

Сәулет, қала құрылысы және құрылыс
саласындағы мемлекеттік нормативтер
ҚР НОРМАТИВТІК–ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ

Государственные нормативы в области
архитектуры, градостроительства и строительства
НОРМАТИВНО–ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РК

БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ **1-7 бөлімі. Қажу беріктігі**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ **Часть 1-7. Усталостная прочность**

ҚР НТҚ 03-01-9.1-2011
(ҚР ҚН EN 1993-1-9/2011 әзірленген)
НТП РК 03-01-9.1-2011
(к СН РК EN 1993-1-5/2011)

Ресми басылым
Издание официальное

Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрілігінің
Құрылыс, тұрғын үй–коммуналдық шаруашылық істері және жер
ресурстарын басқару комитеті

Комитет по делам строительства, жилищно–коммунального
хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства
национальной экономики Республики Казахстан

Астана 2015

АЛҒЫ СӨЗ

1. **ӘЗІРЛЕГЕН:** «ҚазҚСҒЗИ» АҚ, «Астана Строй-Консалтинг» ЖШС
2. **ҰСЫНҒАН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің Техникалық реттеу және нормалау басқармасы
3. **БЕКІТІЛІП, ҚОЛДАНЫСҚА ЕНГІЗІЛГЕН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігі Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің 2014 жылғы 29-желтоқсандағы № 156-НҚ бұйрығымен 2015 жылғы 1-шілдеден бастап

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. **РАЗРАБОТАН:** АО «КазНИИСА», ТОО «Астана Строй-Консалтинг»
2. **ПРЕДСТАВЛЕН:** Управлением технического регулирования и нормирования Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан
3. **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ:** Приказом Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан от «29» декабря 2014 года № 156-НҚ с 1 июля 2015 года

Осы мемлекеттік нормативті Қазақстан Республикасының сәулет, қала құрылысы және құрылыс істері жөніндегі уәкілетті мемлекеттік органның рұқсатынсыз ресми басылым ретінде толық немесе ішінара қайта басуға, көбейтуге және таратуға болмайды

Настоящий государственный норматив не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения уполномоченного государственного органа по делам архитектуры, градостроительства и строительства Республики Казахстан

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	III
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	1
1.1 Область применения	1
1.2 Нормативные ссылки	4
1.3 Условия применения	4
1.4 Различия между принципами и правилами проектирования	4
1.5 Термины и определения.....	5
1.6 Обозначения.....	5
1.7 Условные обозначения осей элементов	5
2 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОДЫ.....	6
3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ.....	7
3.1 Общие положения	7
3.2 Расчет на основе испытаний.....	10
4 НАПРЯЖЕНИЯ ОТ УСТАЛОСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	29
5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ	30
6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМАХОВ НАПРЯЖЕНИЙ ЦИКЛА	32
6.1 Общие положения	32
6.2 Расчетное значение номинального размаха напряжений цикла	32
ПРИМЕР 1 Расчет усталостной прочности болтового стыка прокатной неразрезной балки	45
6.3 Расчетное значение измененного номинального размаха напряжений цикла	56
6.4 Значения размаха напряжений цикла для сварных соединений полых профилей	56
ПРИМЕР 2 Расчет усталостной прочности К-образного узла круглых труб	57
6.5 Расчетное значение размаха напряжений цикла для максимального локального значения	63
ПРИМЕР 3 Расчет усталостной прочности стыкового К-образного сварного шва с полным проваром	63
7 ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ.....	75
7.1 Общие положения	75
7.2 Изменение предела выносливости.....	78
ПРИМЕР 4 Расчет по оценке сопротивления усталости по методу безопасного ресурса узла крепления консоли колонны	79

8 РАСЧЕТ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ.....	82
ПРИМЕР 5 Расчет по определению предела выносливости узла крепления подкрановой балки к консоли колонны	84
Приложение А (обязательное) Определение параметров усталостного нагружения и форм контроля.....	87
ПРИМЕР 6 Расчет по определению усталостной прочности сварной подкрановой балки.....	90
Приложение В (обязательное) Сопротивление усталости с использованием метода локального напряжения.....	96
ПРИМЕР 7 Расчет по определению усталостной прочности болтового соединения.....	98
ПРИМЕР 8 Расчет по определению долговечности сварного К - образного узла из прямоугольных труб.....	99
БИБЛИОГРАФИЯ.....	103

ВВЕДЕНИЕ

Стратегической целью реформы системы технического регулирования, изложенной в Концепции реформирования системы технического регулирования строительной отрасли Республики Казахстан на 2010-2014 годы, является создание благоприятных условий для формирования в Республике Казахстан устойчивой высокой культуры строительства, которая является характерной чертой и показателем развитого общества.

Основным требованием к реформе является приведение строительного законодательства и нормативных технических документов в области технического регулирования в соответствие с зарубежными аналогами, применяющимися в экономически развитых странах.

Государственные нормативы в области архитектуры градостроительства и строительства Республики Казахстан должны быть усовершенствованы в соответствии с основами правового регулирования архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, законодательством и структурой управления на базе действующих в переходный период в Казахстане, а также международных нормативных правовых актов, нормативно-технических документов и иных обязательных и рекомендуемых требований, условий и ограничений.

Главная направленность государственных нормативов – обеспечение охраняемых законом потребностей граждан и общества в создании благоприятной и экологически безопасной среды обитания и жизнедеятельности при осуществлении архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, защита прав потребителей проектной и строительной продукции, обеспечение надежности и безопасности строительства, устойчивого функционирования построенных объектов при эксплуатации.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ НОРМАТИВТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ
НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ
1-7 бөлімі. Қажу беріктігі

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Часть 1-7. Усталостная прочность

Дата введения - 2015-07-01

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Область применения

1.1.1 Общие сведения

1.1.1.1 Комплекс нормативно-технических пособий к строительным нормам Республики Казахстан, идентичных Еврокоду 3 (далее НТП к СН РК EN 1993) - это перечень нормативных документов, в которых даны:

- а) рекомендации по основным положениям расчета и конструирования стальных конструкций по СН РК EN 1993;
- б) разъяснения ссылочной информации;
- в) численные примеры расчета;
- г) дополнительная справочная информация.

1.1.1.2 Основополагающими документами при разработке комплекса нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993, помимо самих 20 частей СН РК EN 1993 «Проектирование стальных конструкций», являются:

- а) СН РК EN 1990 «Основы проектирования несущих конструкций»;
- б) СН РК EN 1991 «Воздействия на конструкции»;
- в) EN 1090 «Изготовление стальных и алюминиевых конструкций».

1.1.2 Область применения нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993

1.2.1.1 НТП к СН РК EN 1993 применяется для расчета и конструирования стальных конструкций зданий и сооружений гражданского назначения, выполненного согласно СН РК EN 1993.

1.1.2.2 Положения НТП к СН РК EN 1993 охватывают только требования по несущей способности, эксплуатационной пригодности, долговечности и огнестойкости стальных конструкций. Другие требования не отражены в НТП к СН РК EN 1993.

1.1.2.3 НТП к СН РК EN 1993 необходимо использовать совместно со следующими нормативными документами:

- а) НТП к СН РК EN 1990;
- б) НТП к СН РК EN 1991;

НТП РК 03-01-9.1-2011

в) НТП к СН РК EN 1992 - СН РК EN 1999, в тех частях, которые непосредственно затрагивают расчет стальных конструкций или их элементов;

г) стандарты EN, ETAG, ETA и другие соответствующие стандарты на строительные изделия, относящиеся к стальным конструкциям.

1.1.2.4 Комплекс нормативно-технических пособий к СН РК EN состоит из 19 пособий:

- НТП к СН РК EN 1993-1 «Проектирование стальных конструкций. Общие правила» (12 пособий);

- НТП к СН РК EN 1993-2 «Проектирование стальных конструкций. Стальные мосты» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-3 – «Проектирование стальных конструкций. Стальные башни, мачты и дымовые трубы» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-4 «Проектирование стальных конструкций. Стальные бункера, резервуары и трубопроводы» (3 пособия);

- НТП к СН РК EN 1993-5 «Проектирование стальных конструкций. Стальные шпунты» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-6 «Проектирование стальных конструкций. Стальные подкрановые пути» (1 пособие).

1.1.2.5 В НТП к СН РК EN 1993-1 приведены общие рекомендации и указания по проектированию стальных конструкций, которые распространяются на НТП к СП РК EN 1993, имеющие отношение к специальным зданиям и сооружениям: НТП к СН РК EN 1993-2, НТП к СН РК EN 1993, НТП к СН РК EN 1993-4, НТП к СН РК EN 1993-5, НТП к СН РК EN 1993-6.

1.1.2.6 НТП к СН РК EN 1993-1 состоит из 12 пособий:

- НТП к СН РК EN 1993-1-1;
- НТП к СН РК EN 1993-1-2;
- НТП к СН РК EN 1993-1-3;
- НТП к СН РК EN 1993-1-4;
- НТП к СН РК EN 1993-1-5;
- НТП к СН РК EN 1993-1-6;
- НТП к СН РК EN 1993-1-7;
- НТП к СН РК EN 1993-1-8;
- НТП к СН РК EN 1993-1-9;
- НТП к СН РК EN 1993-1-10;
- НТП к СН РК EN 1993-1-11;
- НТП к СН РК EN 1993-1-12.

1.1.3 Область применения нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993-1-9

1.1.3.1 Настоящее пособие содержит описание методов, применяемых для оценки усталостной прочности элементов стальных конструкций, соединений узлов, испытывающих воздействие переменных нагрузок.

Рассматриваемые методы оценки базируются на результатах испытания на усталостную прочность крупноразмерных образцов и моделей, учитывающих влияние конструктивных и структурных дефектов возникающих при их изготовлении и монтаже.

Правила распространяются на стальные конструкции, эксплуатируемые в нормальных атмосферных условиях при соответствующем техническом обслуживании.

1.1.3.2 Настоящее пособие состоит из 8 Разделов:

Раздел 1: Общие положения;

Раздел 2: Основные требования и методы;

Раздел 3: Методы оценки;

Раздел 4: Напряжения от усталостных воздействий;

Раздел 5: Определение напряжений;

Раздел 6: Определение размахов цикла;

Раздел 7: Предел выносливости;

Раздел 8: Расчет выносливости.

1.1.3.3 Разделы с 1 по 8 настоящего пособия повторяют структуру норматива СН РК EN 1993.

В них даются разъяснения по разделам и пунктам СН РК EN 1993-1-9. В настоящем пособии номера пунктов к СН РК EN 1993 приведены в скобках.

1.1.3.3.1 Раздел 1 содержит общие положения по оценке усталостной прочности;

1.1.3.3.2 Раздел 2 включает основные требования и методы оценки усталостной прочности;

1.1.3.3.3 В Разделе 3 приведены методы оценки, с учетом особенностей расчетов усталостной прочности на основе испытаний;

1.1.3.3.4 Раздел 4 характеризует особенности определения напряжения от усталостных воздействий для различных профилей;

1.1.3.3.5 Раздел 5 представляет правила определения напряжений для первой группы предельных состояний, напряжений в сварных швах и уровня номинальных напряжений (σ и τ);

1.1.3.3.6 В Разделе 6 приведены положения по определению размахов напряжений цикла для сварных соединений полых профилей, для максимального локального напряжения, для болтового стыка прокатной неразрезной балки;

1.1.3.3.7 В Разделе 7 и 8 рассмотрены правила и положения по оценке выносливости стальных конструкций, представлены общие положения, изменение предела выносливости для сварных соединений и расчет на выносливость.

1.2. Нормативные ссылки

1.2.1. В настоящем пособии ссылки на части СН РК EN 1990 - СН РК EN 1999 (основные ссылки):

- СН РК EN 1990;
- СН РК EN 1991;
- СН РК EN 1992;
- СН РК EN 1993;

- СН РК EN 1994;
- СН РК EN 1995;
- СН РК EN 1996;
- СН РК EN 1997;
- СН РК EN 1998;
- СН РК EN 1999.

1.2.2. В настоящем пособии отсутствуют ссылки на стандарты (вторичные ссылки):

1.3 Условия применения

При применении настоящего пособия необходимо учитывать общие требования СН РК EN 1990. Кроме того, все положения настоящего пособия предполагают, что изготовление и сборка стальных конструкций выполнены согласно EN 1090.

1.4 Различия между принципами и правилами проектирования

1.4.1 Различия между принципами и правилами проектирования в настоящем пособии базируются на положениях СН РК EN 1990, где приведены различия между принципами и правилами проектирования конструкций.

1.4.2 Принципы - это такие требования, невыполнение которых не допустимо (если не указано другое).

1.4.3 Правила применения - общепринятые правила, дополняющие и поясняющие принципы.

1.5 Термины и определения

1.5.1 В настоящем пособии используются термины и определения в соответствии:

- с Пунктом 1.5 СН РК EN 1990;
- с Пунктом 1.5 (1) СН РК EN 1993-1-1;
- с Пунктом 1.3 СН РК EN 1993-1-3;
- с Пунктом 1.3 СН РК EN 1993-1-5;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-8,

которые необходимы при расчете стальных конструкций с учетом усталостной прочности.

1.5.2 Термины и определения, касающиеся термообработки металла – см. EN 10052

1.6 Обозначения

1.6.1 В настоящем пособии используются обозначения символов в соответствии:

- с Пунктом 1.6 СН РК EN 1990;
- с Пунктом 1.6 СН РК EN 1993-1-1;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-3;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-5;

- с Пунктом 1.5 СН РК EN 1993-1-8, которые необходимы при расчете стальных конструкций с учетом усталостной прочности.

1.6.2 В дополнение к обозначению символов, перечисленных в Пункте 1.6.1. настоящего пособия, используются символы согласно Пункту 1.8 СН РК EN 1993-1-5.

1.7 Условные обозначения осей элементов

В настоящем пособии используются аналогичное с СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-3, СН РК EN 1993-1-5 и СН РК EN 1993-1-8 обозначение осей элемента.

2 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОДЫ

2.1 (2(1)) Элементы конструкций должны быть запроектированы с расчетом на такое сопротивление усталости, чтобы их эксплуатация была надежной с требуемой вероятностью в течение всего расчетного срока эксплуатации.

2.2 (2(1) ПРИМЕЧАНИЕ) Предполагается, что сооружения, запроектированные с учетом усталостных воздействий по СН РК EN 1991 и расчетов на усталостную прочность в соответствии с СН РК EN 1993-1-9, удовлетворяют этому требованию.

2.3 (2(2)) Приложение А настоящего пособия может быть применено для определения конкретной модели нагружения, если:

- а) модель усталостного нагружения отсутствует в СН РК EN 1991;
- б) требуется более реальная модель усталостного нагружения.

2.4 (2(2) ПРИМЕЧАНИЕ) Требования для определения конкретных моделей усталостного нагружения могут быть указаны в Национальном Приложении. Согласно Пункту НП.2.2 Национального Приложения к СН РК EN 1993-1-9: «Дополнительные модели усталостного нагружения могут быть определены индивидуально в рамках конкретного проекта».

2.5 (2(3)) Испытания на усталость могут проводиться:

- а) для определения сопротивления усталости элементов, не включенных в данную часть;
- б) для определения усталостной долговечности образцов с соответствующей или эквивалентной по повреждению усталостной нагрузкой.

2.6 (2(4)) При проведении и оценке усталостных испытаний должен быть принят во внимание СН РК EN 1990 (см. также Пункт 7.1 настоящего пособия).

2.7 (2(4)) ПРИМЕЧАНИЕ) Требования для определения сопротивления усталости с помощью испытаний могут быть указаны в Национальном Приложении.

2.8 (2(5)) Методы для оценки сопротивления усталости, приведенные в данной части, основаны на проверке конструкции заданным требованиям по выносливости на усталостные воздействия; такая проверка возможна только при условии, что усталостные воздействия определяются параметрами сопротивлений усталости, содержащимися в данном стандарте.

