

Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

1. Область применения

Малые мосты в городской и парковой среде



Мосты через автомобильную дорогу



Реконструкция малых и средних искусственных сооружений на РЖД



«Компактные» мосты для устройства тротуара (пешеходной зоны) на автомобильных мостах



Строительство и реконструкция автомобильных мостов



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

2. Алюминиевые сплавы. Основные характеристики

В качестве основных сплавов, применяемых в мостостроении, выделяют следующие:

- АД35Т и АД35Т1
- 6082Т6
- 1915Т и 1915Т1
- 1565чМ

Для отечественных алюминиевых сплавов используются буквенно-цифровая и цифровая системы обозначений. ГОСТ 4784 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки» дает маркировку сплавов тремя способами: как в буквенно-цифровом виде, так и только в цифровом виде, а также и с учетом требований международного стандарта (международная маркировка) ИСО 209-1 (ISO 209-1 Wrought aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and forms of products - Part 1: Chemical composition). При этом цифровая маркировка по ГОСТ не совпадает с международной маркировкой алюминиевых сплавов.

Марка	Группа сплавов, основная система легирования
1000-1018	Технический алюминий
1019, 1029 и т.д	Порошковые сплавы
1020-1025	Пеноалюминий
1100-1190	Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Fe-Ni
1200-1290	Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li-Mn-Cd
1300-1390	Al-Mg-Si, Al-Mg-Si-Cu
1319, 1329 и т. д	Al-Si, порошковые сплавы САС
1400-1419	Al-Mn, Al-Be-Mg
1420-1490	Al-Li
1500-1590	Al-Mg
1900-1990	Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu

Первая цифра обозначает основу алюминиевого сплава. Вторая цифра обозначает основной легирующий компонент или основные легирующие компоненты. Последние две цифры в цифровом обозначении алюминиевого сплава - это его порядковый номер. Последняя цифра несет дополнительную информацию: сплавы, оканчивающиеся на нечетную цифру - деформируемые, на четную – литейные, 7 – проволоочный сплав, 9 – металлокерамический сплав.

Для указания состояния деформированных полуфабрикатов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, используется буквенно-цифровая система обозначений после марки сплава. Без обозначения - значит без термической обработки.

Т – закаленный и естественно состаренный;

Т1, Т6 – закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность

Н – нагартованный

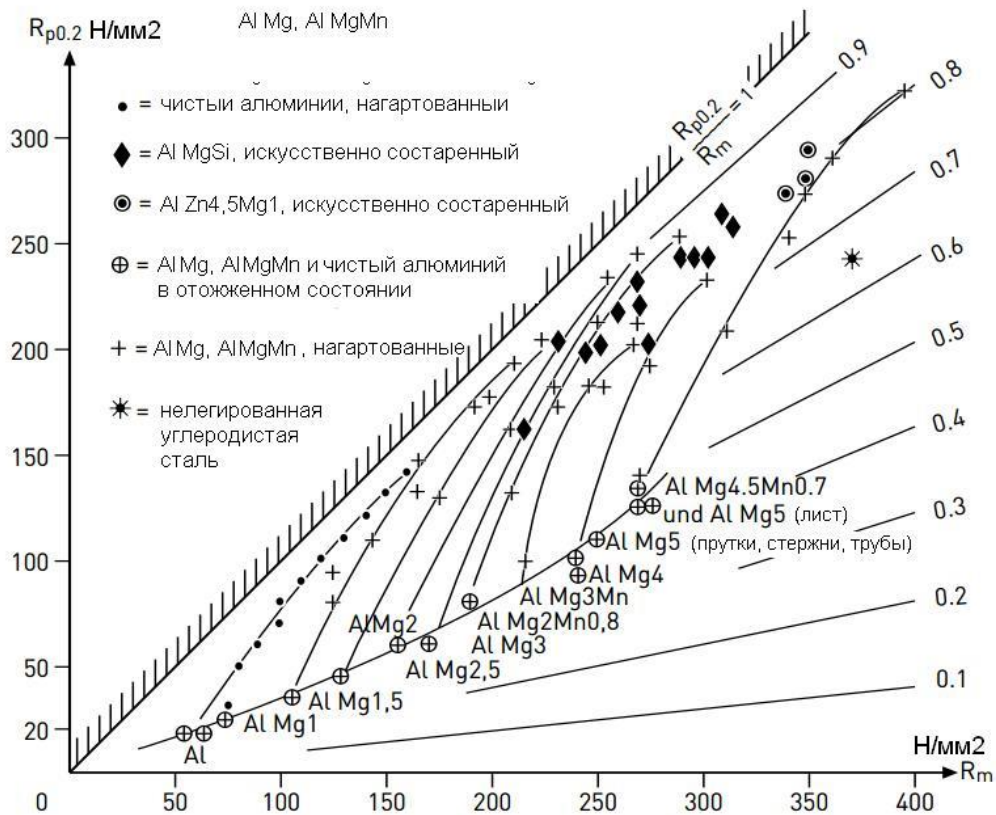
М – мягкий отожженный

Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

2. Алюминиевые сплавы. Основные характеристики

- Модуль упругости $E = 7 \times 10^5$ МПа
- Коэффициент Пуассона = 0,33
- Предел прочности $\sigma_B = 200-500$ МПа
- Предел текучести $\sigma_{0,2} = 80-360$ МПа
- Предел выносливости $\sigma_{-1} = 55-120$ МПа
- Средняя плотность = 2700-2770 кг/м³
- Декремент колебания = 0,2
- Температура плавления = 660 °С
- Температура (упругости) = 200 °С
- Твердость по Бринеллю = 40-150 НВ
- Удельная теплоемкость = 897 Дж/кг·К
- Относительное удлинение - до 35%
- Температурный коэффициент линейного расширения = $24,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$
- Холодная прочность = при -195 °С рост предела текучести до 25%

Параметр сплава	Пределы выносливости σ_{-1} , σ_0 , текучести σ_T , временное сопротивление σ_B , МПа, для сплавов марок		
	1915Т	АД35Т1	1565чМ
σ_{-1}	100	65	55
σ_0	150	105	90
σ_T	240	205	180
σ_B	360	320	270

