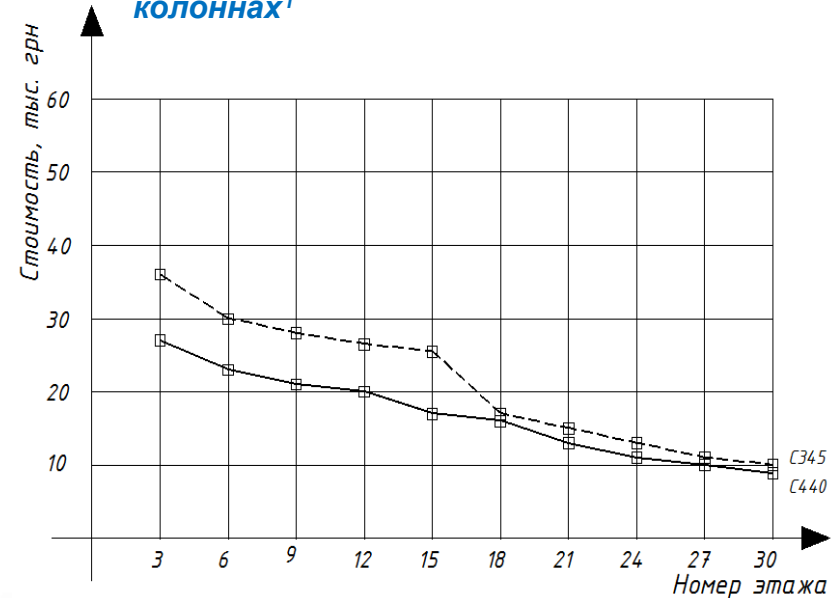
Год завершения строительства:
1992

Высота: 154м
Количество этажей: 42



Снижение веса металлоконструкций здания в результате использования высокопрочного ТМСП-проката

Эффективность использования стали повышенной прочности в сварных колоннах¹



¹ данные Киевского национального университета строительства и архитектуры

Использование ТМСП-проката в колоннах современных высотных зданий коммерческого назначения позволяет достичь 20-30% экономии металлопроката

- ✿ В июне 2013 года компания МЕТИНВЕСТ произвела поставку листового металлопроката марки S460M (EN 10025-4) толщиной 10-50 мм в объеме 6000 тонн в адрес польской компании Gotowski. Ключевой компетенцией компании является строительство мостов, виадуков и мостовых переходов.
- ✿ Прокат S460M используется при производстве металлоконструкций автомобильного моста протяженностью 1000 метров через реку Висла.
- ✿ По заявлению главного конструктора компании Gotowski, применение листового проката марки стали S460M позволит **снизить металлоемкость строительства на 15-30%** в зависимости от элементов конструкции моста. **Срок возведения моста сократится ориентировочно на 2,5 месяца** (в сравнении с вариантом строительства моста из традиционных марок).



Активное применение ТМСП-проката в мостостроении в Европе



Мост Эрасмус

Местоположение:
г. Роттердам, Нидерланды

Макс. высота: 139м
Ширина: н.д.
Длина: 802м

Год завершения строительства: 1996

Вес металлоконструкций: 6 800т

4 200т листа марки S355M



Эресуннский мост

Местоположение:
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

Местоположение:
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 Enneüs Heerma

Местоположение:
г. Амстердам, Нидерланды

Макс. высота: 26м
Ширина: 38м
Длина: 230м

Год завершения строительства: 2001

Вес металлоконструкций: 2 480т

(вкл. лист марки S460M)



- Горячая формовка (с температурой выше 580 °С) **недопустима**, т.к. приводит к потере механических свойств и структурных преимуществ ТМСП проката.