2.9 (2(6)) Усталостные воздействия определяются в соответствии с требованиями оценки сопротивления усталости. Они отличаются от воздействий для контроля

предельного состояния по потере несущей способности и предельного состояния по пригодности к эксплуатации.

2.10 (2(6) ПРИМЕЧАНИЕ) Любые усталостные трещины, которые развиваются за время ожидаемого срока эксплуатационной службы, не обязательно означают наступление конца срока эксплуатационной службы. Трещины должны ремонтироваться с обязательным контролем качества исполнения во избежание более серьезных случаев повреждения.

3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

3.1 Общие положения

3.1.1. Оценка сопротивления усталости должна производиться с применением:

- метода работоспособности с повреждениями;
- метода безопасного ресурса.

3.1.2 Метод работоспособности с повреждениями должен гарантировать достоверность того, что конструкция будет удовлетворительно работать в течение ее проектной долговечности, при условии, что запланированные осмотр и режим обслуживания для обнаружения и исправления усталостных повреждений выполняются в течение срока проектной долговечности конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Метод работоспособности с повреждениями может применяться, когда в момент усталостного разрушения возможно перераспределение усилий между составляющими элемента конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 В Национальном Приложении могут содержаться предусмотренные программы контроля.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Конструкции, оцениваемые в данной части, считаются работоспособными с повреждениями, если материал конструкций выбран согласно 3.1.3-3.1.6 и проводится их регулярное обслуживание.

3.1.3 Для расчета с использованием механики разрушения требование к трещиностойкости и свойства трещиностойкости материалов могут быть выражены величинами CTOD, величинами J-интеграла, K_{Ic} -величинами или KV-величинами, а сравнение должно быть выполнено с использованием соответствующих методов механики разрушения.

3.1.4 Должно соблюдаться следующее условие для расчетной температуры, согласно СН РК EN 1993-1-10:

$$T_{Ed} \geq T_{Rd},$$

где T_{Rd} — температура, при которой можно рассчитывать на безопасный уровень вязкости разрушения при расчетных условиях.

3.1.5 Должен быть смоделирован механизм потенциального разрушения с использованием соответствующего дефекта, который снижает площадь сечения нетто материала, таким образом, делая его более восприимчивым к разрушению отрывом образца с выточкой. Дефект должен соответствовать следующим требованиям:

- местоположение и форма должны соответствовать профилю надреза. Таблицы

классификации усталости в настоящем нормативно-техническом пособии могут использоваться для руководства по соответствующим положениям трещины;

— для элементов, не работающих на усталость, размер дефекта должен быть максимальным, но соответствующим требованиям пунктов, включенных в EN 1090. Предполагаемый дефект должен быть расположен в месте неблагоприятной концентрации напряжений;

— для элементов, работающих на усталость, размер дефекта должен соответствовать размеру начального дефекта, выращенного усталостью. Размер начальной трещины должен быть выбран таким образом, чтобы он представлял минимальную величину, которую можно обнаружить методами контроля, используемыми в соответствии с EN 1090. Рост трещины от усталости должен быть вычислен с помощью соответствующей модели механики разрушения с применением нагрузок, действующих на сооружение во время безопасного проектного срока эксплуатации или инспекционного интервала (соответственно).

3.1.6 Если на деталь конструкции не распространяется настоящее пособие, или если применяются более строгие методы, позволяющие получить результаты более точные, чем приведенные в Таблице 3.2, то должны быть произведены специальные испытания с использованием фактических испытаний на ударный изгиб на крупномасштабных образцах.

ПРИМЕЧАНИЕ Обработка результатов испытаний может быть проведена с использованием методики, приведенной в Разделе 3.2.

3.1.7 Метод безопасного ресурса должен обеспечивать достоверный уровень того, что конструкция будет удовлетворительно работать за время ее проектной долговечности без необходимости регулярных обследований в процессе эксплуатации на предмет усталостного повреждения. Метод безопасного ресурса должен применяться в случаях, когда образование локальной трещины в одной детали быстро приводит к разрушению элемента или всей конструкции.

3.1.8 Для оценки усталости согласно настоящей части, требуемая надежность может быть достигнута корректировкой частного коэффициента безопасности для сопротивления усталости γ_{Mf} , учитывающего последствия разрушения и принятые требования проекта.

3.1.9 Сопротивление усталости определяется рассмотрением элемента конструкции в целом, с учетом его металлургических факторов и геометрических параметров сечения. В подверженных усталости элементах, представленных в настоящей части, также указывается вероятное место зарождения трещины.

3.1.10 Методы оценки сопротивления усталости, приведенные в настоящем техническом кодексе, определяются параметрами кривых сопротивления усталости для:

— стандартных элементов — соответствующими номинальными напряжениями;
— рекомендуемых сварных соединений — соответствующими локальными напряжениями.

3.1.11 Требуемая надежность может быть получена следующими способами:

а) методом работоспособности с повреждениями:

— выбором элементов, материалов и уровней напряжения, так чтобы при образовании трещины в результате были низкая скорость распространения трещины и большая критическая длина трещины;

— назначением нескольких программ нагружения;

— установкой деталей, останавливающих трещины;

— установкой деталей, легко контролируемых в процессе регулярных осмотров;

б) методом безопасного ресурса:

— выбором элементов и уровней напряжения, обеспечивающим усталостную долговечность, достаточную, чтобы получить значения β , равные таковым для проверок предельного состояния в конце проектного времени эксплуатации.

ПРИМЕЧАНИЕ Национальное Приложение может принимать другие методы оценки определения предельных состояний, а также назначать численные значения для γ_{Mf} . Рекомендованные значения γ_{Mf} приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Рекомендованные значения частных коэффициентов безопасности для сопротивления усталости

Метод оценки	Последствия разрушения	
	Малые последствия	Большие последствия
Работоспособности при повреждениях	1,00	1,15
Безопасного ресурса	1,15	1,35

Таблица 3.2 — Максимально допустимые значения толщины элемента t , мм.

Класс стали	Под-класс стали	Работа по Шарпи (CVN)		Расчетная температура T_{Ed} , °C																				
		при T_c	v_{min}	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50
				$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$							$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$							$\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$						
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80	70	60	55
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110	95	80	70
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	145	125	110	95
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	165	145	125	110
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	10	10	65	55	45	40	30	25	20	110	95	80	70	60	55	45
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Применяя Таблицу 3.2, допускается использовать линейную интерполяцию. В большинстве случаев используются промежуточные значения σ_{Ed} между $\sigma_{Ed} = 0,75f_y(t)$ и $\sigma_{Ed} = 0,50f_y(t)$. $\sigma_{Ed} = 0,25f_y(t)$ дается в целях интерполяции. Экстраполяции сверх экстремальных значений применять недопустимо.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Для сортаментов изделий, выполненных из сталей S690, необходимо принимать температуру испытаний T_{KV} .

ПРИМЕЧАНИЕ 3 В Таблице 3.2 приведены гарантированные значения KV-величины, полученные при испытаниях на ударный изгиб образцов по Шарпи (CVN), изготовленных в направлении проката изделия.

3.2 Расчет на основе испытаний

3.2.1 Область и пределы применения

3.2.1.1 Настоящее Приложение не заменяет существующие правила сдачи-приемки, установленные в других европейских стандартах на изделия и производство работ.

3.2.2 Символы и условные обозначения

В настоящем Приложении действуют следующие символы и условные обозначения:

Прописные буквы латинского алфавита

- $E(.)$ — среднее значение $(.)$;
 V — коэффициент вариации [$V = (\text{стандартное отклонение}/\text{среднее значение})$];
 V_X — коэффициент вариации для X ;
 V_δ — оценочное значение коэффициента вариации для меры рассеяния δ ;
 X — ряд базисных переменных $j \ X_1 \dots X_j$;
 $X_{k(n)}$ — нормативное значение с учетом статистической погрешности из-за числа проб n , но без учета коэффициентов пересчета η ;
 \underline{X}_m — ряд средних значений базисных переменных;
 \underline{X}_n — ряд номинальных значений базисных переменных.

Строчные буквы латинского алфавита

- b — поправка среднего значения;
 b_i — коэффициент поправки для каждого испытания i ;
 $g_{rt}(\underline{X})$ — функция сопротивления (базисной переменной \underline{X}), которая представляет модель расчета;
 $k_{d,n}$ — коэффициент фрактиля для расчетных значений;
 k_n — коэффициент фрактиля для нормативных значений;
 m_X — среднее значение показателя n проб;
 n — количество экспериментальных и численных результатов теста;
 r — значение функции сопротивления;
 r_d — расчетное значение функции сопротивления;
 r_e — среднее значение экспериментальных значений сопротивления;
 r_{ee} — экстремальное значение (максимум или минимум) экспериментальных значений сопротивления [т. е. значение r_e , которое больше всего отклоняется от среднего значения];
 r_{ei} — экспериментальное значение сопротивления для каждого испытания i ;
 r_{em} — среднее значение экспериментальных значений сопротивления;
 r_k — нормативное значение функции сопротивления;
 r_m — значение функции сопротивления, рассчитанное по средним значениям базисной переменной;
 r_n — номинальное значение функции сопротивления;
 r_t — теоретическая функция сопротивления равнозначная $g_{rt}(\underline{X})$;
 r_{ti} — значения теоретической функции сопротивления при использовании измеренных параметров \underline{X} для каждого испытания i ;
 s — оценочное значение для стандартного отклонения σ ;
 s_Δ — оценочное значение для σ_Δ ;
 s_δ — оценочное значение для σ_δ .

Прописные буквы греческого алфавита

- Φ — кумулятивная функция стандартного нормального распределения;

- Δ — логарифм меры рассеяния δ , [$\Delta_i = \ln(\delta_i)$];
 $\bar{\Delta}$ — оценочное значение для $E(\Delta)$.

Строчные буквы греческого алфавита

- α_E — средневзвешенный коэффициент для влияния воздействий по методу надежности 1 порядка FORM;
 α_R — средневзвешенный коэффициент для сопротивления по методу надежности 1 порядка FORM;
 β — индекс надежности;
 γ_M^* — скорректированный частный коэффициент безопасности для сопротивления, $\left[\gamma_M^* = \frac{r_n}{r_d} \text{ или } \gamma_M^* = k_c \gamma_M \right]$;
 δ — мера рассеяния;
 δ_i — мера рассеяния для пробы i , $\left[\delta_i = \frac{r_{ei}}{br_{fi}} \right]$;
 η_d — расчетное значение коэффициента пересчета;
 η_k — фактор снижения для учета предварительной информации;
 σ — стандартное отклонение $\left[\sigma = \sqrt{\text{рассеяние}} \right]$;
— рассеяние для выражения Δ .

3.2.3 Различные виды испытаний

3.2.3.1 Необходимо различать следующие виды испытаний:

- а) испытания по непосредственному определению несущей способности или эксплуатационной пригодности несущих конструкций, или их элементов для определенных условий нагрузок. Такие испытания могут, например, проводиться для пожарной нагрузки, нагрузок, приводящих к явлениям усталости, или нагрузок от ударов;
- б) испытания по установлению показателей строительных материалов при определенных испытательных условиях, например, исследования грунта на строительной площадке или в лаборатории или испытания с новыми строительными материалами;
- в) испытания по уменьшению погрешностей при воздействиях или при вызванных ими влияниях, например, аэродинамические испытания или испытания по определению волновых нагрузок или нагрузок от потоков;
- г) испытания по уменьшению погрешностей определенных величин моделей сопротивления, например, испытания элементов конструкции или испытания групп элементов конструкции (например, конструкции кровель и перекрытий);
- д) контрольные испытания по проверке качества поставляемых изделий или соответствия показателей изделий, например, испытание канатов для мостов или испытание бетонных кубиков;
- е) испытания во время производства работ для подтверждения показателей после

монтажа, например, испытание опор или испытание усилия канатов во время производства работ;

ж) контрольные испытания для более точного определения показателей несущей конструкции или ее частей после изготовления, например, для определения упругой деформации, собственных колебаний или амортизации;

3.2.3.2 При необходимости определения расчетных значений по результатам испытаний, а), б), в) или г) следует применять статистические методы, см. 3.2.5 – 3.2.8.

ПРИМЕЧАНИЕ При проведении испытаний с) могут потребоваться специальные методы.

3.2.3.3 Виды испытаний д), е) или ж) можно рассматривать как приемочные испытания, если первоначальный расчет проводится с некоторыми допущениями, которые в последующем должны быть подтверждены испытаниями.

3.2.4 План испытаний

3.2.4.1 До проведения испытаний следует провести согласование плана испытаний с испытательным органом. План должен содержать цели испытаний и все требования по выбору и изготовлению испытываемых образцов, по проведению и оценке испытаний. В частности план должен содержать:

- цель испытаний;
- прогноз результатов испытаний;
- требования к испытываемым образцам и пробам;
- условия нагружения;
- перечень испытательного оборудования и порядок проведения испытаний;
- план измерений;
- обработку результатов и составление протоколов.

3.2.4.2 Следует четко определить цели испытаний, например, требуемые показатели, влияние определенных параметров, изменяемых в течение испытаний. Следует определить границы возможностей испытаний и требуемые функции передачи нагрузок по принятым моделям.

3.2.4.3 Следует учесть все показатели и обстоятельства, которые могут влиять на прогноз результатов испытаний, например:

- геометрические параметры и их изменение;
- геометрические дефекты;
- показатели строительных материалов;
- влияние методов изготовления и строительства;
- влияние условий окружающей среды и выбора оптимальной последовательности.

Следует описать ожидаемые виды отказа и расчетные модели в сочетании с величинами воздействия. При неопределенности вида отказа план испытаний должен предусматривать предварительные испытания.

ПРИМЕЧАНИЕ Следует проверить возможность различных видов отказа элемента конструкции.

3.2.4.4 Испытываемые образцы следует устанавливать и отбирать таким образом, чтобы они передавали условия строительства. При этом необходимо учитывать следующее:

- размеры и допуски;
- строительные материалы и изготовление прототипов;
- количество испытываемых образцов;
- методы отбора проб;
- способы фиксации и заделки образцов.

Целью метода отбора должно быть получение статистически характерных проб.

Следует иметь в виду возможные различия между испытываемыми образцами и совокупностью элементов конструкции, которые могут повлиять на результаты.

3.2.4.5 Условия нагружения и условия окружающей среды должны включать:

- начало нагрузки;
- нагрузочную и временную характеристику;
- способы фиксации и заделки;
- температуру;
- относительную влажность;
- деформационную или регулируемую по силе нагрузку и т. д.

Последовательность нагружения следует устанавливать таким образом, чтобы она соответствовала предусмотренной загрузке элемента конструкции, как при нормальных, так и при тяжелых условиях. Следует принимать во внимание возможные взаимосвязи между поведением элемента конструкции и испытательной установкой.

Если поведение элемента конструкции зависит от изменения одного или нескольких воздействий, которые не меняются в испытании, то следует применять характерные значения этих воздействий.

3.2.4.6 Для обеспечения необходимого качества результатов испытаний требуются соответствующее испытательное оборудование и методы измерений.

3.2.4.7 До проведения испытания следует перечислить все показатели, которые должны быть измерены на различных испытываемых образцах. Для этого следует указать:

- а) места измерений;
- б) методы измерений, например:
 - временных характеристик смещений;
 - скоростей смещений;
 - колебаний;
 - удлинений;
 - частоту колебаний;
 - точность измерений;
 - соответствующие измерительные приборы.

3.2.4.8 Особые указания содержатся в 3.2.5–3.2.8. Стандарты на испытания и контроль, по которым должны проводиться испытания, необходимо указывать.

3.2.5 Получение расчетных значений

3.2.5.1 Получение расчетных значений для показателей строительных материалов, параметров модели или сопротивлений элементов конструкции по результатам испытаний должно осуществляться следующим образом:

- а) посредством определения нормативного значения, которое следует разделить на частный коэффициент безопасности и, возможно, умножить на коэффициент передачи (см. 3.2.7.3 и 3.2.8.3);
- б) посредством прямого определения расчетного значения с учетом функции передачи и требуемой надежности (см. 3.2.7.3 и 3.2.8.3).