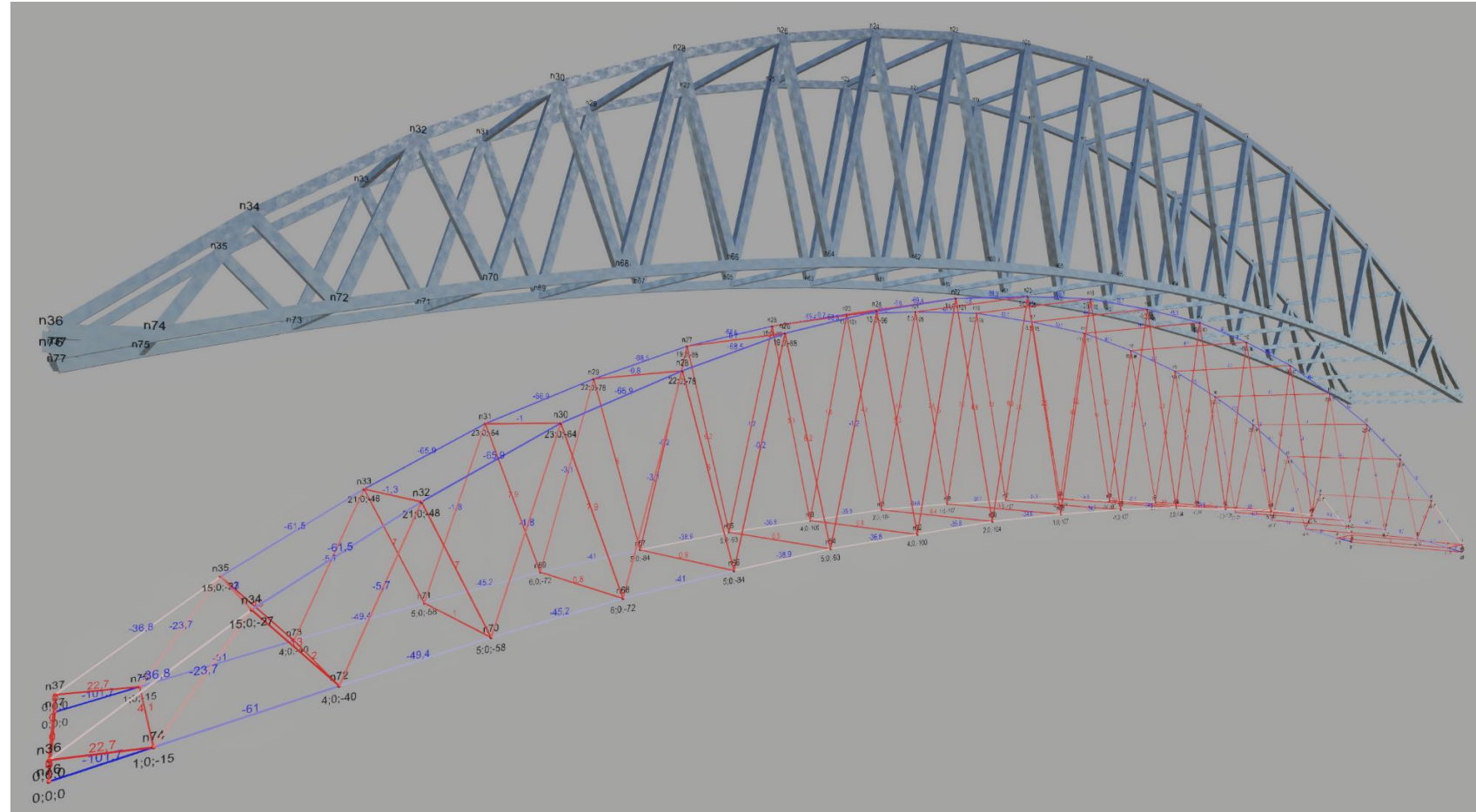


Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

3. Особенности расчета

Расчет пролетных строений из алюминиевых сплавов аналогичен расчету мостов из стали. На данный момент расчет элементов конструкций пешеходных мостов из алюминиевых сплавов осуществляется по СП 443.1325800.2019 «Пролетные строения из алюминиевых сплавов. Правила проектирования».

0.534	п. 9.3.1.1 (центральное сжатие/растяжение)
0.00	п. 9.3.1.2 (устойчивость при центральном сжатии)
0.178	п. 9.3.2.1 (при действии момента в плоскости XOZ)
0.249	п. 9.3.2.1 (при действии момента в плоскости XOY)
0.011	п. 9.3.2.1 (при действии в сечении поперечной силы по Y)
0.032	п. 9.3.2.1 (при действии в сечении поперечной силы по Z)
0.427	п. 9.3.2.1 (при действии моментов в двух главных плоскостях)
0.961	п. 9.3.3.1 (расчет сжато-изгибаемых, внецентренно-растянутых)
0	п. 9.3.3.2 (устойчивость внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементов в плоскости XOZ)
0	п. 9.3.3.2 (устойчивость внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементов в плоскости XOY)
0.647	п. 9.3.4.1 (гибкость элемента в XOZ)
0.886	п. 9.3.4.1 (гибкость элемента в XOY)

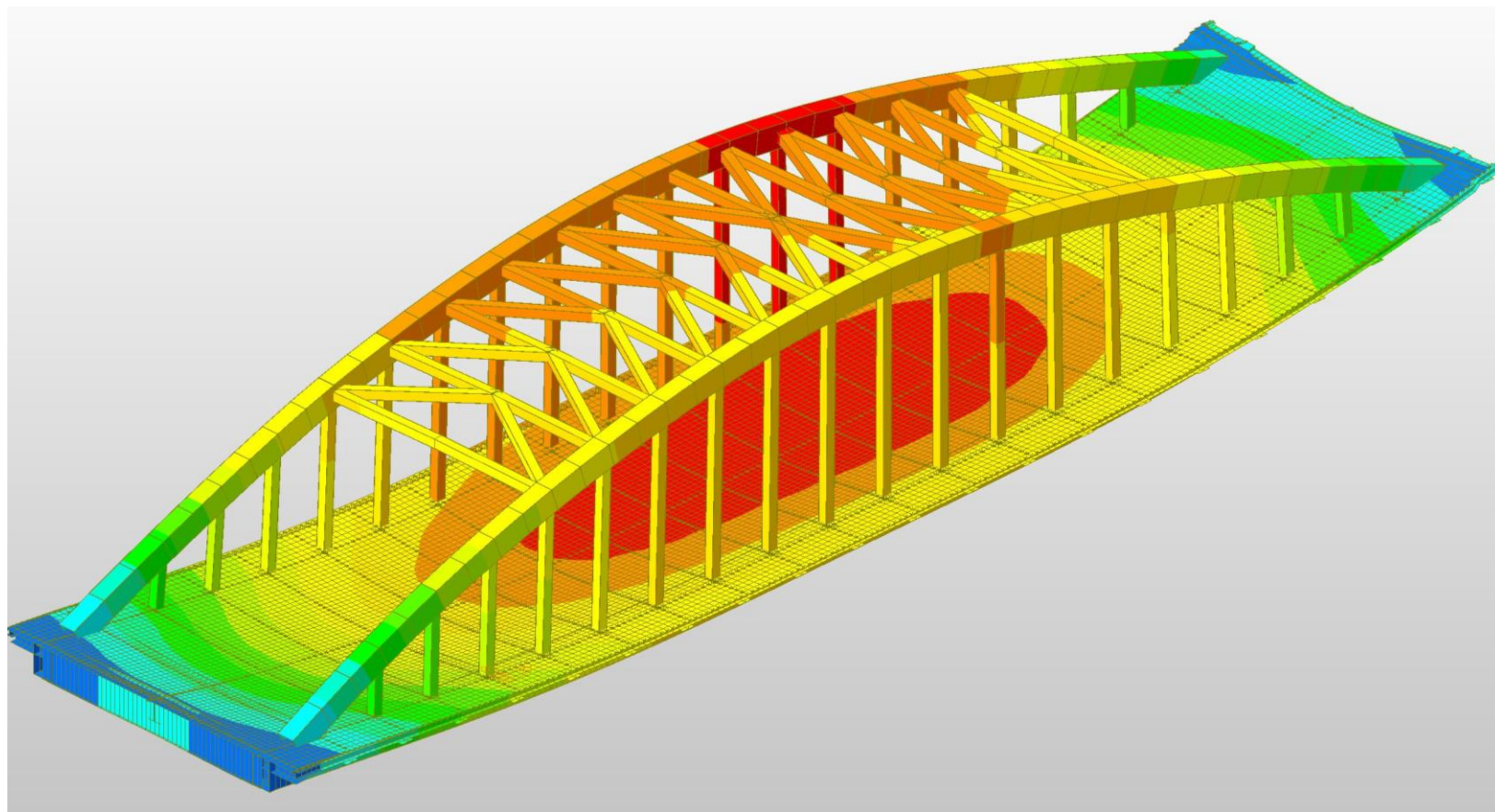


Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

3. Особенности расчета

При расчетах автомобильных пролетных строений из алюминиевых сплавов несущая способность элементов не являются определяющими факторами. Основными факторами, влияющими на размеры сечений несущих элементов:

- Прогиб от временной нагрузки
- Выносливость конструкций



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

3. Особенности расчета

1. АД35Т1 – предел выносливости 65 МПа
2. 1915Т - предел выносливости 100 МПа
3. 1565чМ - предел выносливости 55 МПа
4. 6082Т6 - предел выносливости 100 МПа

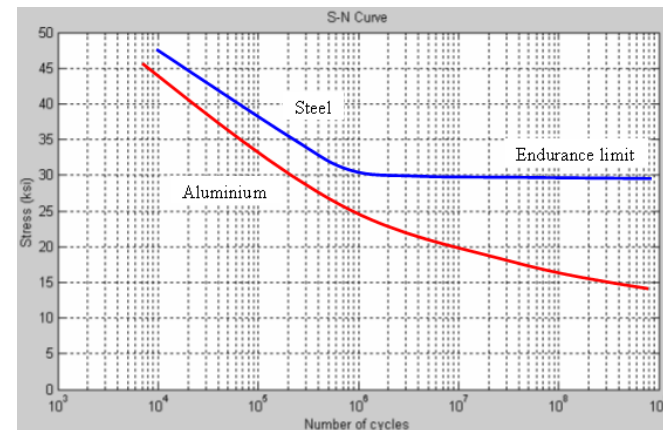
На данный момент ведется работа по получению сплава с пределом выносливости более 100 МПа.

По российским нормам расчет выносливости отличается для стали и алюминия.