- Холодная формовка возможна.
- «Теплая» формовка рекомендуется при температурах до 580 °С



- Значительное снижение либо исключение предварительного нагрева
- Отсутствие дополнительных сварочных операций
- Сокращение времени производства
- Невысокая твердость зоны сварного шва ввиду низкого углеродного эквивалента, низкая склонность к образованию холодных сварочных трещин



- Отсутствие необходимости дополнительной термической обработки после сварки

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЯ



Преимущество ТМСП проката №1 – низкий углеродный эквивалент

Химический состав стали класса прочности 460 МПа

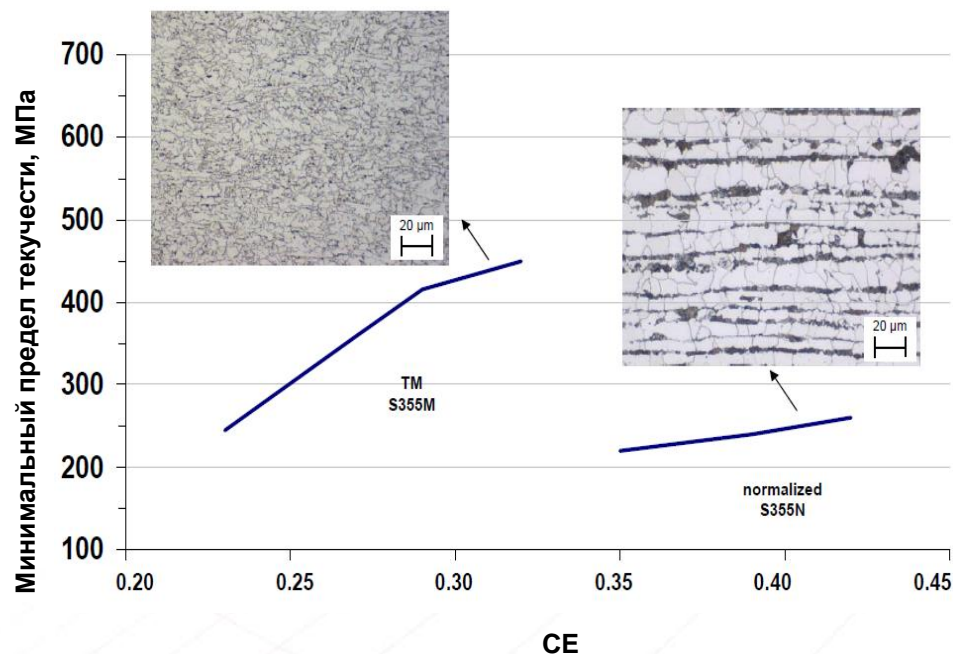
	Массовая доля элемента, %			
	S460N ДСТУ EN 10025-3:2007 (нормализация)		S460M ДСТУ EN 10025-4:2007 (ТМСП)	
	Требования стандарта	Фактическое среднее значение	Требования стандарта	Фактическое среднее значение
C	≤ 0,20	0,17	≤ 0,16	0,12
Mn	1,00 - 1,70	1,60	≤ 1,70	1,59
Si	≤ 0,60	0,26	≤ 0,60	0,28
S	≤ 0,020	0,004	≤ 0,025	0,004
P	≤ 0,025	0,008	≤ 0,030	0,009
Nb	≤ 0,05	0,042	≤ 0,05	0,034
V	≤ 0,20	0,063	≤ 0,12	0,054
Ti	≤ 0,050	< 0,005	≤ 0,050	< 0,005
Al общ	≥ 0,02	0,030	≥ 0,02	0,030
Cr	≤ 0,30	0,02	≤ 0,30	0,03
Ni	≤ 0,80	0,64	≤ 0,80	0,04
Cu	≤ 0,55	0,02	≤ 0,55	0,02
Mo	≤ 0,10	< 0,01	≤ 0,20	0,01
N	≤ 0,025	0,007	≤ 0,025	0,009
CE	≤ 0,53	0,49	≤ 0,45	0,41
CET	≤ 0,44	0,35	≤ 0,41	0,28