ПРИМЕЧАНИЕ Как правило, предпочтителен метод а), если частный коэффициент безопасности задается расчетным методом (см. 3.2.5.3) ниже).

3.2.5.2 При определении нормативного значения по результатам испытаний (метод а)) следует учитывать:

- а) рассеяние результатов испытаний;
- б) статистическую погрешность в результате ограниченного числа испытаний;
- в) статистическую предварительную информацию.

3.2.5.3 При наличии достаточной достоверности между результатами испытаний и расчетами, проводимыми с применением частных коэффициентов безопасности, для нормативного значения следует применять частный коэффициент безопасности соответствующего еврокода.

3.2.5.4 Если сопротивление строения или элемента конструкции или прочность зависит от воздействий, недостаточно учитываемых при испытаниях, например:

- временные или длительные воздействия;
 - масштаб и величина воздействий;
 - различные условия окружающей среды и приложения нагрузок, граничные условия;
 - воздействия сопротивлений элементов конструкции,
- то эти воздействия необходимо учитывать в расчетных моделях.

3.2.5.5 Если в особых случаях для определения расчетных значений используется метод из 3.2.5.1 б), следует учитывать:

- определяющие предельные состояния;
- требуемый уровень надежности;
- совместимость с допущениями в выражении (С.8а) СН РК EN 1990 на стороне воздействия;
- при необходимости, требуемый срок эксплуатации;
- предварительную информацию аналогичных случаев.

ПРИМЕЧАНИЕ Дальнейшие указания см. в 3.2.6, 3.2.7 и 3.2.8.

3.2.6 Общие принципы статистической оценки

3.2.6.1 При обработке результатов испытаний сначала следует сравнить поведение и виды отказа с прогнозируемыми. Если возникают значительные различия, то их необходимо обосновать; это может привести к дополнительным испытаниям, при необходимости — с отклоняющимися условиями, или к изменениям теоретической модели.

3.2.6.2 Обработка результатов испытаний должна производиться статистическими методами при использовании информации о функциях распределения и ее параметров. Методы в настоящем Приложении допускается применять при условии распространения статистических данных (включая предварительную информацию) на определенные основные совокупности, являющиеся достаточно однородными, и наличия достаточного количества результатов измерений.

ПРИМЕЧАНИЕ При анализе результатов испытаний следует различать следующие три основные категории:

- классическая — статистическая оценка невозможна при проведении только одного испытания или только отдельных испытаний. Только наличие обширной предварительной информации и вариантов объединения этой предварительной информации с результатами испытаний дают возможность сделать статистический вывод (метод Байша, см. ISO 12491);

- приложение сил и нагрузок;

- классическая — статистическая оценка может быть возможна при наличии большой серии испытаний по определению отдельного параметра. Обычные случаи рассматриваются, например, в 3.2.7. Для данной оценки требуется также наличие предварительной информации о параметре, но в меньшем объеме, чем указано выше;

- классическая — статистическая оценка возможна при проведении серии испытаний с целью проверки расчетной модели (в форме функции) с применением одной или нескольких величин воздействия.

3.2.6.3 Результаты обработки испытаний распространяются только на условия испытаний и условия нагружения. При переносе результатов испытаний на другие условия и нагрузки необходимо использовать предварительную информацию прежних испытаний или полученную теоретически.

3.2.7 Статистическое определение отдельного показателя

3.2.7.1 Общие положения

3.2.7.1.1 В настоящем разделе приведены способы получения расчетных значений для отдельного показателя на основании испытаний видов а) и б) в 3.2.3.1 (например, прочность) при применении методов оценки а) и б) 3.2.5.1.

ПРИМЕЧАНИЕ Указанные здесь функции, в которых используют метод Байша с «неконкретными» предварительными распределениями, приводят примерно к таким же результатам, как и классические методы с уровнем достоверности 75 %.

3.2.7.1.2 Отдельный показатель может заключаться в:

- а) сопротивлении R изделия;
- б) показателе X , способствующем сопротивлению R изделия.

3.2.7.1.3 В случае а) можно применять методы в 3.2.7.2 и 3.2.7.3, чтобы непосредственно определить нормативные значения R_k , расчетные значения R_d или частные коэффициенты безопасности γ_m .

3.2.7.1.4 В случае б) необходимо учитывать, что расчетное значение сопротивления R_d может включать:

- действия других показателей X ;
- погрешность модели;
- другие эффекты (масштаб, объем и т. д.).

3.2.7.1.5 Таблицы и выражения в 3.2.7.2 и 3.2.7.3 основываются на следующих допущениях:

- положенное в их основу распределение представляет собой нормальное распределение или логарифмически-нормальное распределение;
- отсутствие предварительной информации о среднем значении;
- в случае « V_X неизвестно» — отсутствие предварительной информации о коэффициентах вариации;
- в случае « V_X известно» — наличие полной предварительной информации о коэффициентах вариации.

ПРИМЕЧАНИЕ При применении логарифмически-нормальных распределений исключаются возможные отрицательные значения, например, размеров или прочности.

На практике рекомендуется использовать случай « V_X известно» в сочетании с верхним оценочным значением V_X вместо случая « V_X неизвестно». Кроме того, если V_X неизвестно, следует принимать, минимум, 0,10.

3.2.7.2 Определение значения измеряемого показателя через характерное значение, согласно СН РК EN 1990, Приложение D

3.2.7.2.1 Расчетное значение X_d определяется следующим образом:

$$X_d = \eta_d \cdot \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \cdot m_X \{1 - k_n V_X\}.$$

ПРИМЕЧАНИЕ Определение коэффициента вида пересчета η_d в значительной мере зависит от испытаний и строительного материала.

Значение k_n указано в Таблице 3.3.

3.2.7.2.2 При применении Таблицы 3.3 следует учитывать следующее:

- выражение « V_X известно» следует применять, если коэффициент вариации или верхнее оценочное значение известно из предварительной информации.

ПРИМЕЧАНИЕ Предварительная информация исходит из оценки предыдущих сравнимых испытаний, причем сравнимость подлежит инженерной оценке (см. 3.2.7.1.3).

— выражение « V_X неизвестно» следует применять, если коэффициент вариации из предварительной информации неизвестен и определяется по результатам испытаний с применением формул:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot (x_i - m_x)^2,$$

$$V_X = s_x / m_x.$$

3.2.7.2.3 Частный коэффициент безопасности γ_m следует устанавливать в зависимости от области применения, на которую распространяются испытания.

Таблица 3.3 — Значения k_n для нормативных значений (5 %-ный фрактил)

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X известно	2,3 1	2,01	1,8 9	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,6 4
V_X неизвестно	—	—	3,3 7	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,6 4

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Данная таблица основывается на нормальном распределении.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 При применении логарифмически-нормального распределения выражение (3.2) имеет вид:

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \cdot \exp[m_y - k_n s_y],$$

причем

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i).$$

Если V_X известно из предварительной информации,

$$s_y = \sqrt{\ln(V_X^2 + 1)} \approx V_X.$$

Если V_X неизвестно из предварительной информации,

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln x_i - m_y)^2}.$$

3.2.7.3 Прямое определение расчетного значения для подтверждения несущей способности, согласно СН РК EN 1990, Приложение D

3.2.7.3.1 Расчетное значение X_d величины X следует определять по формуле:

$$X_d = \eta_d X_{od} = \eta_d m_X \{1 - k_n V_X\}.$$

Значение η_d должно охватывать все погрешности, которые не охватываются самими испытаниями.

3.2.7.3.2 Значение $k_{d,n}$ следует определять по Таблице 3.4.

Таблица 3.4 — Значения $k_{d,n}$ для расчетного значения для подтверждений несущей способности

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X известно	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
V_X неизвестно	—	—	—	11,4	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1 Данная таблица основана на допущении, что расчетное значение соответствует произведению $\alpha_R \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04$ (см. Приложение С, СН РК EN 1990) и X нормально распределено. Вероятность ошибки составляет примерно 0,1 %.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2 При логарифмически-нормальном распределении выражение (3.5) преобразовывается в следующую зависимость:</p> $X_d = \eta_d \exp[m_y - k_{d,n} s_y].$											

3.2.8 Статистическое определение модели сопротивления

3.2.8.1 Общие положения

3.2.8.1.1 В настоящем разделе приведены методы проверки моделей сопротивления и определения расчетных значений на основании результатов испытаний вида d) (см. 3.2.3.1). С этой целью используется предварительная информация (варианты).

3.2.8.1.2 На основании испытаний или теоретических разработок необходимо создать «расчетную модель» $g_n(X)$, которая приводит к функции сопротивления r_t . Действенность данной модели следует проверить при помощи статистической оценки всех имеющихся результатов испытаний. При необходимости, расчетную модель следует усовершенствовать до получения достаточной корреляции между теоретическими значениями и результатами испытаний.

3.2.8.1.3 Рассеяние прогноза при помощи расчетной модели (т. е. вариацию «значения рассеяния δ ») следует определять посредством испытаний. Данное рассеяние необходимо комбинировать с рассеянием других величин воздействия в функции сопротивления. Рассеяние других величин воздействия включает:

- рассеяние прочности и жесткости строительного материала;
- рассеяние геометрических показателей.

3.2.8.1.4 Нормативное сопротивление определяется с учетом рассеяния всех величин воздействия.

3.2.8.1.5 Два различных метода определения расчетных значений 3.2.5.1 соответствуют методам оценки 3.2.8.2 и 3.2.8.3. Для этого в 3.2.8.4 указываются некоторые упрощения.

Данные методы указываются в форме отдельных этапов и в сочетании с допущениями по основной совокупности с пояснениями. Допущения представляют лишь рекомендации для обычных случаев испытаний.

3.2.8.2 Стандартизированный метод оценки (метод а))

3.2.8.2.1 Общие положения

3.2.8.2.1.1 Для стандартизированного метода оценки действуют следующие допущения:

- а) функция сопротивления — это функция независимых переменных \underline{X} ;
- б) наличие достаточного количества результатов испытаний;
- в) все основные величины являются установленными значениями;
- г) отсутствие корреляции (статистической зависимости) между переменными в функции сопротивления;
- д) все переменные соответствуют нормальному или логарифмически-нормальному распределению.

ПРИМЕЧАНИЕ Применение логарифмически-нормального распределения для всех переменных имеет то преимущество, что не возникает отрицательных значений.

3.2.8.2.1.2 Стандартизированный способ метода 3.2.5.1.а) состоит из семи этапов, которые изложены в 3.2.8.2.2.1 – 3.2.8.2.2.7.

3.2.8.2.2 Стандартизированный способ, согласно СН РК EN 1990, Приложение D

3.2.8.2.2.1 Этап 1: Разработка расчетной модели

3.2.8.2.2.1.1 Для конструкции или элемента конструкции следует разработать расчетную модель в форме теоретической функции сопротивления r_t , которая выражается

$$r_t = g_{rt}(\underline{X}).$$

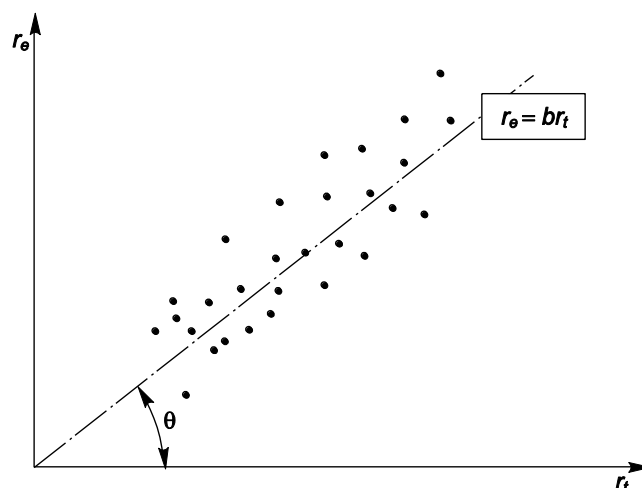
3.2.8.2.2.1.2 Функция сопротивления должна содержать все определяющие основные базисные переменные \underline{X} , которые оказывают воздействие на рассматриваемое предельное состояние.

3.2.8.2.2.1.3 Для каждого испытываемого образца следует измерить все базисные переменные (допущение в) в 3.2.8.2.1), необходимые для оценки.

3.2.8.2.2.2 Этап 2: Сравнение экспериментальных и теоретических значений

3.2.8.2.2.2.1 Применяя в функции сопротивления действительные измеренные значения показателей, следует определить теоретические значения r_{ti} , при помощи которых проводится сравнение с экспериментальными значениями r_{ei} .

3.2.8.2.2.2.2 Точки, представляющие пары значений (r_{ti}, r_{ei}) , необходимо представить на диаграмме, как показано на Рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 — Диаграмма $r_e - r_t$

3.2.8.2.2.3 Если бы функция сопротивления была точной и полной, тогда все точки находились бы на биссектрисе. На практике возникают рассеяния. Каждое систематическое отклонение от биссектрисы должно быть исследовано, чтобы установить, нет ли ошибок при испытаниях или в функции сопротивления.

3.2.8.2.2.3 Этап 3: Определение поправки среднего значения b

3.2.8.2.2.3.1 Функция сопротивления r дана в вероятностной форме:

$$r = b r_t \delta,$$

где b — отклонение среднего значения, определенное при помощи минимума квадратов отклонения:

$$b = \frac{\sum r_e r_t}{\sum r_t^2}.$$

3.2.8.2.2.3.2 Значения теоретической функции сопротивления r_m , рассчитанные со средними значениями базисных переменных \underline{X}_m , можно определить по формуле:

$$r_m = b r_t(\underline{X}_m) = b g_{\pi}(\underline{X}_m) \delta.$$

3.2.8.2.2.4 Этап 4: Определение коэффициента вариации величины рассеяния

δ

3.2.8.2.2.4.1 Величина рассеяния δ_i должна быть определена для каждого испытания по определению сопротивления r_{ei} при помощи выражения

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{b r_{ti}}.$$

3.2.8.2.2.4.2 При помощи значений δ_i необходимо определить оценочное значение V_{δ} .

$$\Delta_i = \ln(\delta_i).$$

3.2.8.2.2.4.3 Оценочное значение $\bar{\Delta}$ для $E(\Delta)$ следует из выражения

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i.$$

3.2.8.2.2.4.4 Оценочное значение s_{Δ}^2 для s_{Δ}^2 определяется из выражения

$$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2.$$

3.2.8.2.2.4.5 Полученное значение

$$V_{\delta} = \sqrt{\exp(s_{\Delta}^2) - 1},$$

допускается применять как коэффициент вариации V_{δ} для величины рассеяния δ .

3.2.8.2.2.5 Этап 5: Проверка совместимости

3.2.8.2.2.5.1 Как правило, совместимость допущений, сделанных при составлении функции сопротивления, необходимо проверить при помощи результатов испытаний.

3.2.8.2.2.5.2 Если рассеяние значений r_{ci} и r_{ti} слишком большое, чтобы получить эффективные функции сопротивления, рассеяние можно уменьшить следующим образом:

- а) улучшением расчетной функции посредством учета дополнительных параметров;
- б) изменением b и V_{δ} путем разделения основной совокупности на соответствующие подгруппы, для которых воздействие таких дополнительных параметров остается постоянным.

3.2.8.2.2.5.3 Для того чтобы установить, какой параметр имеет наибольшее воздействие на рассеяние, результаты испытаний можно разбить на подгруппы с учетом данных параметров.

ПРИМЕЧАНИЕ Цель заключается в улучшении функции сопротивления посредством отдельной оценки подгрупп стандартизированным способом. Уменьшению рассеяния в каждой подгруппе может противостоять увеличенная статистическая погрешность из-за уменьшенного числа испытаний.

3.2.8.2.2.5.4 При определении коэффициента фрактиля k_n нормативного значения функции сопротивления (см. этап 7) для всех подгрупп можно применять коэффициент, соответствующий общему количеству результатов испытаний.