Общий принцип неизменен, ведется сравнение уровней напряжения в покое и под временной нагрузкой:

$$\rho = \frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}}$$

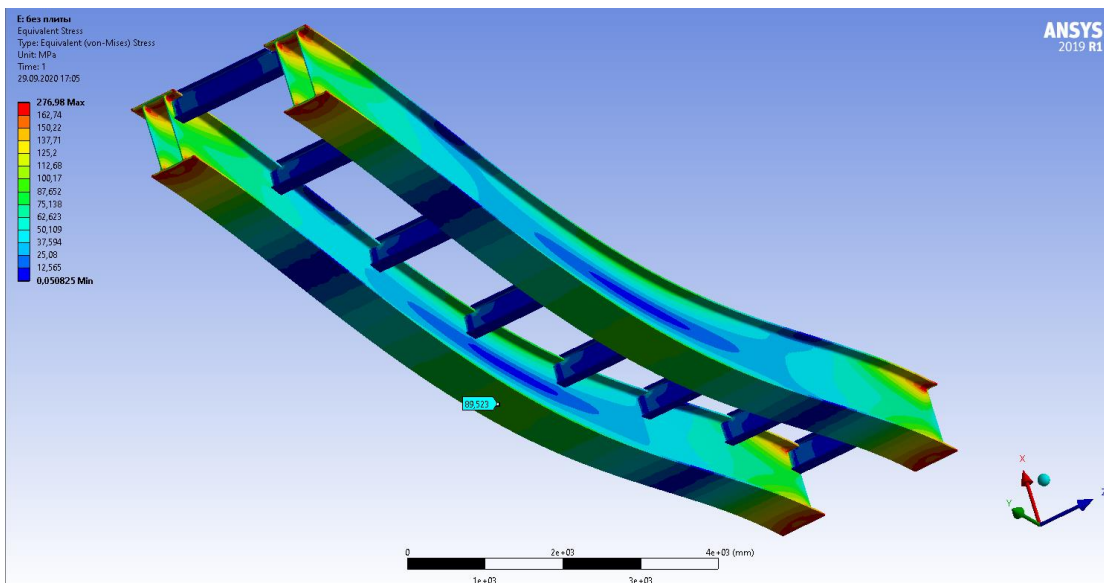
Для конструкций из алюминия уровень асимметрии циклов напряжений в районе 0.3, при этом для стали он будет в двое выше. Но при всем этом в методике Eurocode 9 по расчету на выносливость алюминиевых сплавов коэффициент асимметрии циклов напряжений не вносит на столько значительный вклад, как его вносит предел выносливости сплава.



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

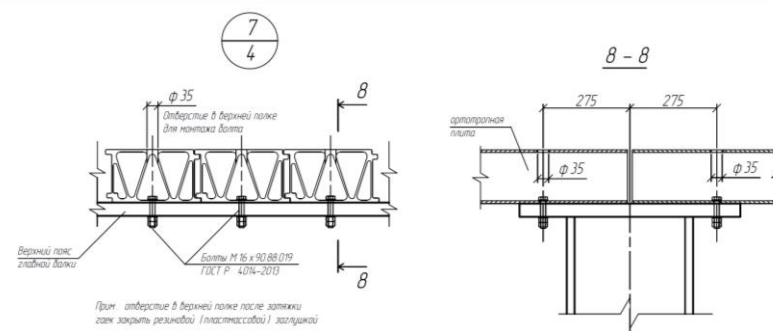
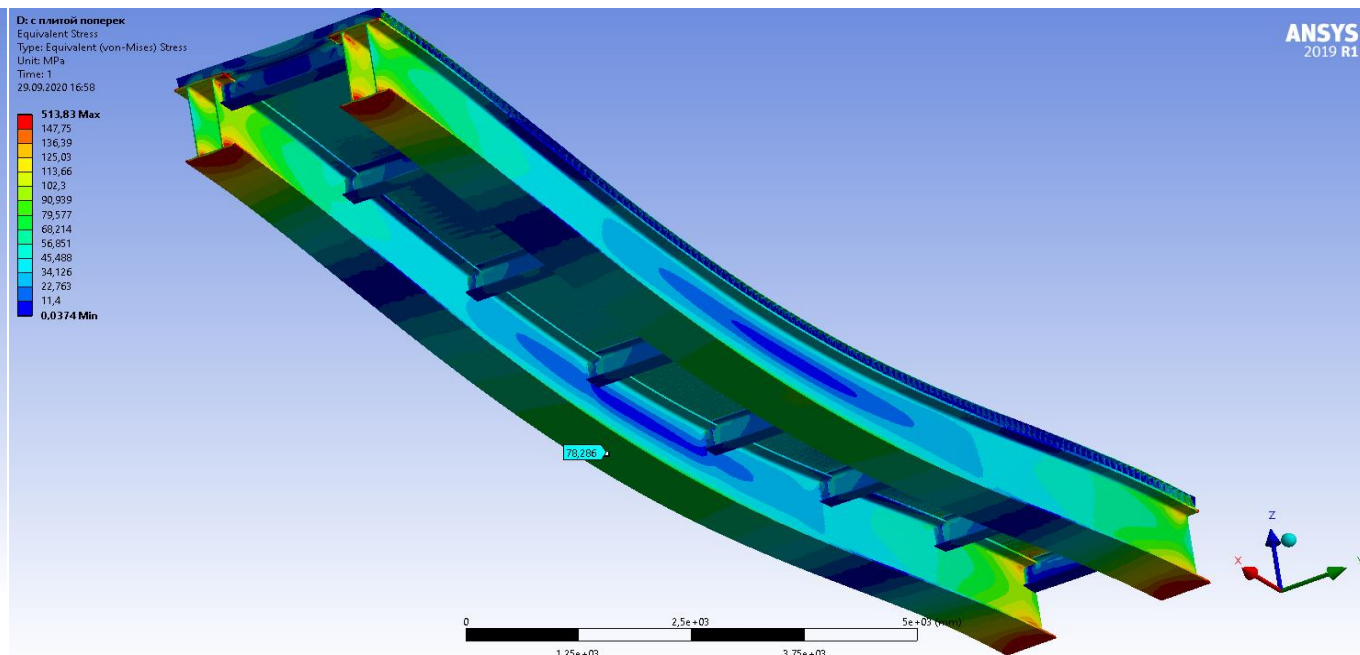
3. Особенности расчета

В случае с балочной схемой пролетного строения существует возможность объединения работы несущих балок и ортотропных плит дорожного покрытия в одну конструкцию:



Вариант расчетной схемы с ортотропной плитой характеризуется уменьшенными напряжениями в несущих балках, так как при совместной работе плит и балок – плиты увеличили общий приведенный момент инерции общего сечения.

В арочных конструкциях включить в работу ортотропные плиты нет возможности.