Углеродные эквиваленты:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$$

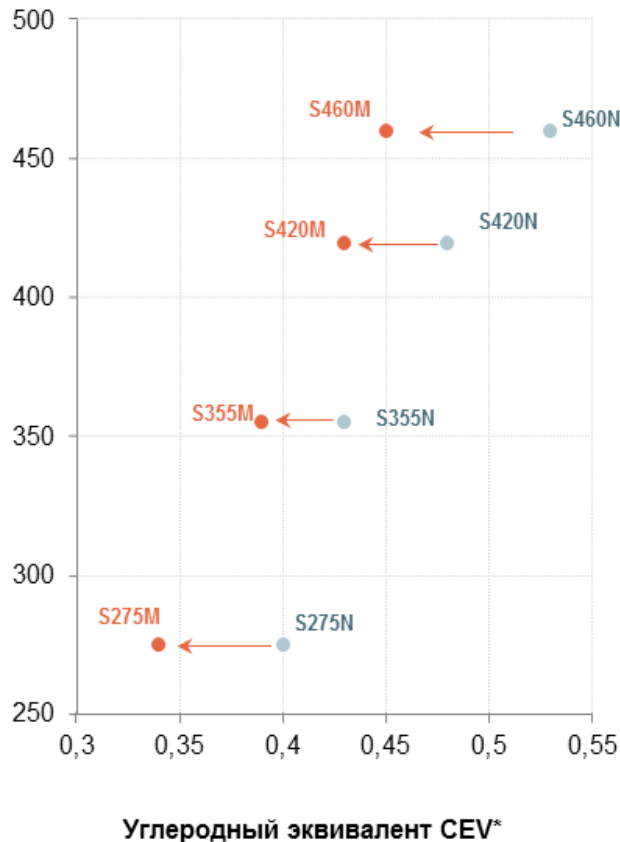
Типичные углеродные эквиваленты и микроструктура нормализованной и термомеханически упрочненной сталей



Процесс ТМСП позволяет получать заданные высокие механические свойства проката с улучшенными показателями свариваемости и формования при более низких издержках (экономия на легировании).

Низкий Се позволяет снизить температуру предварительного нагрева металла при сварке

Предел текучести (MPa)



* для толщин менее 16мм показатели из ДСТУ EN 10025-4:2007 и ДСТУ EN 10025-3:2007

M - TMCP
N - нормализация

Влияние углеродного эквивалента (CET) на температуру предварительного нагрева металла рассчитывается по EN 1011-2 по формуле:

$$T_{pCET} = 750 \times CET - 150 (^{\circ}C),$$

где $CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$

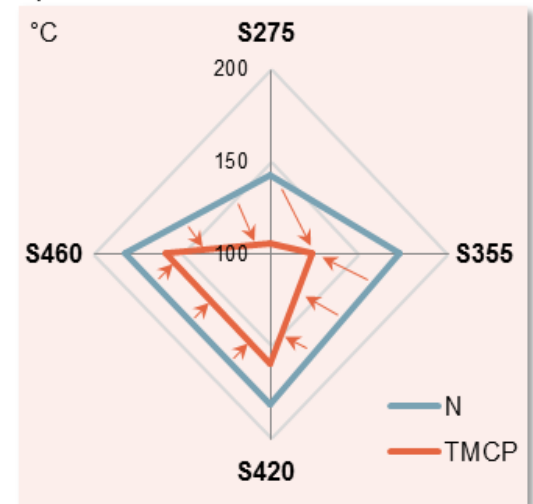
Таким образом, увеличение CET на 0.01% приводит к росту температуры предварительного нагрева на 7,5°C

Например, при замене конструкционной стали S355N, прошедшей стандартную для данного типа сталей нормализацию в потоке, на сталь S355M, произведённую по технологии TMCP, снижение температуры предварительного нагрева составит:

S355N	CET 0.43	$T_{pCET} = 175^{\circ}C$
↓	↓	↓
S355M	CET 0.37	$T_{pCET} = 125^{\circ}C$