ПРИМЕЧАНИЕ Следует обращать внимание на то, что статистическое распределение функции сопротивления может быть бимодальным или мультимодальным. Оно может быть представлено в интересующей области при помощи одномодального нормального распределения.

3.2.8.2.2.6 Этап 6: Определение коэффициентов вариации базисных переменных V_{xi}

3.2.8.2.2.6.1 Если можно доказать, что общий объем испытаний характерен для действительных условий рассеяния, то коэффициенты вариации базисных переменных V_{xi} можно определить из испытаний. Но поскольку, как правило, этого не случается, коэффициенты вариации V_{xi} определяются на основании предварительной информации.

3.2.8.2.2.7 Этап 7: Определение нормативного значения r_k функции сопротивления

3.2.8.2.2.6.1 Если функция сопротивления с базисной переменной j имеет форму произведения

$$r = br_t = b\{X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_j\}\delta,$$

тогда среднее значение $E(r)$ можно определить из выражения

$$E(r) = b\{E(X_1) \cdot E(X_2) \cdot \dots \cdot E(X_j)\} = bg_r(\underline{X}_m),$$

а коэффициент вариации — из выражения

$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1) \cdot \left[\prod_{i=1}^j (V_{X_i}^2 + 1) \right] - 1.$$

3.2.8.2.2.6.2 Для малых значений V_δ^2 и $V_{X_i}^2$ допускается использовать следующее приближение:

$$V_r^2 = V_\delta^2 + V_{X_i}^2,$$

при

$$V_r^2 = \sum_{i=1}^j V_{X_i}^2.$$

3.2.8.2.2.6.3 Если функция сопротивления представляет собой комплексную функцию в виде

$$r = br_t \delta = bg_r\{X_1, \dots, X_j\}\delta,$$

тогда среднее значение $E(r)$ можно определить из выражения

$$E(r) = bg_r(E(X_1), \dots, E(X_j)) = bg_r(\underline{X}_m),$$

а коэффициент вариации V_r — из выражения

$$V_r^2 = \frac{VAR[g_r(\underline{X})]}{g_r^2(\underline{X}_m)} = \frac{1}{g_r^2(\underline{X}_m)} \cdot \sum_{i=1}^j \left(\frac{\partial g_r}{\partial X_i} \cdot \sigma_i \right)^2.$$

3.2.8.2.2.6.4 Если число испытаний ограничено до $n < 100$, следует учитывать распределение Δ для статистических погрешностей. Распределение должно быть принято как центральное распределение t^5 с параметрами $\bar{\Delta}$, $V_{\Delta(r)}$ и n .

3.2.8.2.2.6.5 В данном случае нормативное значение функции сопротивления r_k определяется по формуле:

$$r_k = bg_r(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_\infty \alpha_r Q_r - k_n \alpha_\delta Q_\delta - 0,5 Q^2),$$

где

$$Q_r = \sigma_{\ln(r)} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)},$$

$$Q_\delta = \sigma_{\ln(\delta)} = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)},$$

$$Q = \sigma_{\ln(r)} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)},$$

$$\alpha_r = \frac{Q_r}{Q},$$

$$\alpha_\delta = \frac{Q_\delta}{Q},$$

где k_n — коэффициент фактиля для нормативного значения из Таблицы 3.3 для случая « V_X неизвестно»;

k_∞ — значение коэффициента фактиля k_n для $n \rightarrow \infty$ [$k_\infty = 1,64$];

α_{π} — средневзвешенный коэффициент для Q_{π} ;

α_δ — средневзвешенный коэффициент для Q_δ .

ПРИМЕЧАНИЕ Значение V_δ определяется для соответствующей серии испытаний.

3.2.8.2.2.6.6 Для большого числа испытаний (например, $n \geq 100$) нормативное значение функции сопротивления r_k допускается определять по формуле:

$$r_k = b g_{\pi}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_\infty Q - 0,5 Q^2).$$

3.2.8.3 Стандартизированный метод оценки (метод b)), согласно СН РК EN 1990, Приложение D

3.2.8.3.1 В данном случае применяется такой же способ, как в 3.2.8.2, за исключением того, что в этапе 7 коэффициент фактиля для нормативного значения k_n заменяется на коэффициент фактиля для расчетного значения $k_{d,n}$. Расчетное значение функции сопротивления r_d соответствует произведению

$$k_{d,\infty} = \alpha_R \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04 \text{ (см. Приложение C EN 1990)}.$$

3.2.8.3.2 При ограниченном количестве испытаний r_d определяется по формуле:

$$r_d = b g_{\pi}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_{d,\infty} \alpha_{\pi} Q_{\pi} - k_{d,n} \alpha_\delta Q_\delta - 0,5 Q^2),$$

где $k_{d,n}$ — коэффициент фактиля для расчетного значения из Таблицы 3.4 для случая « V_X неизвестно»;

$k_{d,\infty}$ — значение коэффициента фактиля $k_{d,n}$ для $n \rightarrow \infty$ [$k_{d,\infty} = 3,04$].

ПРИМЕЧАНИЕ Значение V_δ оценивается для рассматриваемых испытаний.

3.2.8.3.3 При большом числе испытаний значение r_d допускается определять по формуле:

$$r_d = b g_{\pi}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_{d,\infty} Q - 0,5 Q^2).$$

3.2.8.4 Использование дополнительной предварительной информации, согласно СН РК EN 1990, Приложение D

3.2.8.4.1 Если действительность функции сопротивления r_t и верхний предел (консервативная оценка) коэффициента вариации V_r множества испытаний известны, то для дальнейших аналогичных испытаний допускается применять следующий упрощенный способ.

3.2.8.4.2 Если проводится только одно испытание, то нормативное значение r_k можно определять по результату испытания (r_e) по формуле:

$$r_k = \eta_k r_e,$$

при этом η_k — коэффициент уменьшения для учета предварительной информации, для определения которого можно использовать выражение

$$\eta_k = 0,9 \exp(-2,31V_r - 0,5V_r^2),$$

где V_r — максимальное значение коэффициента вариации, который наблюдался в предыдущих испытаниях.

3.2.8.4.3 Если проводятся два или три испытания, которые приводят к среднему значению r_{em} , то нормативное значение r_k можно определять из среднего значения r_{em} по формуле:

$$r_k = \eta_k r_{em},$$

где η_k — коэффициент уменьшения для учета предварительной информации, для определения которого можно использовать выражение

$$\eta_k = \exp(-2,0V_r - 0,5V_r^2).$$

При этом V_r является максимальным значением коэффициента вариации, который наблюдался в предыдущих испытаниях, а экстремальные значения r_{ee} (максимумы и минимумы) должны отвечать условию

$$|r_{ee} - r_{em}| \leq 0,10r_{em}.$$

3.2.8.4.4 На основании имеющейся предварительной информации из испытаний, которые проводились для определенных типов конструкций, к различным видам отказов можно отнести определенные коэффициенты вариации (см. соответствующие еврокоды). Для различных коэффициентов вариации V_r в Таблице 3.5 приведены значения коэффициента уменьшения η_k в соответствии с зависимостями (D.24) и (D.26) СН РК EN 1990.

Таблица 3.5 — Коэффициент уменьшения η_k

Коэффициент вариации V_r	Коэффициент уменьшения η_k	
	для одного испытания	для двух или трех испытаний
0,05	0,80	0,90
0,11	0,70	0,80
0,17	0,60	0,70

4 НАПРЯЖЕНИЯ ОТ УСТАЛОСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

4.1 (4(1)) Определение номинальных напряжений должно учитывать все присутствующие воздействия, включая влияние искривления, и должно проводиться на основе упругой работы элементов и соединений.

4.2 (4(2)) Для решетчатых ферм, изготовленных из прокатных профилей замкнутого сечения, расчет может основываться на упрощенной модели фермы с шарнирными узлами. При определении напряжений при узловой нагрузке на ферму, влияние моментов в связи с жестким соединением стержней в узлах учитывается при помощи коэффициентов k_1 (см. Таблицу 4.1 настоящего пособия - для профилей круглого сечения, Таблицу 4.2 - для профилей прямоугольного сечения). Кроме того, геометрические характеристики прокатных профилей замкнутого сечения должны удовлетворять требованиям Таблицы 8.7 СН РК EN 1993-1-9.

Таблица 4.1 - Коэффициенты k_1 для прокатных профилей замкнутого сечения при нагрузке в плоскости фермы

Тип соединения		Пояса	Стойки	Раскосы
Соединения с зазором	К-тип	1,5	-	1,3
	N-тип/КТ-тип	1,5	1,8	1,4
Перекрывающиеся соединения	К-тип	1,5	-	1,2
	N-тип/КТ-тип	1,5	1,65	1,25

Таблица 4.2 - Коэффициенты k_1 для прокатных профилей замкнутого сечения при нагрузке в плоскости фермы

Тип соединения		Пояса	Стойки	Раскосы
Соединения с зазором	К-тип	1,5	-	1,5
	N-тип/КТ-тип	1,5	2,2	1,6
Перекрывающиеся соединения	К-тип	1,5	-	1,3
	N-тип/КТ-тип	1,5	2,0	1,4

4.3 Указания по определению типа соединения (К-тип, N-тип, КТ-тип) в решетчатых фермах - см. Раздел 7 СН РК EN 1993-1-8.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ

5.1 (5(1)) Напряжения должны вычисляться для предельных состояний эксплуатационной пригодности.

5.2 (5(2)) Поперечные сечения класса 4 оцениваются на усталостные нагрузки в соответствии с СН РК EN 1993-1-5.

5.3 (5(2) ПРИМЕЧАНИЕ 1) Дополнительную информацию к Пункту 5.2 настоящего пособия - см. в СН РК EN 1993-2 – EN 1993-6.

5.4 (5(2) ПРИМЕЧАНИЕ 2) Национальное Приложение может давать ограничения сечениям класса 4. Однако, согласно Пункту НП.2.6 Национального Приложения к СН РК EN 1993-1-9: «Ограничения для поперечных сечений класса 4 не приводятся».

5.5 (5(3)) Номинальные напряжения должны вычисляться в месте предполагаемого усталостного повреждения. Эффекты, приводящие к концентрациям напряжений в элементах, отличные от включенных в Таблицы 8.2 – 8.11 СН РК EN 1993-1-9, должны вычисляться с использованием коэффициента концентрации напряжения (SCF) в соответствии с Пунктом 6.3 настоящего пособия для получения измененного номинального напряжения.

5.6 (5(4)) При использовании методов локального напряжения в элементах, относящихся к Таблице В.1 настоящего пособия, напряжения должны вычисляться, как показано в Пункте 6.5 настоящего пособия.

5.7 (5(5)) Напряжения, действующие в основном материале элементов, это:

- номинальные нормальные напряжения σ ;
- номинальные касательные напряжения τ .

5.8 (5(5) ПРИМЕЧАНИЕ) Для учета суммарных номинальных напряжений - см. Пункт 8.3 настоящего пособия.

5.9 (5(6)) Напряжения, действующие в сварном шве (см. Рисунок 5.1), это:

- нормальные напряжения σ_{wf} поперек оси сварного шва:

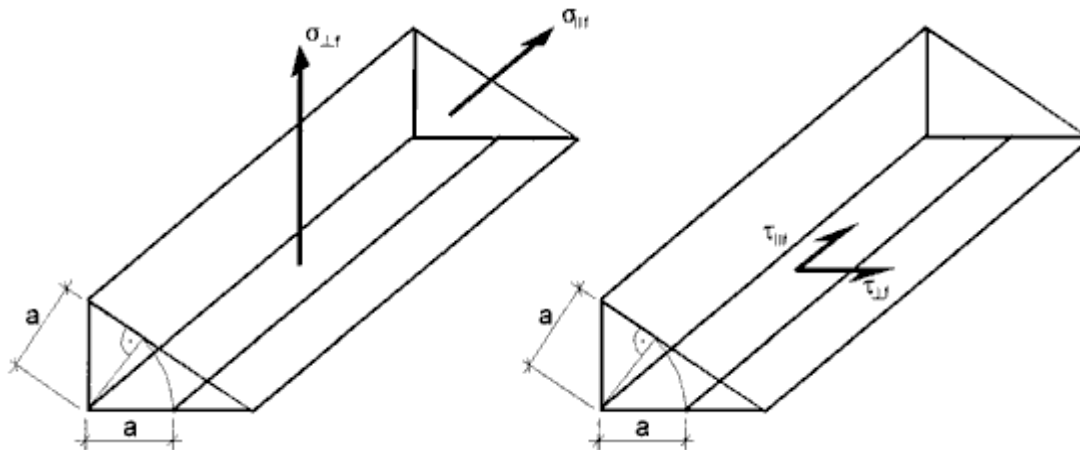
$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2} ;$$

- касательные напряжения τ_{wf} вдоль оси сварного шва:

$$\tau_{wf} = \tau_{\parallel f} ,$$

для которых должны производиться две отдельные проверки.

5.10 (5(6) ПРИМЕЧАНИЕ) Описанные выше расчеты в Пункте 5.9 настоящего пособия отличаются от расчетов, которые применяются для предельного состояния углового сварного шва по потере несущей способности, приведенного в СН РК EN 1993-1-8.



Напряжения σ_f

Напряжения τ_f

Рисунок 5.1 - Напряжения, действующие в угловых сварных швах

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМАХОВ НАПРЯЖЕНИЙ ЦИКЛА

6.1 Общие положения

6.1.1 (6.1(1)) Оценка усталости должна выполняться с использованием:

а) номинальных размахов напряжений циклов для деталей, приведенных в Таблицах 8.1 – 8.10 СН РК EN 1993-1-9;

б) измененных номинальных размахов напряжений циклов для случая резкого изменения сечения вблизи места повреждения, которые не включены в Таблицы 8.1 – 8.10 СН РК EN 1993-1-9;

в) локальных размахов напряжений циклов, когда значительные градиенты напряжения возникают в околошовных зонах сварного шва в соединениях, приведенных в Таблице В.1 настоящего пособия.

6.1.2 (6.1(1) ПРИМЕЧАНИЕ) Национальное Приложение может предоставлять информацию по использованию номинальных размахов напряжений циклов, измененных номинальных размахов напряжений циклов или локальных размахов напряжений циклов. Однако, согласно Пункту НП.2.7 Национального Приложения к СН РК EN 1993-1-9: «Дополнительная информация не приводится».

6.1.3 (6.1(1) ПРИМЕЧАНИЕ) Категории элементов для локальных размахов напряжений циклов см. в Приложении В настоящего пособия.

6.1.4 (6.1(2)) Расчетное значение размаха напряжений цикла в усталостных расчетах принимается равным $\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}$ на базе $N_C = 2 \times 10^6$ циклов.

6.2 Расчетное значение номинального размаха напряжений цикла

6.2.1 Общие указания

6.2.1.1 (6.2(1)) Для расчета усталости должно использоваться расчетное значение размаха напряжений цикла $\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}$ и $\gamma_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}$:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E2} &= \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma \cdot (\gamma_{Ff}Q_k) \\ \gamma_{Ff}\Delta\tau_{E2} &= \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\tau \cdot (\gamma_{Ff}Q_k)\end{aligned}\quad (6.1)$$

где $\Delta\sigma \cdot (\gamma_{Ff}Q_k)$, $\Delta\tau \cdot (\gamma_{Ff}Q_k)$ - размах напряжений цикла, вызванный усталостными нагрузками, указанными в СН РК EN 1991;

λ_i - эквивалентные коэффициенты повреждения, зависящие от спектров, как указано в Разделах 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5, 6.2.6, 6.2.7;

γ_{Ff} - частный коэффициент безопасности для эквивалентных размахов напряжений циклов постоянной амплитуды $\Delta\sigma_E$, $\Delta\tau_E$, определяемый по СН РК EN 1990.

6.2.1.2 (6.2(2)) При отсутствии соответствующих значений λ_i проектное значение номинального размаха напряжения может быть определено в соответствии с требованиями, приведенными в Приложении А настоящего пособия.