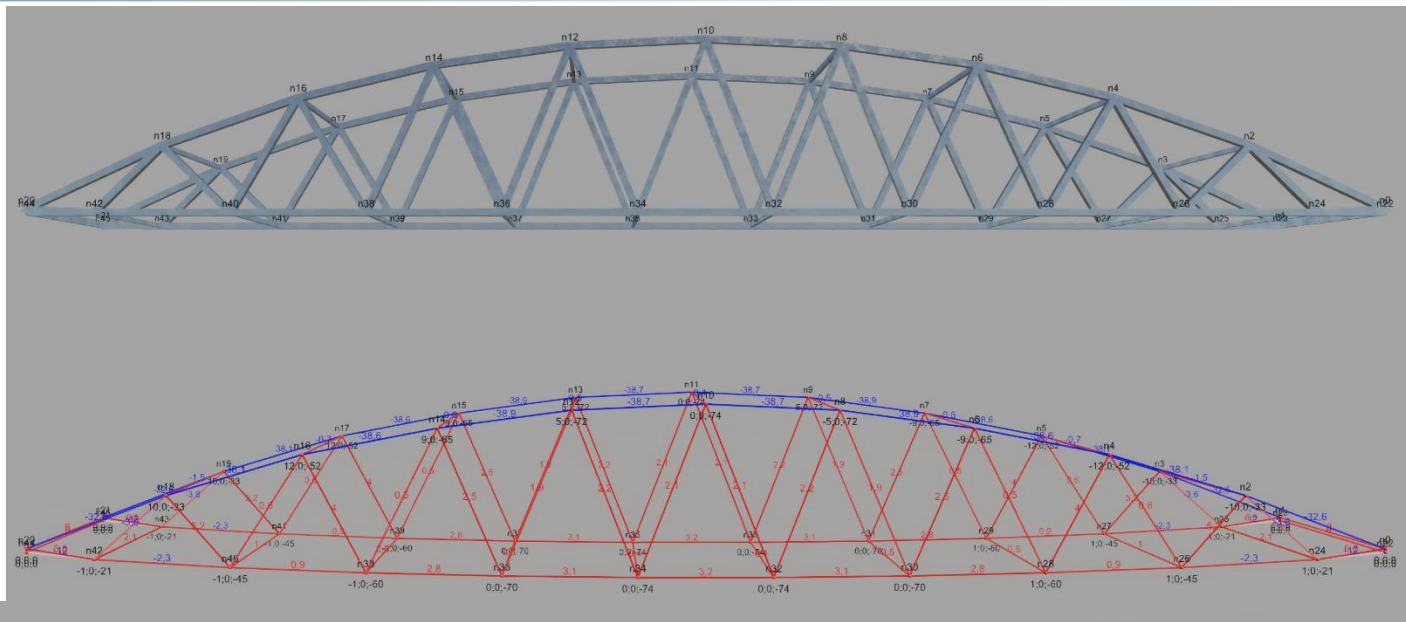


Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

4. Жесткость алюминиевых конструкций

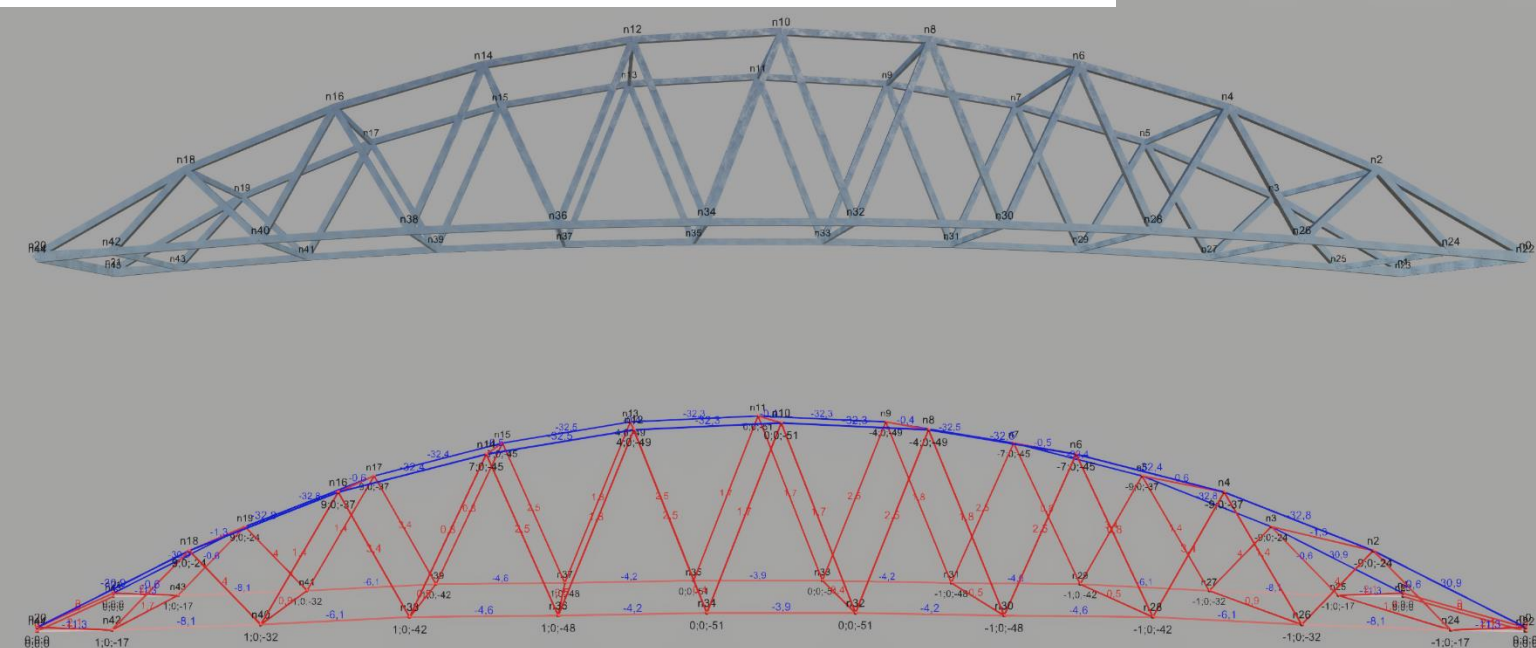
Если говорить об основных особенностях при выполнении статического расчета, то в первую очередь следует обратить внимание на модуль упругости алюминия, в среднем равный 7×10^5 МПа. Это в три раза ниже, чем значение для стали. Но проблема решается за счет различных конструктивных методов. И можно добиться оптимальной конструкции пролетного строения без значительного увеличения металлоемкости.

Для примера арочная конструкция:



Вес верхнего пролетного строения составил 4.91 тонны, вес нижнего 4.94 тонны, при этом за счет увеличения арочности прогиб пролетного строения уменьшился с 74 мм до 51 мм.

Пролет арки 30 метров.

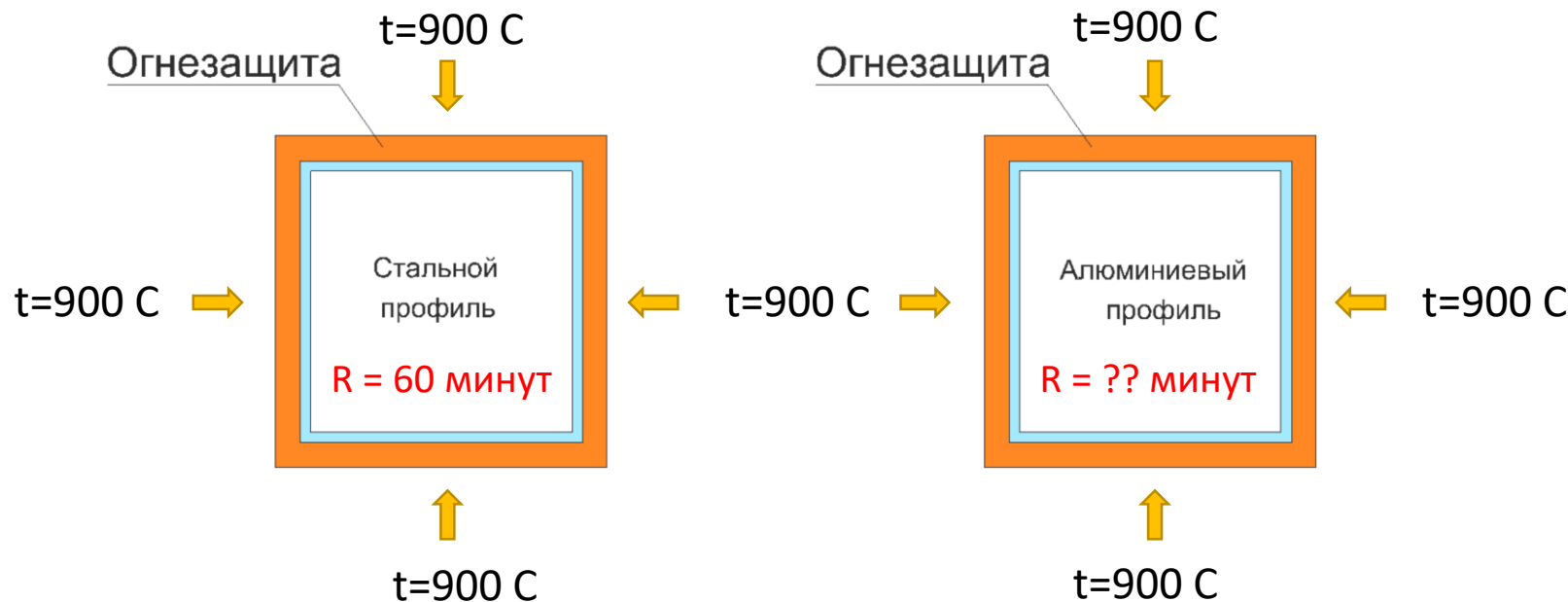


Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

5. Огнестойкость конструкций

Огнестойкость - способность строительных конструкций ограничивать распространение огня, а также сохранять необходимые эксплуатационные качества при высоких температурах в условиях пожара.