-50°C

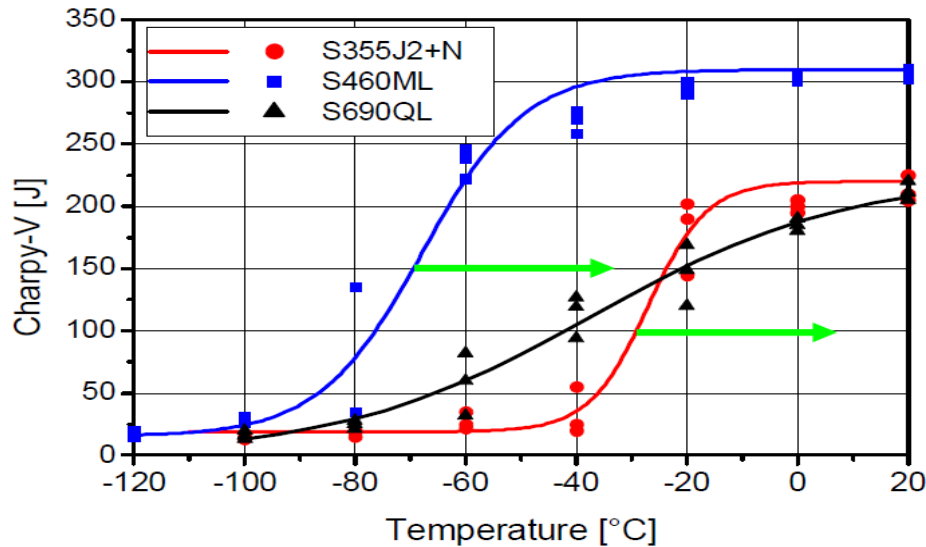
Влияние углеродного эквивалента на температуру предварительного нагрева для различных классов прочности



Использование TMCP проката позволяет снизить издержки при его переработке путем исключения стадии предварительного нагрева металла либо значительного снижения температуры нагрева.

Преимущество ТМСП проката №2 – высокая прочность и ударная вязкость

Результаты теста Шарпи¹ для сталей после различных видов обработки (Н, ТМСП, 3+О)



Эффект замещения нормализованного проката из стали S355 на термомеханически упрочненный прокат S460²



Уменьшение
толщины на 24%



Сокращение
объемов сварочных
работ на 42%

Термомеханическое упрочнение обеспечивает:

- ✓ Непрерывность производства (осуществляется в потоке прокатных станов) с обеспечением высокой производительности труда;
- ✓ Экономии энергетических ресурсов (закалка производится с использованием тепла прокатного нагрева с самоотпуском после прерванного охлаждения);
- ✓ Экономии материальных ресурсов (упрочнение позволяет снизить расход дефицитных легирующих элементов для легирования стали и металлопроката при изготовлении конструкций и машин из него);
- ✓ Повышение в 1,5–2,0 раза прочность стального проката, существенное увеличение его вязкости (в т.ч. и при отрицательных температурах) и усталостных характеристик;
- ✓ Повышение стойкости стали к хрупкому разрушению. Трещиностойкость термомеханически упрочненного углеродистого проката всегда выше, чем у горячекатаного. Она также выше, чем у низколегированного горячекатаного проката равной прочности.

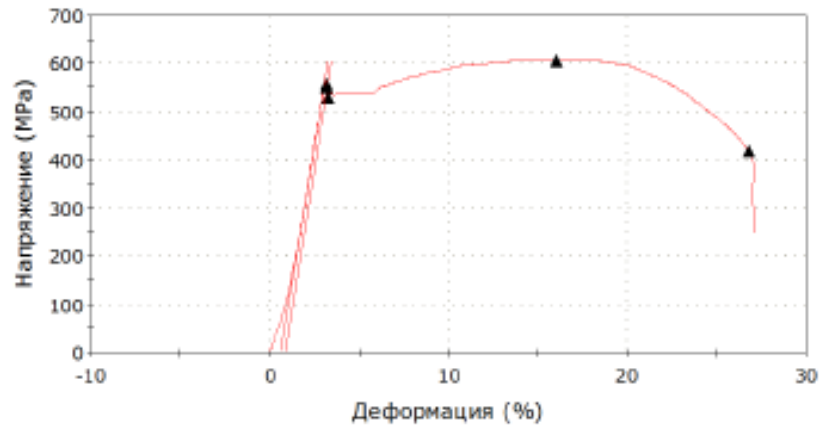
Использование ТМСП проката повышенной прочности позволяет снизить общую металлоемкость изделий, а также материальные и трудовые затраты при его переработке.