6.2.1.3 (6.2(2) ПРИМЕЧАНИЕ) Национальное Приложение может предоставлять информацию, дополняющую Приложение А. Согласно Пункту НП.2.8 Национального Приложения к СН РК EN 1993-1-9: «Информация, дополняющая Приложение А не приводится».

6.2.2 Коэффициент эквивалентности негативного воздействия λ для автодорожных мостов

6.2.2.1 Коэффициент эквивалентности негативного воздействия λ для автодорожных мостов с пролетом до 80 м можно определить по Формуле (9.9) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4, \text{ но } \lambda \leq \lambda_{\max},$$

где λ_1 - коэффициент негативного воздействия транспорта, который зависит от длины линии влияния;

λ_2 - коэффициент интенсивности движения транспорта;

λ_3 - коэффициент расчетного срока службы моста;

λ_4 - коэффициент движения транспорта по другим полосам;

λ_{\max} - максимальное значение λ с учетом предела усталости.

6.2.2.2 При определении λ_1 длина линии или области влияния может быть принята

а) для моментов:

— разрезные пролеты — длина пролета L_i ;

— неразрезное пролетное строение в опорном сечении, см. Рисунок 6.3, — длина рассматриваемого пролета L_i ;

— неразрезное пролетное строение в опорном сечении, см. Рисунок 6.3, — среднее значение длин двух пролетов L_i и L_j , прилегающих к опоре;

— продольные балки, поддерживающие поперечные балки, — сумма длин двух смежных пролетов ребер жесткости поперечной балки.

б) для поперечной силы неразрезного пролетного строения:

— опорное сечение, см. Рисунок 6.3, — длина рассматриваемого пролета L_i ;

— сечение в середине пролета, см. Рисунок 6.3, — 0,4 длины рассматриваемого пролета L_i .

в) для реакций:

— крайние опоры — длина рассматриваемого пролета L_i ;

— промежуточные опоры — сумма длин двух смежных пролетов $L_i + L_j$.

г) для арочных мостов:

— подвески — две длины подвески;

— арки — половина пролета арки.

6.2.2.3 В Национальном Приложении могут быть приведены соответствующие значения λ_1 . Рекомендуется применять коэффициенты λ_1 , приведенные на Рисунке 6.1. Согласно Пункту НП.2.39 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Рекомендуется использовать графики, приведенные на Рисунке 6.1».

6.2.2.4 Коэффициент λ_2 рассчитывается по Формуле (9.10) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/5},$$

где Q_{m1} - средний вес брутто (в килоньютонах), транспортных средств, движущихся по крайней правой полосе, определенный следующим образом:

$$Q_{m1} = \left(\frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i} \right)^{1/5};$$

$$Q_0 = 480 \text{ кН};$$

$$N_0 = 0,5 \times 10^6;$$

где N_{obs} - общее количество грузовых автомобилей в год, крайняя правая полоса, см.
Пункт 9.2.2(2) СН РК EN 1993-2;

Q_i - вес брутто (кН) транспортных средств i , движущихся по крайней правой полосе, по данным эксплуатирующих организаций;

n_i - количество грузовых автомобилей весом брутто Q_i , крайняя правая полоса, по данным эксплуатирующих организаций.

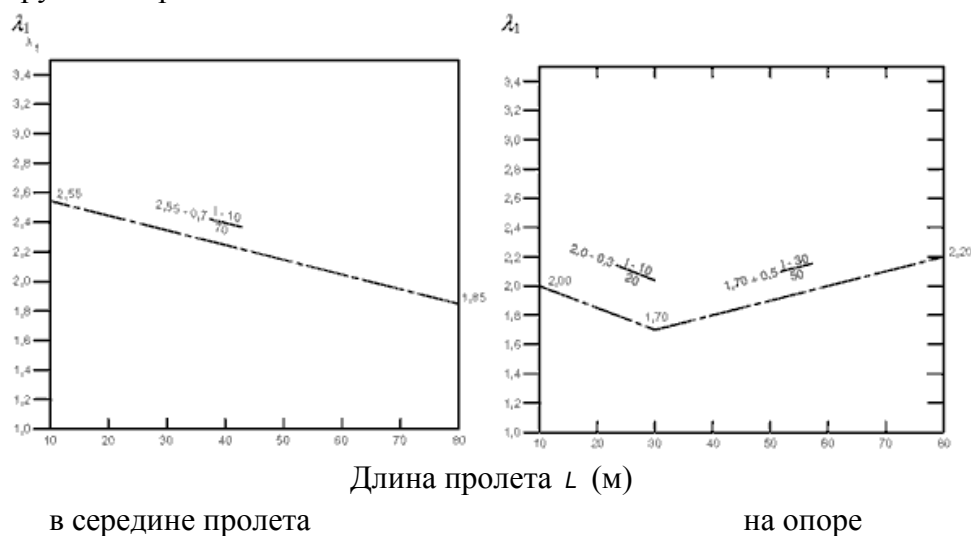


Рисунок 6.1 - Коэффициент λ_1 для моментов автодорожных мостов

6.2.2.5 В Национальном Приложении могут быть приведены инструкции по определению λ_2 . Согласно Пункту НП.2.40 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Дополнительные рекомендации не приводятся».

6.2.2.6 Заданные значения Q_{m1} , N_{obs} и λ_2 приведены в Таблице 6.1 настоящего пособия.

Таблица 6.1 - Коэффициент интенсивности движения транспорта λ_2

Q _{m1}	N _{obs}							
	0,25×10 ⁶	0,50×10 ⁶	0,75×10 ⁶	1,0×10 ⁶	1,25×10 ⁶	1,5×10 ⁶	1,75×10 ⁶	2,0×10 ⁶
200	0,362	0,417	0,452	0,479	0,500	0,519	0,535	0,550
300	0,544	0,625	0,678	0,712	0,751	0,779	0,803	0,825
400	0,725	0,83	0,904	0,957	1,001	1,038	1,071	1,100
500	0,907	1,042	1,130	1,197	1,251	1,298	1,338	1,374
600	1,088	1,250	1,356	1,436	1,501	1,557	1,606	1,649

6.2.2.7 Коэффициент λ_3 рассчитывается по Формуле (9.11) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5},$$

где t_{Ld} - расчетный срок эксплуатации моста в годах.

Таблица 6.2 - Коэффициент расчетного срока службы моста λ_3

Расчетный срок службы в годах	50	60	70	80	90	100	120
Коэффициент λ_3	0,871	0,903	0,931	0,956	0,979	1,00	1,037

6.2.2.8 Расчетный срок службы в годах t_{Ld} может быть определен в Национальном Приложении. Рекомендуется $t_{Ld} = 100$ лет. Согласно Пункту НП.2.41 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Принять рекомендованный расчетный срок службы в годах $t_{Ld} = 100$ лет».

6.2.2.9 Коэффициент λ_4 рассчитывается по Формуле (9.12) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \frac{N_3}{N_1} \cdot \left(\frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \cdot \left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{1/5},$$

где k — количество полос с интенсивным движением;

N_j - количество грузовых автомобилей в год, полоса j ;

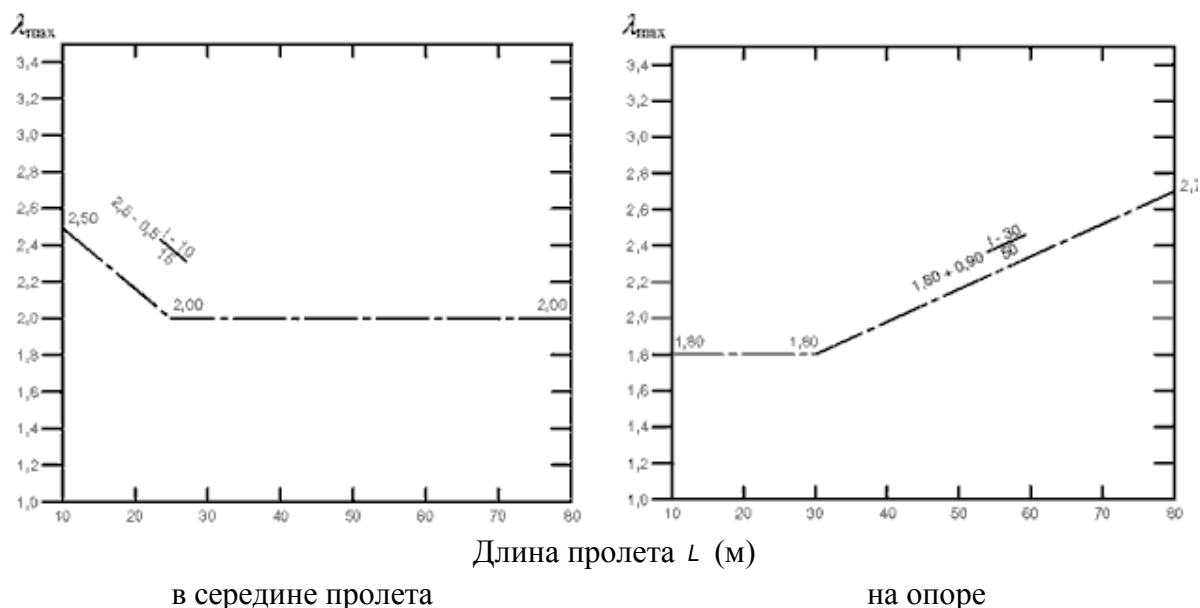
Q_{mj} - средний вес брутто транспортных средств, движущихся по полосе j ;

η_j - значение линии влияния внутренних сил, вызывающих максимальные напряжения в середине полосы j , добавляемое в Формулу (9.12) СН РК EN 1993-2 со знаком «+».

6.2.2.10 В Национальном Приложении могут быть приведены инструкции по λ_4 . Согласно Пункту НП.2.42 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Дополнительные рекомендации не приводятся».

6.2.2.11 Коэффициент λ_{\max} определяется на основе соответствующего спектра усталостного напряжения.

6.2.2.12 В Национальном Приложении могут быть приведены инструкции по определению λ_{\max} . Рекомендуется использование коэффициента λ_{\max} , приведенного на Рисунке 6.2 настоящего пособия. Согласно Пункту НП.2.43 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Рекомендуется использовать графики, приведенные на Рисунке 6.2».

Рисунок 6.2 — λ_{\max} для моментов автодорожных мостов

6.2.3 Коэффициент эквивалентности негативного воздействия λ для железнодорожных мостов

6.2.3.1 Коэффициент эквивалентности негативного воздействия λ для железнодорожных мостов с пролетом до 100 м можно определить по Формуле (9.13) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4, \text{ но } \lambda \leq \lambda_{\max},$$

где λ_1 - коэффициент негативного воздействия транспорта, зависит от длины критической линии;

λ_2 - коэффициент интенсивности движения транспорта;

λ_3 - коэффициент расчетного срока службы моста;

λ_4 - коэффициент для конструктивного элемента, если нагрузка более одного рельсового полотна;

λ_{\max} - максимальное значение λ с учетом предела усталости

6.2.3.2 Значения коэффициента - см. в Таблицах 6.3 и 6.4 настоящего пособия.

6.2.3.3 В Национальном Приложении могут быть приведены дополнительные указания по использованию Таблиц 6.3 и 6.4. Согласно Пункту НП.2.44 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Рекомендуется использовать данные Таблицы 9.3 и 9.4».

6.2.3.4 Значения, приведенные в Таблицах 6.3 и 6.4 для смешанных перевозок, соответствуют сочетанию типов поездов, приведенному в Приложении F СН РК EN 1991-2.

6.2.3.5 Для путей с иной комбинацией типов поездов, чем рассматривается (например, специализированные линии), в Национальном Приложении могут быть определены значения λ_1 . Согласно Пункту НП.2.44 Национального Приложения к СН РК EN 1993-2: «Для особых случаев принимать индивидуально по конкретному проекту».

Таблица 6.3 - Коэффициент λ_1 для стандартных железнодорожных перевозок

L	ЕСсмеш	L	ЕСсмеш	L	ЕСсмеш	L	ЕСсмеш	L	ЕСсмеш
0,5	1,60	3,5	1,17	8,0	0,92	20,0	0,67	50,0	0,63
1,0	1,60	4,0	1,07	9,0	0,88	25,0	0,6	60,0	0,63
1,5	1,6	4,5	1,02	10,0	0,85	30,0	0,65	70,0	0,62
2,0	1,46	5,0	1,03	12,5	,82	35,0	0,64	80,0	0,61
2,5	1,38	6,0	1,03	15,0	0,76	40,0	0,64	90,0	0,61
3,0	1,35	7,0	0,97	17,5	0,70	45,0	0,64	100	0,60

Таблица 6.4 - Коэффициент λ_1 для экспресс-перевозок и поездов метро, а также перевозок с нагрузкой на ось 25 тонн

L	Экспресс перевозки и поезда метро		Железнодорожные перевозки с нагрузкой на ось 25 тонн
	Тип 9	Тип 10	25 т. смешанные
0,5	0,97	1,00	1,65
1,0	0,97	1,00	1,65
1,5	0,97	1,00	1,65
2,0	0,97	0,99	1,64
2,5	0,95	0,97	1,55
3,0	0,85	0,94	1,51
3,5	0,76	0,85	1,31
4,0	0,65	0,71	1,16
4,5	0,59	0,65	1,08
5,0	0,55	0,62	1,07
6,0	0,58	0,63	1,04
7,0	0,58	0,60	1,02
8,0	0,56	0,60	0,99
9,0	0,56	0,55	0,96
10,0	0,56	0,51	0,93
12,5	0,55	0,47	0,90
15,0	0,50	0,44	0,92

Таблица 6.4 - Коэффициент λ_1 для экспресс-перевозок и поездов метро, а также перевозок с нагрузкой на ось 25 тонн
(продолжение)

L	Экспресс перевозки и поезда метро		Железнодорожные перевозки с нагрузкой на ось 25 тонн
	Тип 9	Тип 10	25 т. смешанные
17,5	0,46	0,44	0,73
20,0	0,44	0,43	0,68
25,0	0,40	0,41	0,65
30,0	0,37	0,42	0,64
35,0	0,36	0,44	0,65
40,0	0,35	0,46	0,65
45,0	0,35	0,47	0,65
50,0	0,36	0,48	0,66
60,0	0,39	0,48	0,66
70,0	0,40	0,49	0,66
80,0	0,39	0,49	0,66
90,0	0,39	0,48	0,66
100,0	0,40	0,48	0,66

6.2.3.6 При определении λ_1 критическая длина линии влияния принимается:

- а) для моментов:
 - разрезные пролетные строения — длина пролета L_i ;
 - неразрезное пролетное строение в сечении в середине пролета (см. Рисунок 6.3 настоящего пособия) — длина рассматриваемого пролета L_i ;
 - неразрезное пролетное строение в опорном сечении (см. Рисунок 6.3 настоящего пособия) — среднее значение длин двух пролетов L_i и L_j , прилегающих к опоре;
 - поперечные балки, поддерживающие продольные рельсовые балки, — сумма длин двух смежных пролетов продольных рельсовых балок, прилегающих непосредственно к поперечной балке;
 - плиты настила, поддерживаемые только поперечными балками или поперечными ребрами жесткости (без продольных элементов), а также поддерживающие поперечные элементы, — длина линии влияния деформации (учитывая части одного знака) с учетом жесткости рельсов при распределении нагрузки.
 - поперечные элементы, расположенные на расстоянии не более 750 мм, — может быть принята, как двукратное расстояние между поперечными элементами плюс 3 м.

б) для поперечной силы неразрезного пролетного строения:

— опорное сечение (см. Рисунок 6.3 настоящего пособия) — длина рассматриваемого пролета L_i ;

— сечение в середине пролета (см. Рисунок 6.3 настоящего пособия) — 0,4 длины рассматриваемого пролета L_i .