Но насколько это требование сильно влияет на конструктивные решения любого сооружения, ведь для достижений требуемых показателей предела огнестойкости и в стальных конструкциях требуется выполнять дополнительные мероприятия (нанесения слоя огнезащиты)

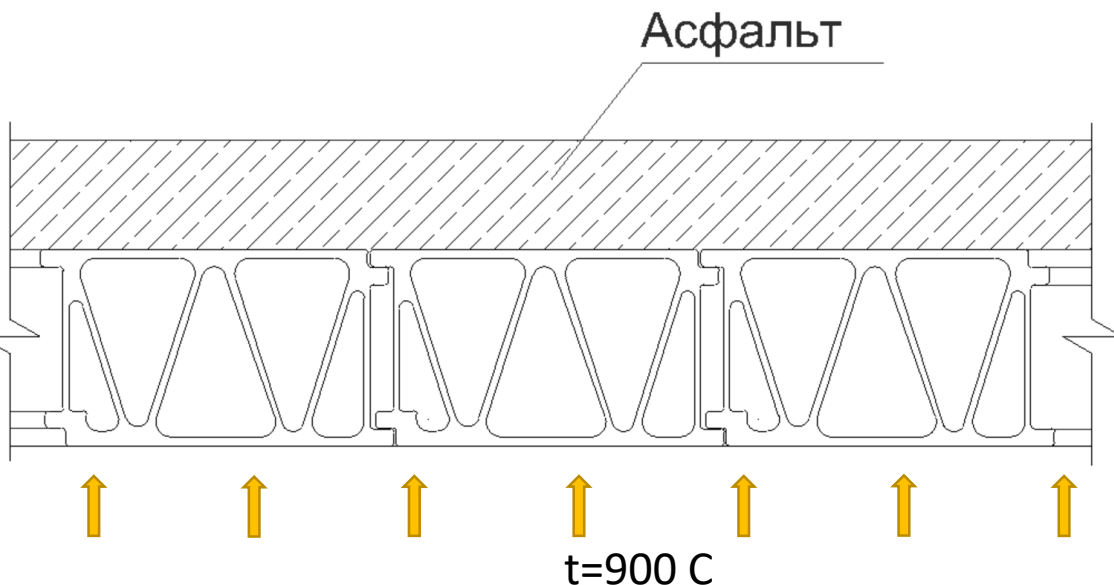


Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

5. Огнестойкость конструкций

Теплопроводность алюминия в четыре раза выше, чем у стали, удельная теплоемкость в два раза. За счет большой теплопроводности, локальное место, подверженное воздействию пламени, нагревается медленно, т.к. говоря простым языком, передает тепло дальше по материалу. Что является несомненным преимуществом перед сталью.

Алюминиевая Ассоциация на базе МГСУ провели огневые испытания алюминиевых ортотропных плит в составе дорожной одежды из асфальтобетона. Благодаря эффекту быстрого отвода тепла алюминия, слой асфальтобетона здесь сыграл роль хладагента. Таким образом, несущая способность ортотропной плиты была исчерпана только через 57 минут. Для стальных конструкций это недостижимый предел.



Результаты испытаний:

- Максимальный прогиб во время испытаний 65 мм.
- **REI 45- Предел огнестойкости 45 мин**



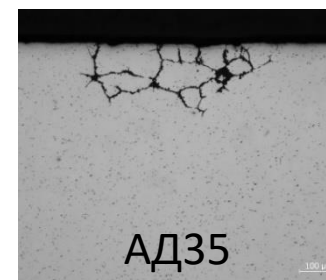
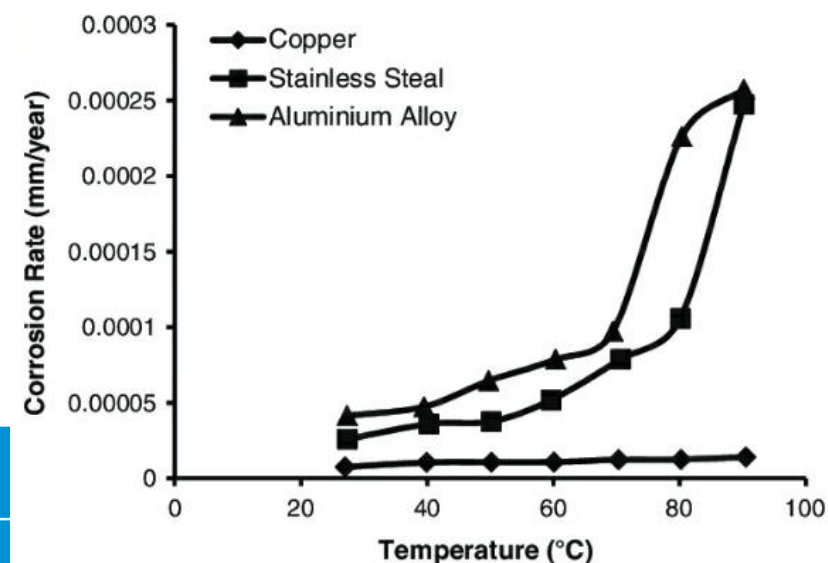
Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

6. Коррозионная стойкость

Для многих современных алюминиевых сплавов характерно наличие высокой коррозионной стойкости от атмосферных осадков, что исключает необходимость дополнительной обработки. В качестве дополнительной защиты можно выполнить анодирование алюминиевых профилей (нанесение тонкого слоя оксидной пленки). Анодированное покрытие обладает еще и высокими показателями к механическому воздействию, его сложно повредить. Данное покрытие также защищает алюминий от соляных растворов, например, дорожных реагентов зимой.

Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов без анодирования показывает результат сопоставимый с нержавеющей сталью до 70 °С.

Новый сплав АД35ч показывает на 15-20% более лучшие результаты по коррозионной стойкости по сравнению с предыдущими поколениями этого же сплава. Это достигается за счет «вычищение» сплава от примесей к исходному состоянию.



Сплав	Механические свойства при растяжении, МПа			Коррозионные характеристики		MIG	СТП
	σв, МПа	σ0,2, МПа	δ, %	МКК, мм	РСК, балл	Коэфф. прочности сварного шва	
АД35ч Русал	320	290	15	нет	1	0,6	0,75
6082	300	280	10	до 0,1	1	0,6	0,73

Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

6. Коррозионная стойкость

Непосредственный контакт стали и алюминия невозможен в силу разной **электрохимической активности**. Менее отрицательный по потенциалу разрушает более отрицательный по таблице:

Li	Cs	K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Mn	Zn	Fe	Co	Ni	Sn	Pb	H ₂	Cu	Hg	Ag	Pt	Au
-3,04	-3,01	-2,92	-2,90	-2,8	-2,7	-2,3	-1,6	-1,1	-0,7	-0,4	-0,3	-0,2	-0,14	-0,1	0	+0,3	+0,79	+0,8	+1,2	+1,5
Li ⁺	Cs ⁺	K ⁺	Ba ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	Co ²⁺	Ni ²⁺	Sn ²⁺	Pb ²⁺	2H ⁺	Cu ²⁺	Hg ²⁺	Ag ⁺	Pt ²⁺	Au ³⁺

ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ СЕРИЯ

- 1- Магний
- 2- Цинк
- 3- Алюминий
- 4- Железо
- 5- Сталь
- 6- Никель
- 7- Нержавеющая сталь серии 400
- 8- Олово
- 9- Свинец
- 10- Латунь
- 11- Медь
- 12- Бронза
- 13- Нержавеющая сталь серии 300
- 14- Серебро
- 15- Золото

Для более точной оценки коррозии на контакте металлов оценивают **электрохимическую коррозию**, когда контакт двух разных по потенциалу металлов осуществляется в среде электролита , например вода или влажная среда «Жертвенным» анодом («+») выступает металл находящийся выше по списку. Например для стали (катод «-») анодом является цинк и алюминий.

В любой гальванической комбинации относительные площади двух материалов, образующих пару, имеют очень важное значение для степени коррозии. Во многих случаях степень гальванического эффекта будет прямо пропорциональна соотношению площади металла, расположенного ниже в списке.

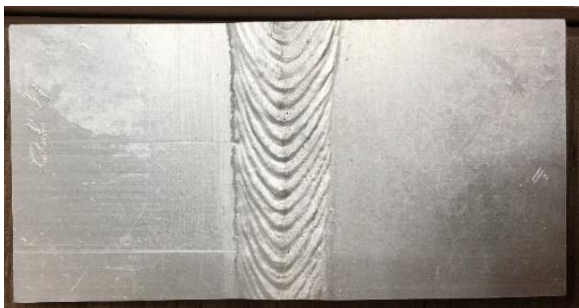
Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

7. Сварные соединения

Сварные соединения возможно выполнить в двух вариантах: сварка трения с перемешиванием и аргонодуговая сварка. Для аргонодуговой сварки прочность шва зависит от применяемой проволоки, а в ТСП сварке от скорости вращения валков трения и скорости их движения вдоль шва.

Сплав	Механические свойства при растяжении, МПа			Коррозионные характеристики		MIG	КР, МПа
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	МКК, мм	РСК, балл	Коэфф. прочности сварного шва	
1939 Русал	420	375	15	нет	1-2	0,85	$0,9\sigma_{0,2}$
1915	400	350	11	нет	3	0,8	$0,75\sigma_{0,2}$

Сплав	$\sigma_B^{св.с.} / \sigma_B^{осн. мет.} (MIG)$	МКК, мм	РСК, балл
АД35	0,60	0,1	3-4
АД35ч РУСАЛ	0,60	нет	1-2



Применение технологии сварки трения с перемешиванием на ЗАО «Сеспель» г.Чебоксары.