¹ данные Dillinger

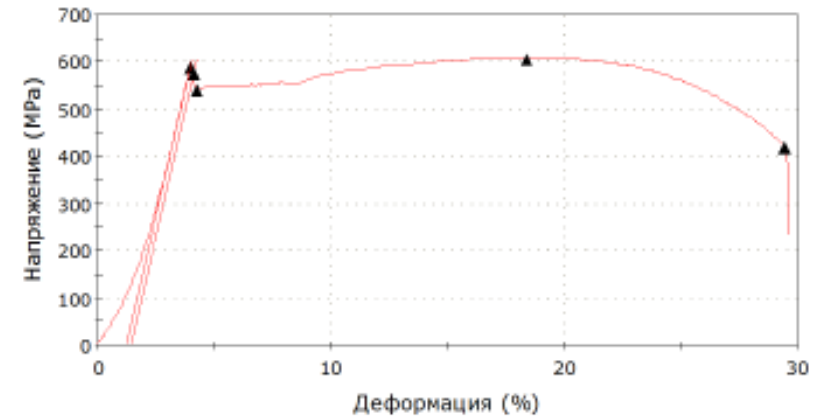
² информация Voestalpine

Диаграммы растяжения образцов листового проката S460ML (ДСТУ EN 10025-4)

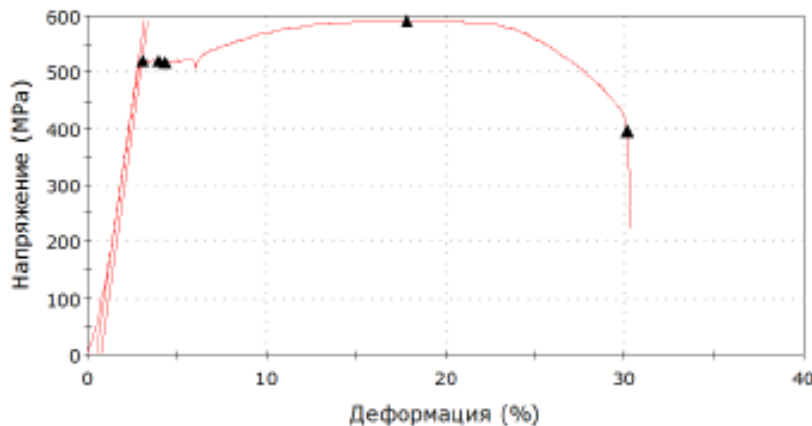
№1



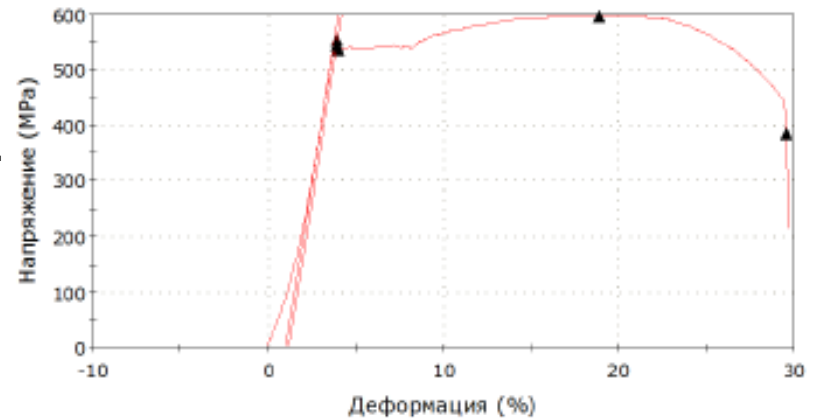
№3



№2



№4



Марка стали	№ листа	$\sigma_{T0,2}$ (МПа)	σ_T (МПа)	σ_B (МПа)	δ , %
S460ML	1	574	587	606	22,50
S460ML	2	546	554	598	22,50
S460ML	3	549	557	606	22,5
S460ML	4	521	522	592	23,5