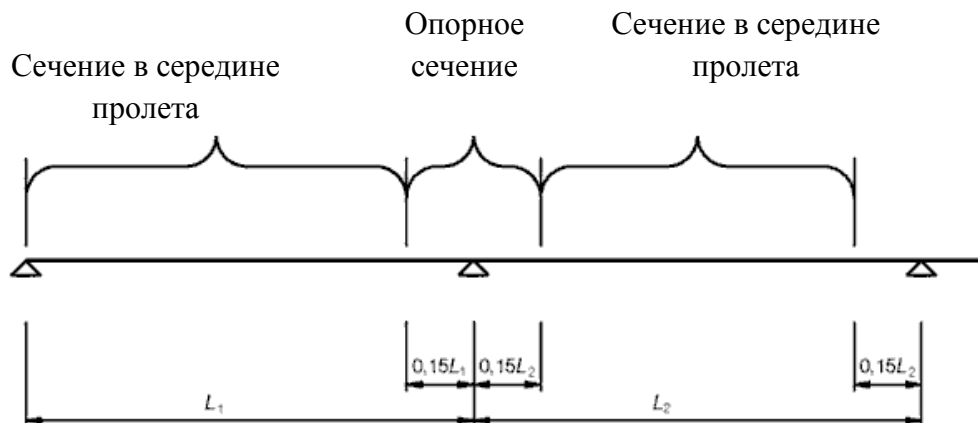


Рисунок 6.3 - Расположение сечений в середине пролета и опорного сечения

6.2.3.7 Значение коэффициента λ_2 - см. в Таблице 6.5 Настоящего пособия.

Таблица 6.5 - Коэффициент λ_2

Интенсивность движения (в год) 10^6 тонн на рельсовое полотно	5	10	15	20	25	30	35	40	50
Коэффициент λ_2	0,72	0,83	0,90	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,15

6.2.3.8 Значение коэффициента λ_3 - см. в Таблице 6.6 Настоящего пособия.

Таблица 6.6 - Коэффициент λ_3

Расчетный срок службы в годах	50	60	70	80	90	100	120
Коэффициент λ_3	0,87	0,90	0,93	0,96	0,98	1,00	1,04

6.2.3.9 Значение коэффициента λ_3 - см. в Таблице 6.7 Настоящего пособия.

Таблица 6.7 - Коэффициент λ_4

$\Delta\sigma_1 / \Delta\sigma_{1+2}$	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
λ_4	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71
$\Delta\sigma_1$ — амплитуда напряжений в сечении, подлежащем проверке в соответствии с моделью 71 (одно рельсовое полотно); $\Delta\sigma_{1+2}$ — амплитуда напряжений в том же сечении в соответствии с моделью 71 согласно СН РК EN 1991-2 (два любых рельсовых полотна).						

6.2.3.10 Значения в Таблице 6.7 настоящего пособия действительны, если $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_{1+2}$ имеют одинаковый знак.

6.2.3.11 Значения коэффициента λ_4 в Таблице 6.7 настоящего пособия приведены в предположении, что 12 % от общего движения по мосту осуществляется при наличии движения и по другому пути. Если процент такого движения иной, λ_4 рассчитывается по Формуле (9.14) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda_4 = \sqrt[5]{n + [1-n] \left[a^5 + (1-a)^5 \right]},$$

где $a = \Delta\sigma_1 / \Delta\sigma_{1+2}$;

n - процент движения.

6.2.3.12 Значение λ не должно превышать значения λ_{\max} , приведенного в Формуле (9.15) СН РК EN 1993-2:

$$\lambda_{\max} = 1,4.$$

6.2.4 Оценка безопасности

6.2.4.1 Оценка безопасности усталости должна быть произведена согласно Формуле (9.1) СН РК EN 1993-3-2:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \Delta\sigma_E$$

где λ — коэффициент эквивалентности для перевода $\Delta\sigma_E$ на $N_c = 2 \times 10^6$ циклов;
 $\Delta\sigma_E$ — диапазон напряжений, связанный с N циклов, с учетом коэффициента концентрации напряжений, где необходимо.

6.2.4.2 Коэффициент эквивалентности λ можно определить по Формуле (9.2) СН РК EN 1993-3-2:

$$\lambda = \left(\frac{N}{2 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{m}}$$

где m — наклон кривой S-N.

6.2.5 Упрощенный подход

6.2.5.1 Для упрощенной усталостной воздействия, специфицированной в 6.2.7.1 п.1, может использоваться следующая процедура для определения диапазона расчетных напряжений.

ПРИМЕЧАНИЕ Упрощенная усталостная нагрузка $Q_e = \varphi_{fat} \lambda Q_{\max,i}$ из СН РК EN 1991-3 уже связана с 2×10^6 циклами.

6.2.5.2 Максимальные напряжения $\sigma_{p,\max}$ и $\tau_{p,\max}$ и минимальные напряжения $\sigma_{p,\min}$ и $\tau_{p,\min}$, связанные с упрощенной усталостной нагрузкой Q_e , должны определяться для соответствующих элементов.

6.2.5.3 Диапазон эквивалентных повреждению напряжений $\Delta\delta_{E2}$ и $\Delta\tau_{E2}$, связанный с 2×10^6 циклами, может быть получен по Формуле (9.1) и (9.2) СН РК EN 1993-6:

$$\Delta\sigma_z = |Q_{\max} - Q_{\min}|,$$

$$\Delta\sigma_z = |T_{\max} - T_{\min}|.$$

4. Если число циклов напряжений выше, чем количество рабочих циклов крана, см. Рисунок 6.4, то эквивалентная нагрузка Q_e , согласно 2.12.1п.4 в СН РК EN 1991-3, должна быть определена с помощью этого более высокого числа как общее число рабочих циклов S в Таблице 2.11 в EN 1991-3.

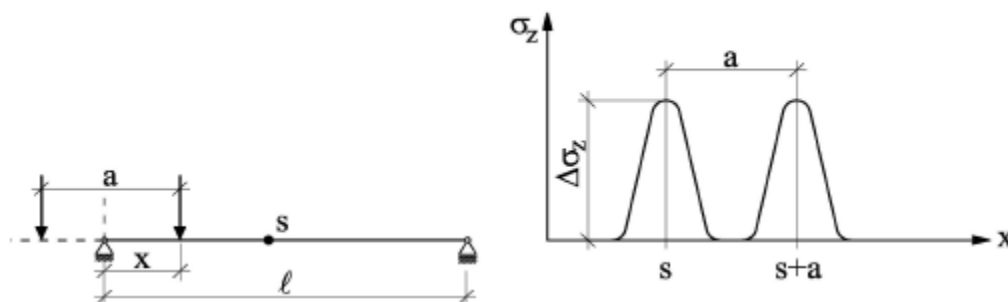


Рисунок 6.4 — Пример двух циклов напряжений, связанных с одним рабочим циклом крана

6.2.6 Воздействия от нескольких кранов

1. При отсутствии более оптимальной информации, амплитуда эквивалентной постоянной диапозона напряжений $\Delta\sigma_{E2}$ для двух или более кранов, иногда действующих совместно, может быть получена путем применения коэффициентов эквивалентности повреждений λ_{dur} .

ПРИМЕЧАНИЕ Национальное Приложение может специфицировать значения коэффициентов λ_{dur} . Рекомендуется принять значения λ_{dur} равным значениям λ_i из Таблицы 2.12 в СН РК EN 1991-3 для воздействия класса S_i следующим образом:

- а) для 2 кранов: на 2 класса ниже класса воздействия крана с более низким классом воздействия;
- б) для 3 и более кранов: на 3 классах ниже класса воздействия крана с самым низким классом воздействия.

6.2.7 Усталостные нагрузки

6.2.7.1 Воздействия, вызванные одиночным краном

6.2.7.1.1 Усталостную нагрузку можно определить из СН РК EN 1991-3:

$$Q_e = \varphi_{fat} \lambda_i Q_{\max,i}$$

где $Q_{\max,i}$ - максимальное характеристическое значение вертикальной нагрузки на колесо i ;

$\lambda_i = \lambda_{1,i} \lambda_{2,i}$ - коэффициент эквивалентного разрушения для введения поправки на соответствующий стандартизированный спектр усталостного нагружения и абсолютное количество циклов нагружения относительно $N = 2,0 \cdot 10^6$ циклов.

$$\lambda_{1,i} = \sqrt[m]{kQ} = \left[\sum_j \left(\left(\frac{\Delta Q_{i,j}}{\max \Delta Q_i} \right)^m \frac{n_{i,j}}{\sum n_{i,j}} \right) \right]^{1/m}$$

$$\lambda_{2,i} = \sqrt[m]{n v} = \left[\frac{\sum_j n_{i,j}}{N} \right]^{1/m}$$

где $\Delta Q_{i,j}$ — амплитуда нагрузки в диапазоне j на колесо i :

$$\Delta Q_{i,j} = Q_{i,j} - Q_{\min,i};$$

$\max \Delta Q_i$ — максимальная амплитуда нагрузки на колесо i :

$$\max \Delta Q_i = Q_{\max,i} - Q_{\min,i};$$

kQ, v — коэффициенты эквивалентного разрушения;

m — наклон кривой усталостной прочности;

φ_{fat} — коэффициенты эквивалентного разрушения при динамической нагрузке;

i — количество колес

$N = 2 \cdot 10^6$ циклов.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Значение параметра m - см. Примечания к Таблице 6.8 настоящего пособия.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Чтобы рассчитать значение λ , использование кранов можно классифицировать в соответствии со спектром нагружения и общим количеством циклов нагружения, как показано в Таблице 2.11 СН РК EN 1991-3.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Значения λ можно заимствовать из Таблицы 6.8 с учетом классификации крана.

Таблица 6.8 — Значения λ_i в соответствии с классификацией кранов

Классы S	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Нормальные напряжения	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,79	1 00	1,2 0	1,587
Сдвиговые напряжения	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,00	1,149	1,320
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1 При расчете значений λ использовались нормализованные спектры нагружения с гауссовым распределением эффектов нагружения, законом накопления повреждений Майнера и строки S-N усталостной прочности с наклоном $m = 3$ для нормальных напряжений и $m = 5$ для сдвиговых напряжений.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2 Если классификация крана не включена в детализированную спецификацию, указания по применению крана можно найти в Приложении В.</p>										

ПРИМЕР 1 Расчет усталостной прочности болтового стыка прокатной неразрезной балки.

Исходные данные: дана 3-х пролетная неразрезная балка (Б-1) с равными пролетами по $l = 6,0\text{м}$ (см. Рисунок 1). Вдоль балки движется грузовая тележка. Расстояние между осями колесных пар тележки - 1,2 м. Максимальное расчетное значение вертикальной нагрузки на колесо тележки с учетом частного коэффициента безопасности ($\gamma_{\text{НГ}}$) составляет $P = \gamma_{\text{НГ}} \cdot Q_{\text{max}} = 30\text{кН}$. Поперечное сечение балки Б-1 представляет собой прокатный двутавр № 35Б1 по ГОСТ 26020-83, с моментом инерции поперечного сечения $I_b = 10060\text{см}^4$. Материал балки – сталь S275.

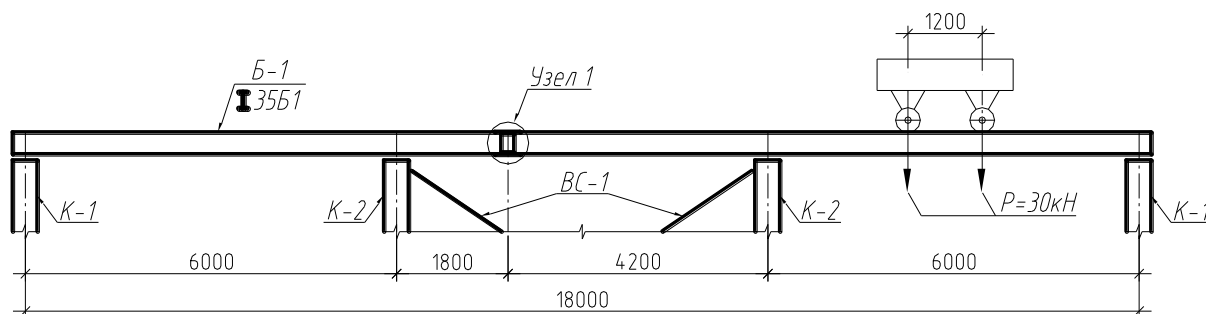


Рисунок 1 — Конструктивная схема балки Б-1

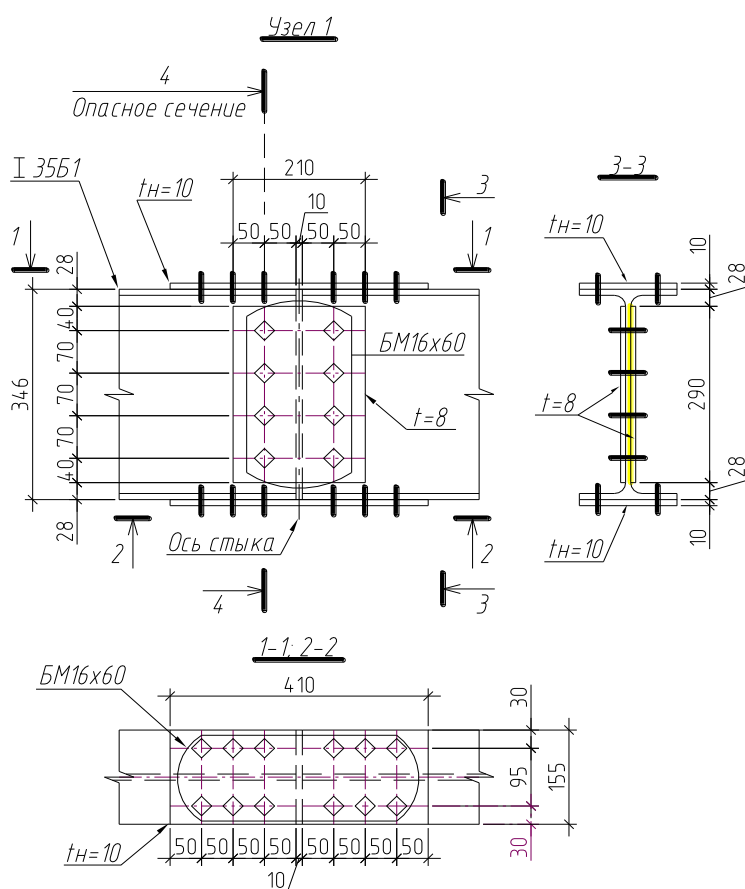


Рисунок 2 — Узел 1. Конструкция стыка балки Б-1

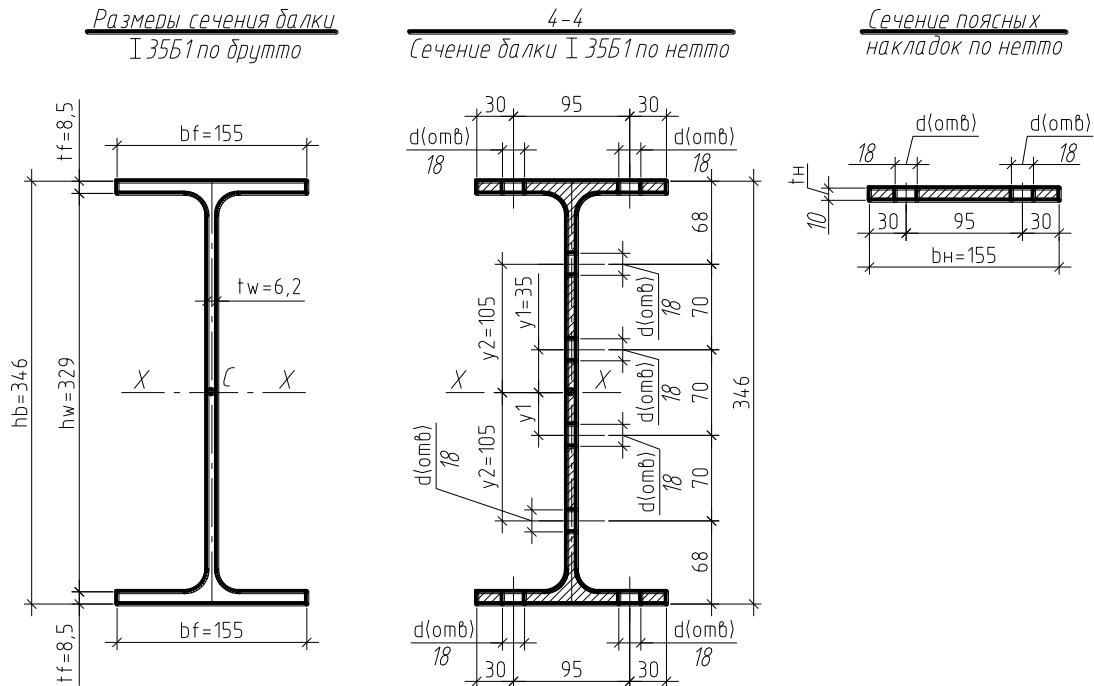


Рисунок 3 — Размеры поперечных сечений балки и поясных накладок

Для соединения двух отправочных марок балки на расстоянии 1,8 м от 2-й опоры предусмотрен монтажный стык на болтах М16 нормальной точности без предварительного натяжения (см. Рисунок 2). Отверстия под болты предусмотрены диаметром 18 мм. Поперечное сечение ослабленной и неослабленной отверстиями балки приведено на Рисунке 3.