Сварка трением с перемешиванием

ГОСТ ISO 25239-1-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 1. Словарь»

ГОСТ ISO 25239-2-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 2. Проектирование сварочных швов»

ГОСТ ISO 25239-3-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 3. Квалификация операторов»

ГОСТ ISO 25239-4-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 4. Характеристики и квалификация сварочных процедур»

ГОСТ ISO 25239-5-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю»

введены в действие 01.11.2020

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ

РАНЕЕ

ГОСТ ISO 25239-1:2013

СЕЙЧАС ЖЕ

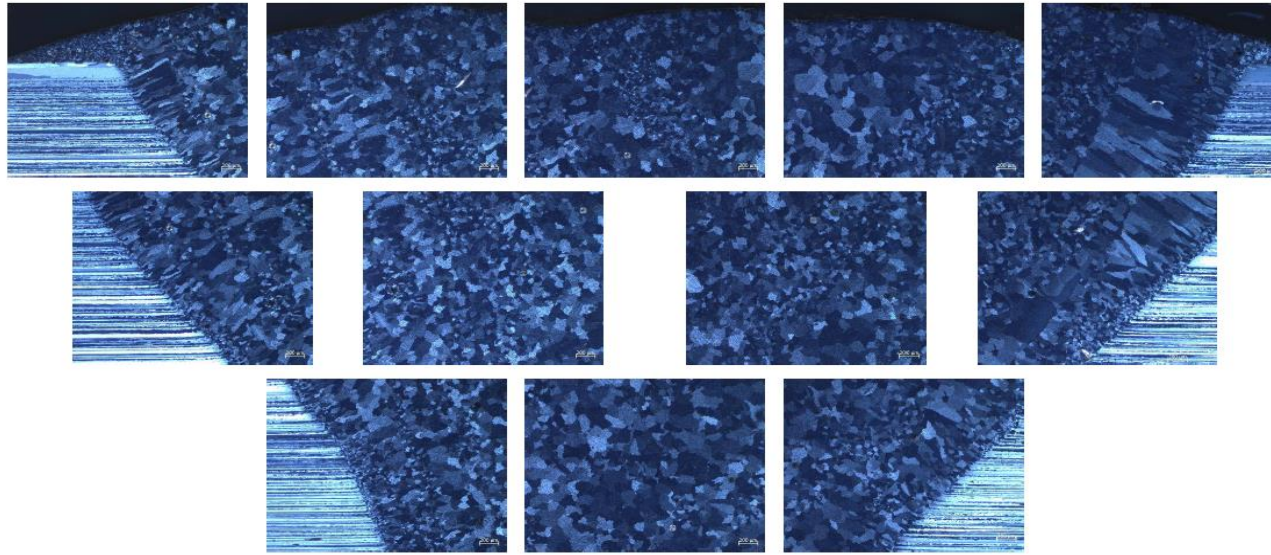
ГОСТ ISO 25239-1:2020

необходимо пересматривать серию стандартов, учитывая обновление 2020 года



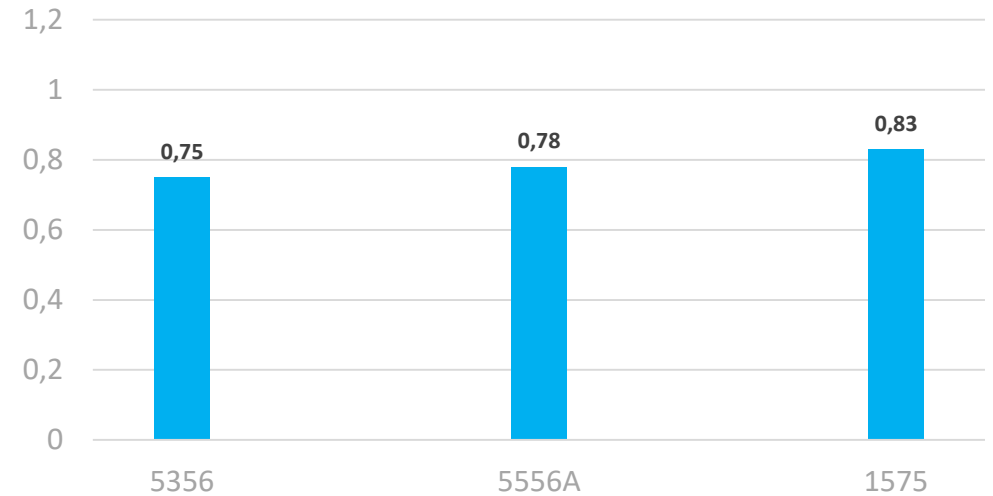
Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

7. Сварные соединения



Типичная микроструктура сварного соединения

Коэффициент прочности сварного соединения



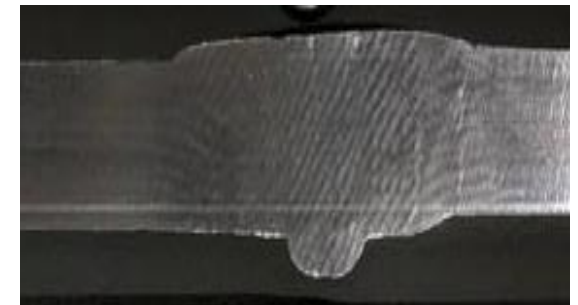
5356



5556A



1575



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

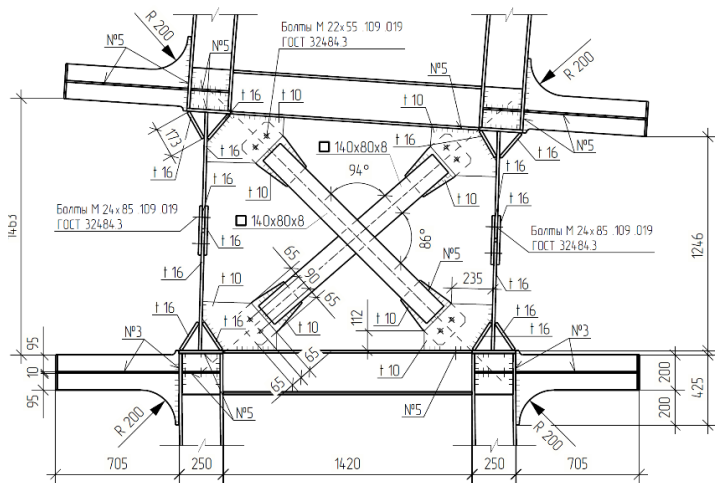
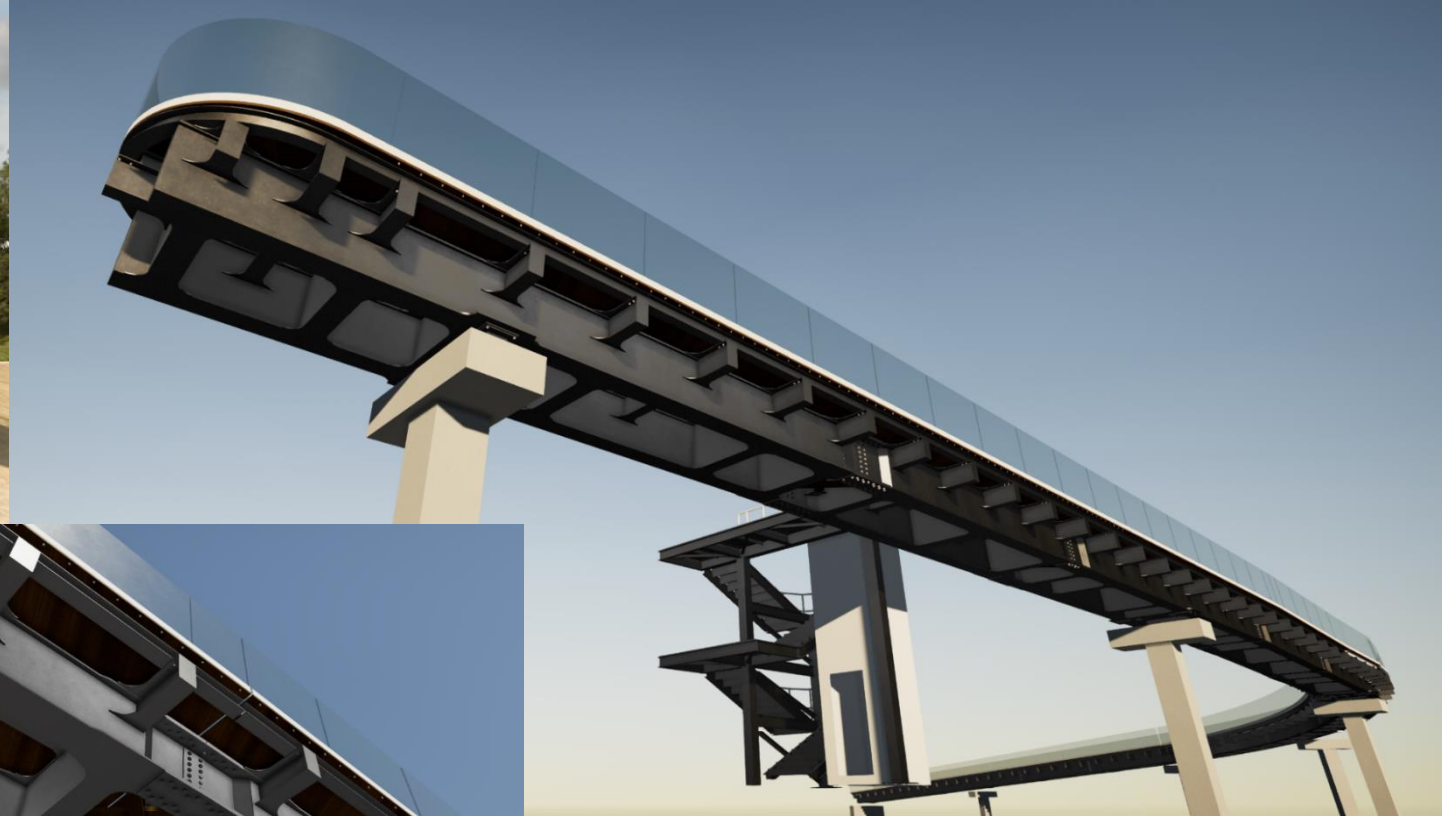
8. Жизненный цикл пролетных строений

N п/п	Сравниваемые параметры	Вариант 1. Пролетное строение пешеходного перехода из стальных конструкций		Вариант 2. Пролетное строение из алюминиевых сплавов	
1	Тип конструкций	Арка с жесткими раскосами		Арка с жесткими раскосами	
1.1	Вес несущих конструкций	41,8т		23,3т	
1.2	Стоимость изготовления пролетного строения с НДС	11 077 000,00 руб.		15 145 000,00 руб.	
3	Монтаж				
3.1.	Применение СВСиУ	Устройство временной промежуточной опоры на разделительной полосе	Дополнительные затраты на устройство временной опоры и переключения движения по основным полосам	Не требуется	-
3.2.	Расходы на промежуточную опору с НДС	2 985 580,00 руб.		0	
3.3	Монтаж несущих конструкций пролетного строения	По обе стороны от трассы предусматриваются площадки для укрупнительной сборки двух половин пролетного строения. Монтаж каждой полуарки выполняется краном грузоподъемностью 250т с полным перекрытием движения по основной трассе соответствующего одного направления	Временное перекрытие движения по основной трассе одного направления при монтаже каждого пролета на 2 недели	Предусматривается одна площадка для укрупнительной сборки пролетного строения целиком. Монтаж целого пролетного строения осуществляется одним краном грузоподъемностью 250т с частичным перекрытием движения по одному основному направлению.	Частичное перекрытие движения по одному основному направлению на 4 часа.
3.4	Расходы на работу 250т крана с НДС	2 423 580,00 руб.		173 132,00 руб.	
4	Эксплуатация				
4.1	Минимальный срок службы	70 лет		70 лет	
4.2	Периодичность окрашивания	Периодичность окраски пролетного строения – 1 раз в 25 лет	За период эксплуатации 2 полных окрашивания	Не требуется	
4.3	Расходы на окрашивание с НДС	2х 1 981 000,00 руб. = 3 962 000, 00 руб.		0	
4.4.	Контроль и натяжка тяжей	С периодичностью раз в 2 года		Не требуется	
5	Демонтаж	Аналогично монтажу		Аналогично монтажу	
5.1	Расходы на 250т и промежуточную опору	5 409 160,00 руб.		173 132,00 руб.	
	ИТОГО по сравниваемым параметрам	21 895 320,00 руб.		15 491 264,00 руб.	

Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

9. Примеры мостов из алюминиевых сплавов

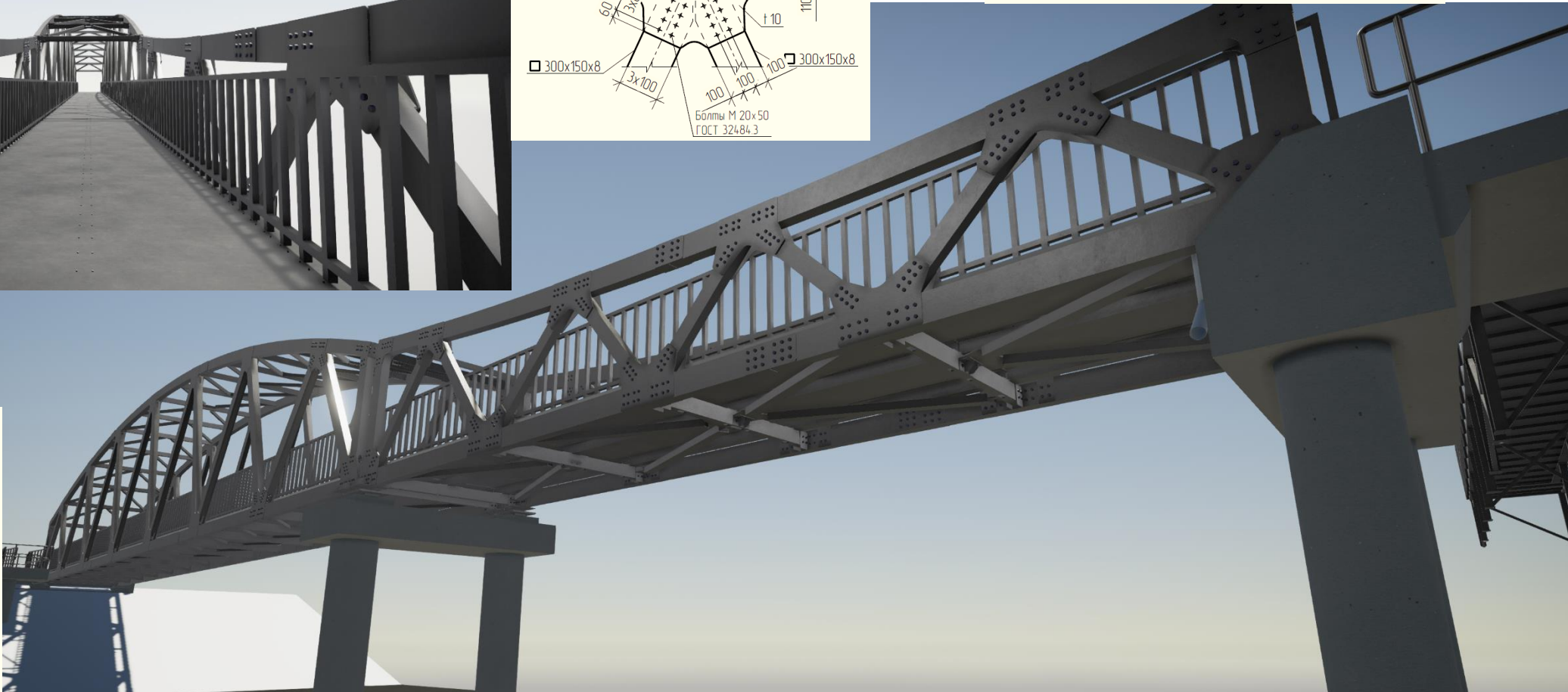
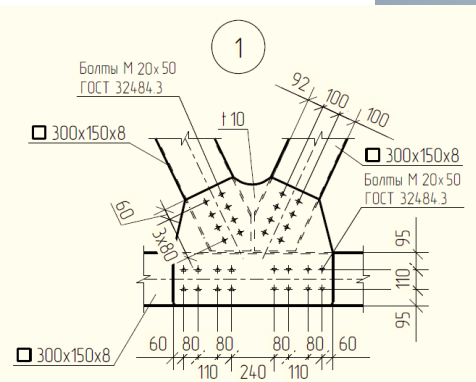
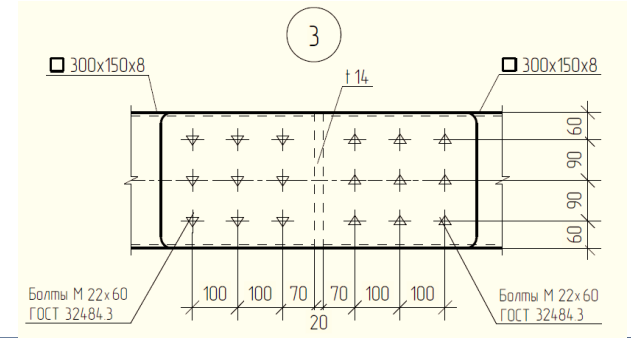
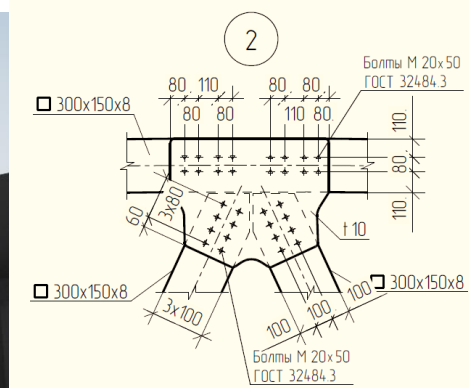
Пешеходный мост в г. Бор, Нижегородская обл., общая длина 118 м, вес основных конструкций 56 т