В процессе эксплуатации балки регулярные обследования на предмет усталостных повреждений – производиться не будут.

Задача 1. На конструкцию воздействуют циклы нагружений с постоянной амплитудой.

При постоянной амплитуде нагружения требуется:

- проверить усталостную прочность балки в зоне стыка по нормальным напряжениям при долговечности $2 \cdot 10^6$ циклов;
- определить расчетную долговечность стыка балки по нормальным напряжениям.

Алгоритм расчета:

1. В соответствии с Таблицей 8.2 СН РК EN 1993-1-9 определяется категория элемента для расчета на выносливость. В данном примере монтажный стык относится к категории № 50, а усталостная трещина может развиваться как в самой балке, так и в стыковой поясной накладке.

2. Определяются максимальные и минимальные внутренние усилия цикла для расчетного сечения.

Поскольку нагрузка является подвижной, и рассматриваются нормальные напряжения цикла - по линии влияния изгибающего момента «М» для расчетного сечения (ось стыка) определяются максимальный и минимальный изгибающие моменты – (см. Рисунок 4 и 5):

— максимальный изгибающий момент (когда колесо тележки расположено над расчетным сечением) равен:

$$M_{\max} = \gamma_{Ff} \cdot Q_{\max} \cdot \sum_{i=1}^n y_i = P \cdot (Y_1 + Y_2) = 30 \cdot (0,8484 + 0,45) = 38,95 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

— минимальный изгибающий момент (когда тележка расположена в 1-м пролете) равен:

$$M_{\min} = P \cdot (Y_3 + Y_4) = 30 \cdot (-0,375 - 0,357) = -21,96 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $\sum_{i=1}^n Y_i = (Y_1 + Y_2)$; $\sum_{i=1}^n Y_i = (Y_3 + Y_4)$ - сумма ординат соответствующей линии влияния

под сосредоточенными силами— см. Рисунок 4 и Рисунок 5.

Изгибающий момент в расчетном сечении от собственного веса балки равен нулю, так как монтажный стык выполнен в зоне нулевых моментов от равномерно распределенных нагрузок.

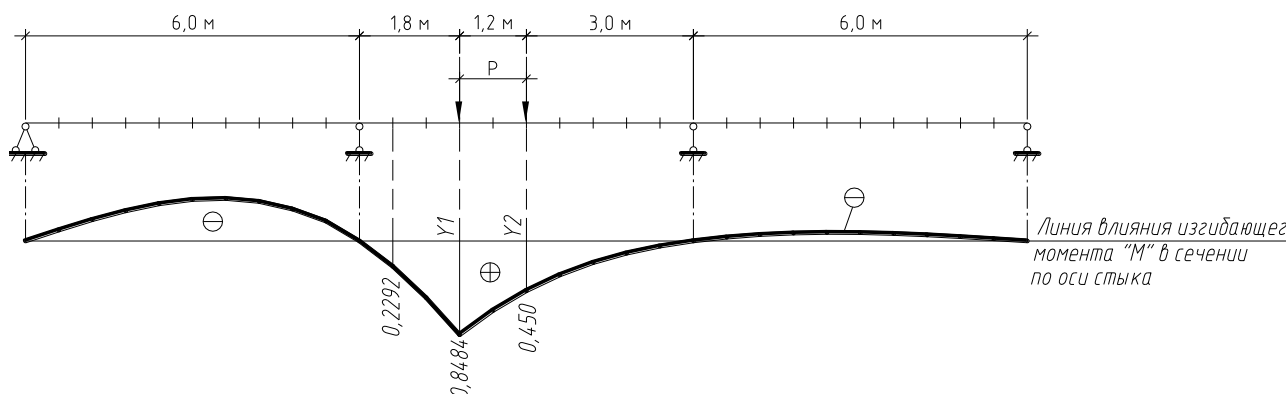


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения максимального изгибающего момента цикла M_{\max} в расчетном сечении

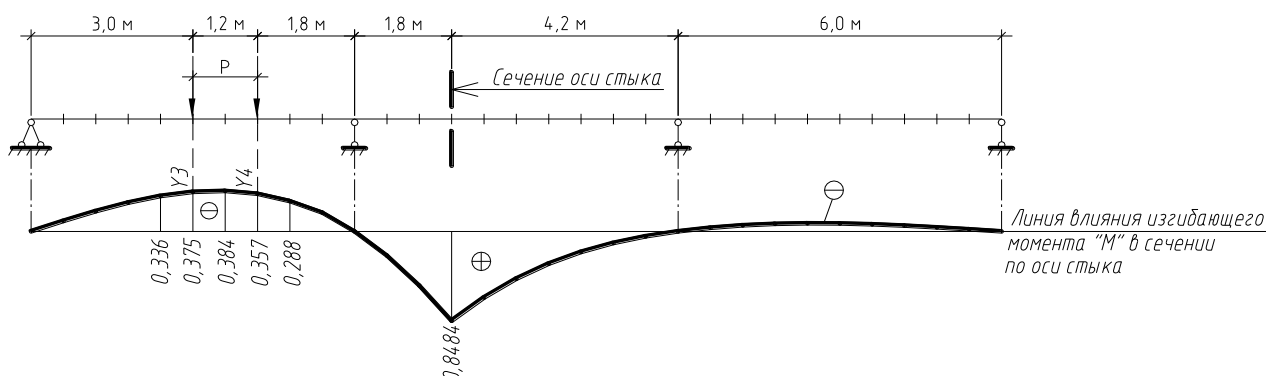


Рисунок 5 — Расчетная схема для определения минимального изгибающего момента цикла M_{\min} в расчетном сечении

3. Определяются геометрические характеристики поперечного сечения балки и поясной накладки.

Так как по Таблице 8.2 категория стыка №50 предусматривает расчет размаха напряжений цикла по сечению нетто, то необходимо определить следующие геометрические характеристики (см. Рисунок 3):

— площадь ослабленного двумя отверстиями Ø 18 мм поперечного сечения поясной накладки:

$$A_n^{\text{netto}} = b_n \cdot t_n - 2 \cdot d_{\text{отв}} \cdot t_n = 15,5 \cdot 1,0 - 2 \cdot 1,0 \cdot 1,8 = 11,9 \text{ см}^2,$$

где $b_n = 15,5$ см – ширина поясной накладки;

$t_n = 1,0$ см – толщина накладки;

$d_{отв} = 1,8$ см – диаметр отверстий под болты М16;

— момент инерции ослабленного восемью отверстиями $\varnothing 18$ мм поперечного сечения балки:

$$I_b^{netto} = I_b - 4 \cdot d_{отв} \cdot t_f \cdot (0,5 \cdot h_b - 0,5 \cdot t_f)^2 - 2 \cdot d_{отв} \cdot t_w \cdot (y_1^2 + y_2^2) =$$

$$= 10060 - 4 \cdot 1,8 \cdot 0,85 \cdot (0,5 \cdot 34,6 - 0,5 \cdot 0,85)^2 - 2 \cdot 1,8 \cdot 0,62 \cdot (3,5^2 + 10,5^2) = 8044 \text{ см}^4$$

где $I_b = 10060 \text{ см}^4$ – момент инерции неослабленного сечения балки;

$t_f = 0,85$ см – толщина пояса балки;

$h_b = 34,6$ см – высота сечения балки;

$t_w = 0,62$ см – толщина стенки балки;

$y_1 = 3,5$ см и $y_2 = 10,5$ см – расстояния от центров отверстий в стенке балки до центра тяжести сечения балки «С»;

— момент сопротивления крайних волокон ослабленного сечения балки:

$$W_b^{netto} = \frac{2 \cdot I_b^{netto}}{h_b} = \frac{2 \cdot 8044}{34,6} = 465 \text{ см}^3.$$

4. Определяются максимальные и минимальные напряжения цикла в ослабленном сечении балки и поясной накладки при постоянной амплитуде:

— максимальные краевые напряжения в балке:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_b^{netto}} = \frac{38,95 \cdot 10^3}{465} = 83,8 \text{ МПа (растяжение);}$$

— минимальные краевые напряжения в балке:

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\min}}{W_b^{netto}} = \frac{-21,96 \cdot 10^3}{465} = -47,2 \text{ МПа (сжатие);}$$

— максимальные напряжения в накладке:

$$\sigma_{\max}^H = \frac{N_{\max}^H}{A_{\text{netto}}^H} = \frac{91,98 \cdot 10}{11,9} = 77,3 \text{ МПа (растяжение);}$$

— минимальные напряжения в накладке:

$$\sigma_{\min}^H = \frac{N_{\min}^H}{A_{\text{netto}}^H} = \frac{-51,86 \cdot 10}{11,9} = -43,6 \text{ МПа (сжатие),}$$

где $N_{\max}^H = \frac{M_{\max} \cdot I_f}{I_b \cdot h_b} = \frac{38,95 \cdot 8220}{10060 \cdot 0,346} = 91,98 \text{ кН}$ – максимальная продольная сила в

накладке от максимального изгибающего момента M_{\max} ;

$$N_{\min}^H = \frac{M_{\min} \cdot I_f}{I_b \cdot h_b} = \frac{-21,96 \cdot 8220}{10060 \cdot 0,346} = -51,86 \text{ кН}$$
 – минимальная продольная сила в накладке

от минимального изгибающего момента M_{\min} ;

$$I_f = I_b - I_w = I_b - \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} = 10060 - \frac{0,62 \cdot 32,9^3}{12} = 8220 \text{ см}^4$$
 – момент инерции поясов

для неослабленного сечения балки;

$h_w = 32,9$ см – высота стенки балки;

$t_w = 0,62$ см – толщина стенки балки.

5. В соответствии с (6.1) 6.2 п.1 определяется расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла в сечении нетто балки:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \lambda \cdot \Delta\sigma_b(P) = 1,0 \cdot 131 = 131 \text{ МПа},$$

где $\lambda = 1,0$ – эквивалентный коэффициент повреждения при постоянной амплитуде цикла нагружения;

$\Delta\sigma_b = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 83,8 - (-47,2) = 131,0 \text{ МПа}$ – размах нормальных напряжений цикла в ослабленном поперечном сечении балки.

6. Аналогично п. 5 настоящего примера определяется расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла в сечении нетто поясной накладки:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \lambda \cdot \Delta\sigma_n(P) = 1,0 \cdot 120,9 = 120,9 \text{ МПа},$$

где $\Delta\sigma_n = \sigma_{\max}^H - \sigma_{\min}^H = 77,3 - (-43,6) = 120,9 \text{ МПа}$ – размах нормальных напряжений цикла в ослабленном поперечном сечении накладки.

Как видно из расчета по п.5 и п.6, наибольшее расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла возникает в ослабленном сечении балки:

$$\Delta\sigma_b = 131,0 \text{ МПа} > \Delta\sigma_n = 120,9 \text{ МПа},$$

следовательно, дальнейшие расчеты необходимо производить по сечению нетто балки.

7. Производится проверка усталостной прочности балки в зоне стыка по нормальным напряжениям в соответствии с Разделом 8:

— проверяется условие (8.1) 8 п.1: $\Delta\sigma_b = 131,0 \text{ МПа} < 1,5 \cdot f_y = 1,5 \cdot 275 = 412,5 \text{ МПа}$, – условие выполняется.

где $f_y = 275 \text{ МПа}$ – номинальное значение предела текучести стали S275 при температуре эксплуатации $t \leq 40^\circ \text{C}$, определяемое по Таблице 3.1. EN 1993-1-1;

— проверяется условие (8.2) п. 8 (1):

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{131}{50/1,15} = 3,01 > 1,0, \text{ – условие не выполняется.}$$

где $\Delta\sigma_c = 50 \text{ МПа}$ – допускаемое значение предела выносливости при долговечности $N_c = 2 \cdot 10^6$ циклов, равное категории элемента по Таблице 8.1;

$\gamma_{Mf} = 1,15$ – частный коэффициент безопасности для предела выносливости $\Delta\sigma_c$ при безопасном ресурсе и малых последствий от разрушения балки Б-1. Коэффициент γ_{Mf} определен в соответствии с Таблицей 3.1 EN 1993-1-9.

Таким образом, усталостная прочность балки по нормальным напряжениям в зоне стыка – не обеспечена. Стык не сможет выдержать 2 млн. циклов перемен нагрузок при постоянной амплитуде нагружения.

8. По кривой усталости на Рисунке 7.1 EN 1993-1-9, для расчетного значения размаха нормальных напряжений цикла в сечении нетто балки, с учетом частного коэффициента безопасности для предела выносливости $\gamma_{Mf} = 1,15$ – определяется расчетная долговечность стыка:

— расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = 131,0 \cdot 1,15 = 150,6 \text{ МПа};$$

— в соответствии с кривой сопротивления усталости для категории элемента № 50, монтажный стык сможет выдержать 320000 циклов перемен нагрузок при постоянной амплитуде нагружения – см. Рисунок 6.

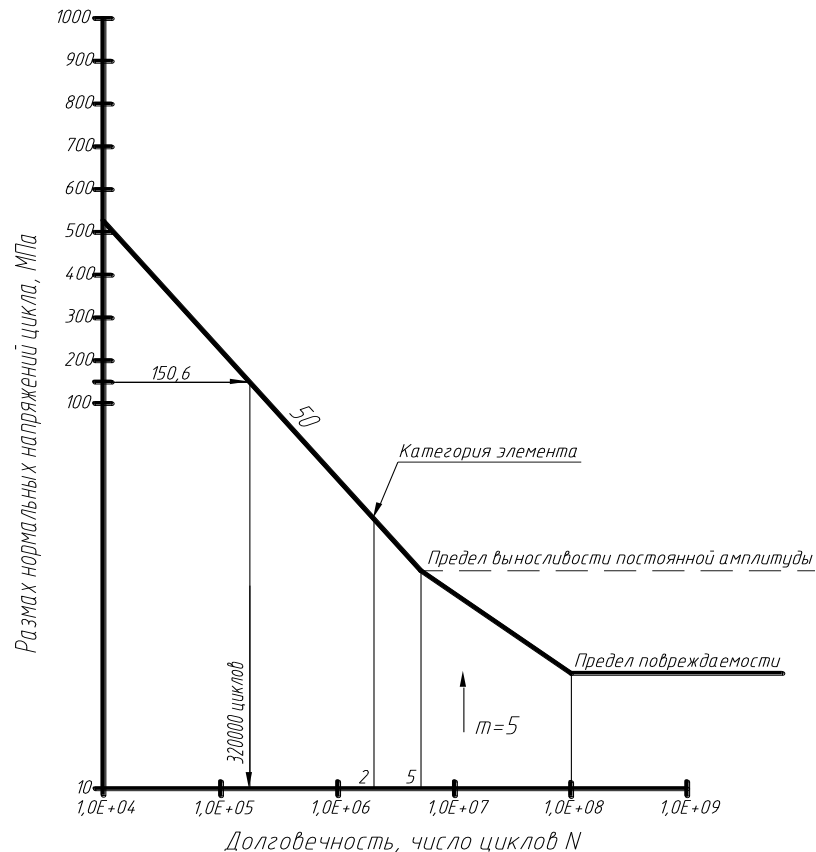


Рисунок 6 — К определению расчетной долговечности монтажного стыка по нормальным напряжениям и постоянной амплитуде нагружения

Задача 2. Известна принадлежность конструкции к определенному типу для применения соответствующего раздела из EN 1991. На конструкцию воздействуют циклы нагружений переменной амплитуды. Известен класс спектра нагружения и предполагаемое общее количество рабочих циклов в течение расчетного срока службы конструкции.