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

9. Примеры мостов из алюминиевых сплавов

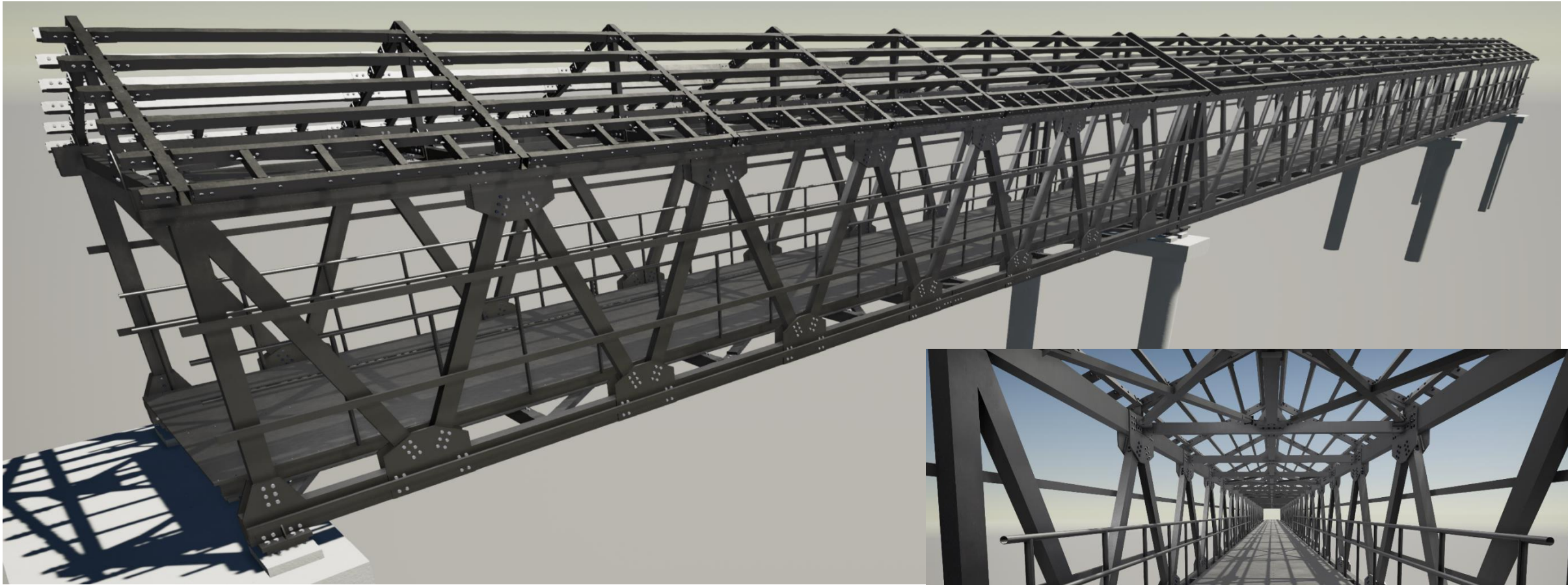
Пешеходный мост в г. Козьмодемьянск, общая длина 49 м, вес основных конструкций 18 т.



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

9. Примеры мостов из алюминиевых сплавов

Пешеходный мост в г. Новокузнецк, сейсмичность 8 баллов, общая длина 74 м, вес основных конструкций 53 т.



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

9. Примеры мостов из алюминиевых сплавов

Различные конфигурации ферм с параллельными и полигональными поясами



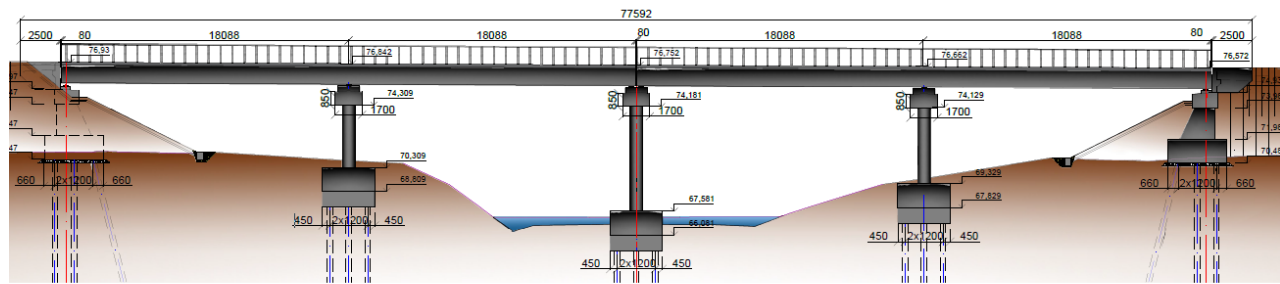
Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

9. Примеры мостов из алюминиевых сплавов

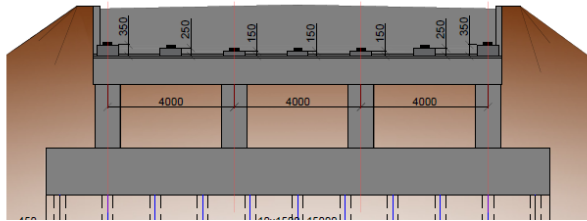
Автомобильный мост через р. Линда, Нижегородская область, общая длина 72 м, вес пролетного строения 200т
Разработчики СТУ «НИЦ МиС» и ЦНИИТС



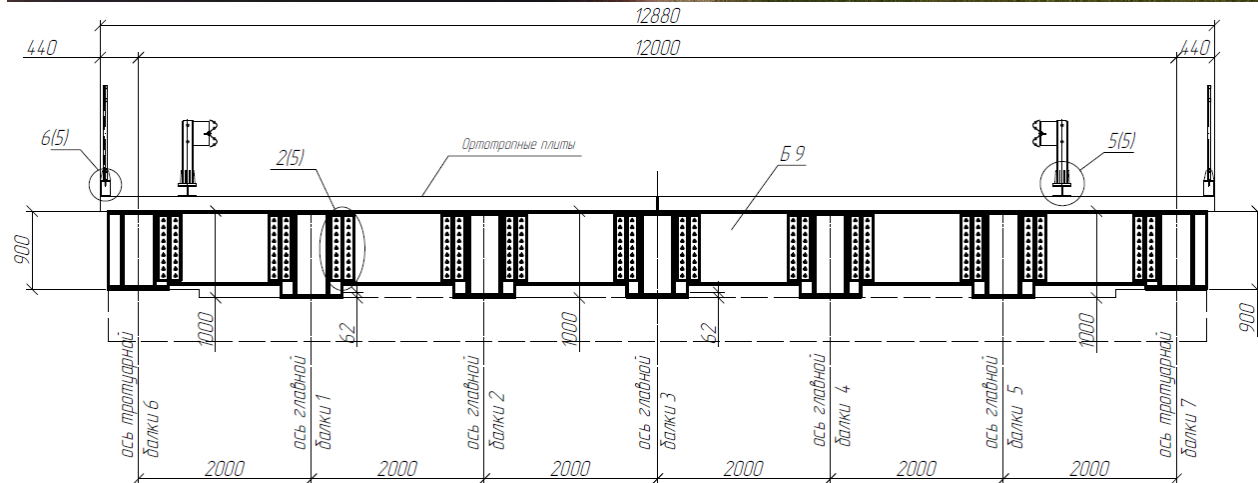
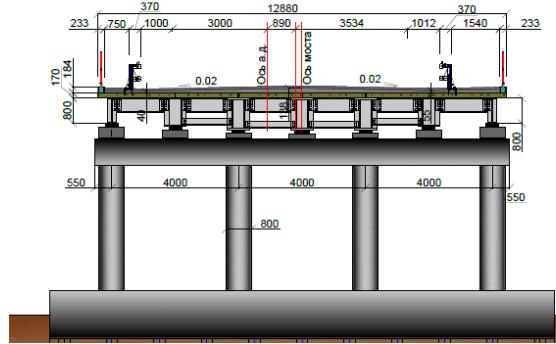
Общий вид моста



Береговая опора



Промежуточная опора



Проектирование несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов

9. Примеры мостов из алюминиевых сплавов

Проектируемый мост через р. Упа, длиной 60 м, Тульская область.