Балка Б-1 является подкрановой конструкцией. На балку воздействуют циклы нагружений с переменной амплитудой. Предполагаемое общее количество рабочих циклов нагружений, воздействующих на балку в течение расчетного срока службы, составляет $S = 10^6$. Максимальное расчетное значение вертикальной нагрузки на колесо тележки с учетом частного коэффициента безопасности (γ_{Ff}) составляет $\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max} = 30 \text{ кН}$. Максимальный коэффициент динамичности при работе тележки составляет $\phi = 1,2$. В соответствии с СН РК EN 13001-1 спектр нагружения балки грузовой тележкой относится к классу Q_3 .

Требуется:

- проверить усталостную прочность балки в зоне стыка по нормальным напряжениям;
- определить расчетную долговечность стыка балки по нормальным напряжениям.

Алгоритм расчета:

1. В соответствии с Таблицей 8.2 СН РК EN 1993-1-9 определяется категория элемента для расчета на выносливость. В данном примере монтажный стык относится к категории № 50, а усталостная трещина может развиваться как в самой балке, так и в стыковой поясной накладке.

2. В соответствии с Таблицей 2.11 EN 1991-3 определяется класс усталостного воздействия

крана (тележки). В данном случае ($5 \cdot 10^5 < C = 10^6 \leq 1 \cdot 10^6$) класс общего количества циклов принадлежит к категории U_6 , а усталостное воздействие (при классах U_6 и Q_3) относится к классу S_4 .

3. В соответствии с 2.12.1 п.4 EN 1991-3 определяется усталостная нагрузка на одно колесо тележки:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{\max,i} = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot (\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = 1,1 \cdot 0,5 \cdot 30 = 16,5 \text{ кН},$$

где $\varphi_{fat} = \frac{1+\varphi}{2} = \frac{1+1,2}{2} = 1,1$ - коэффициент эквивалентного разрушения при динамическом

воздействии в нормальных условиях, определяемый по (2.19) 2.12.1 п. 7 EN 1991-3;

$\lambda_i = 0,5$ - коэффициент эквивалентного разрушения при классе крана S_4 для введения поправки на соответствующий стандартизированный спектр усталостного нагружения и абсолютное количество циклов нагружения относительно $N = 2,0 \cdot 10^6$ циклов.

Коэффициент λ_i определяется по Таблице 2.12 EN 1991-3, в данном случае, - для нормальных напряжений.

4. Определяются максимальные и минимальные внутренние усилия цикла для расчетного сечения – аналогично п. 2 Задачи 1:

— максимальный изгибающий момент (когда колесо тележки расположено над расчетным сечением) равен:

$$M_{\max} = Q_e \cdot \sum_{i=1}^n y_i = Q_e \cdot (Y_1 + Y_2) = 16,5 \cdot (0,8484 + 0,45) = 21,42 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

— минимальный изгибающий момент (когда тележка расположена в 1-м пролете) равен:

$$M_{\min} = Q_e \cdot (Y_3 + Y_4) = 16,5 \cdot (-0,375 - 0,357) = -12,08 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

5. Определяются геометрические характеристики поперечного сечения балки и поясной накладки. Геометрические характеристики остаются те же, как в п. 3 Задачи 1:

— площадь поперечного сечения нетто поясной накладки $A_n^{\text{netto}} = 11,9 \text{ см}^2$;

— момент сопротивления поперечного сечения нетто балки $W_b^{\text{netto}} = 465 \text{ см}^3$.

6. Определяются максимальные и минимальные эквивалентные напряжения цикла в ослабленном сечении балки и поясной накладки:

— максимальные краевые напряжения в балке:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_b^{\text{netto}}} = \frac{21,42 \cdot 10^3}{465} = 46,1 \text{ МПа (растяжение)};$$

— минимальные краевые напряжения в балке:

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\min}}{W_b^{\text{netto}}} = \frac{-12,08 \cdot 10^3}{465} = -26,0 \text{ МПа (сжатие)};$$

— максимальные напряжения в накладке:

$$\sigma_{\max}^n = \frac{N_{\max}^n}{A_n^{\text{netto}}} = \frac{50,58 \cdot 10}{11,9} = 42,5 \text{ МПа (растяжение)};$$

— минимальные напряжения в накладке:

$$\sigma_{\min}^n = \frac{N_{\min}^n}{A_n^{\text{netto}}} = \frac{-28,53 \cdot 10}{11,9} = -24,0 \text{ МПа (сжатие)};$$

где $N_{\max}^H = \frac{M_{\max} \cdot I_f}{I_b \cdot h_b} = \frac{21,42 \cdot 8220}{10060 \cdot 0,346} = 50,58 \text{ кН}$ - максимальная продольная сила в

накладке от максимального изгибающего момента M_{\max} ;

$$N_{\min}^H = \frac{M_{\min} \cdot I_f}{I_b \cdot h_b} = \frac{-12,08 \cdot 8220}{10060 \cdot 0,346} = -28,53 \text{ кН} - \text{минимальная продольная сила в}$$

накладке от минимального изгибающего момента M_{\min} ;

$$I_f = 8220 \text{ см}^4 - \text{момент инерции поясов для неослабленного сечения балки};$$

7. В соответствии с (6.1) п. 6.2 п.1 СН РК EN 1993-1-9 определяется расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла в сечении нетто балки:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \Delta \sigma_b(Q_e) = 72,1 \text{ МПа},$$

где $\Delta \sigma(Q_e) = \Delta \sigma_b = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 46,1 - (-26,0) = 72,1 \text{ МПа}$ - размах нормальных напряжений цикла в ослабленном поперечном сечении балки с учетом эквивалентного коэффициента повреждения λ_i (учтено в п.3).

8. Аналогично п. 7 определяется расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла в сечении нетто поясной накладки:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta \sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \Delta \sigma_n(Q_e) = 66,5 \text{ МПа},$$

где $\Delta \sigma = \Delta \sigma_n = \sigma_{\max}^H - \sigma_{\min}^H = 42,5 - (-24,0) = 66,5 \text{ МПа}$ - размах нормальных напряжений цикла в ослабленном поперечном сечении накладки.

Как видно из расчета по п.7 и п.8, наибольшее расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла возникает в ослабленном сечении балки:

$\Delta \sigma_b = 72,1 \text{ МПа} > \Delta \sigma_n = 66,5 \text{ МПа}$, следовательно, дальнейшие расчеты необходимо производить по сечению нетто балки.

9. Производится проверка усталостной прочности балки в зоне стыка по нормальным напряжениям в соответствии с Разделом 8 СН РК EN 1993-1-9:

— проверяется условие (8.1) п. 8 п.1:

$$\Delta \sigma_b = 72,1 \text{ МПа} < 1,5 \cdot f_y = 1,5 \cdot 275 = 412,5 \text{ МПа}, - \text{условие выполняется}$$

— проверяется условие (8.2) п. 8 (1):

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{72,1}{50/1,15} = 1,66 > 1,0, - \text{условие не выполняется.}$$

где $\Delta \sigma_c = 50 \text{ МПа}$ - допускаемое значение предела выносливости при долговечности $N_c = 2 \cdot 10^6$ циклов, равное категории элемента по Таблице 8.2;

$\gamma_{Mf} = 1,15$ - частный коэффициент безопасности для предела выносливости $\Delta \sigma_c$ при безопасном ресурсе и малых последствиях от разрушения балки Б-1. Коэффициент γ_{Mf} определен в соответствии с Таблицей 3.1 СН РК EN 1993-1-9.

Таким образом, усталостная прочность балки по нормальным напряжениям в зоне стыка – не обеспечена. Стык не сможет выдержать 2 млн. циклов перемен нагрузок при переменной амплитуде нагружения.

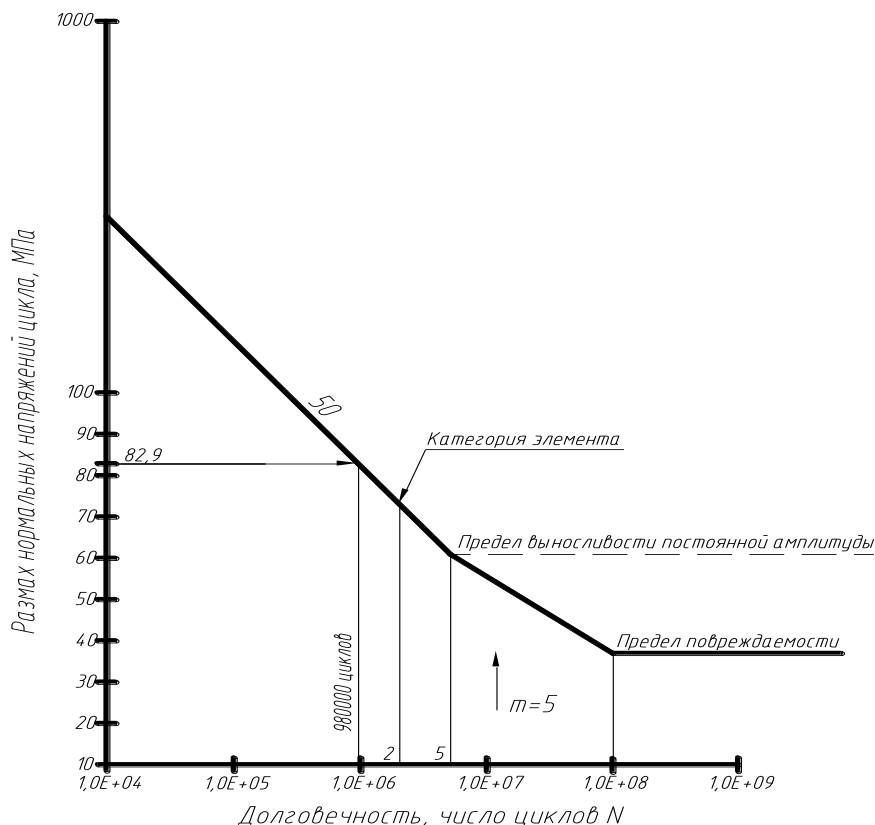


Рисунок 7 — К определению расчетной долговечности монтажного стыка по нормальным напряжениям и переменной амплитуде нагружения

10. По кривой усталости на Рисунке 7.1 СН РК EN 1993-1-9, для расчетного значения размаха нормальных напряжений цикла в сечении нетто балки, с учетом частного коэффициента безопасности для предела выносливости $\gamma_{Mf} = 1,15$ - определяется расчетная долговечность стыка:

— расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = 72,1 \cdot 1,15 = 82,9 \text{ МПа};$$

— в соответствии с кривой сопротивления усталости для категории элемента №50, монтажный стык сможет выдержать 980000 циклов перемен нагрузок при переменной амплитуде нагружения – см. Рисунок 7.

6.3 Расчетное значение измененного номинального размаха напряжений цикла

6.3.1 Расчетное значение измененного номинального размаха напряжений цикла $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}$ и $\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}$ должно определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E2} &= k_f \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma \cdot (\gamma_{Ff} Q_k) \\ \gamma_{Ff} \Delta\tau_{E2} &= k_f \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\tau \cdot (\gamma_{Ff} Q_k) \end{aligned} \quad (6.2)$$

где k_f — коэффициент концентрации напряжения, необходимый для учета увеличения локальных напряжений, обусловленного геометрией детали, не включенной в справочную кривую $\Delta\sigma_R-N$;

λ_i — эквивалентные коэффициенты повреждения, зависящие от спектров, как указано в соответствующих Разделах 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5, 6.2.6, 6.2.7; СН РК EN 1991-3.

ПРИМЕЧАНИЕ значения k_f могут быть определены по справочникам или соответствующими расчетами методом конечных элементов.

6.4 Расчетные значения размаха напряжений цикла для сварных соединений полых профилей

6.4.1 Если не выполнялись более точные расчеты, расчетное значение измененного номинального напряжения должно определяться с использованием упрощенной модели по 4 п.2 следующим образом:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_1 \cdot (\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*)$$

где $\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*$ — расчетное значение размаха напряжений цикла, вычисленное для упрощенной модели фермы с шарнирными узлами;

k_1 — повышающий коэффициент, определяется по Таблицам 4.1 и 4.2.

ПРИМЕР 2 Расчет усталостной прочности К - образного узла из круглых труб

Исходные данные: требуется проверить усталостную прочность К - образного узла главной фермы моста козлового крана (см. Рисунок 1) грузоподъемностью $Q = 15$ т. Конструкция узла приведена на Рисунке 2.

Мост козлового крана представляет собой пространственную решетчатую конструкцию, состоящий из двух главных ферм, раскрепленных горизонтальными ветровыми фермами по верхним и нижним поясам.

Главная ферма представляет собой двухконсольную балочную решетчатую конструкцию с параллельными поясами, треугольной решеткой и дополнительными стойками. Угол наклона раскосов к поясам $\Theta \approx 49^\circ$. Вылеты консолей фермы равны по $L_k = 10,0$ м, главный пролет $L = 20,0$ м, высота фермы составляет $H = 2,3$ м. Пояса выполнены из круглых бесшовных труб $\varnothing 159 \times 8$ по ГОСТ 8732-78 (с площадью сечения $A_0 = 37,93$ см²), решетка - из круглых бесшовных труб $\varnothing 95 \times 7$ по ГОСТ 8732-78 (с площадью сечения $A_1 = 19,34$ см²). Материал конструкций – сталь S275.

По нижнему поясу главных ферм движется грузовая тележка. Расстояние между осями колесных пар тележки - 4,0 м. Максимальное расчетное значение вертикальной нагрузки на колесо тележки с учетом частного коэффициента безопасности (γ_{Ff}) составляет $P = \gamma_{Ff} \cdot Q_{\max} = 37,5 \text{ кН}$. Максимальный коэффициент динамичности при работе тележки крана $\phi = 1,2$. Постоянная нагрузка от веса моста крана $q = 2,5$ кН/м.

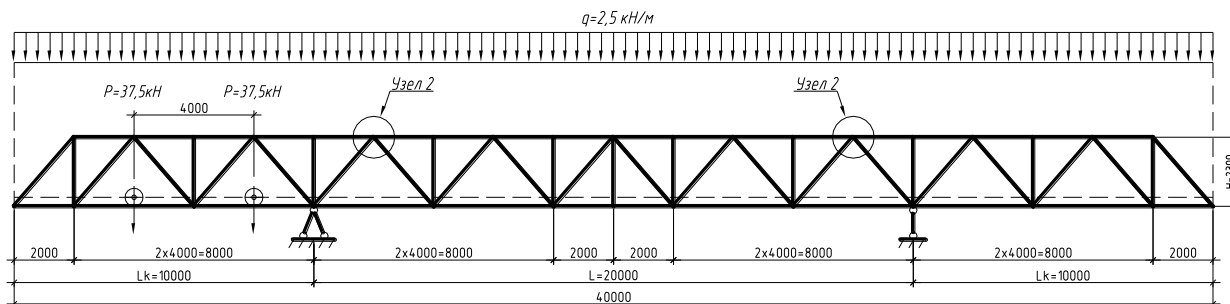


Рисунок 1 — Конструктивная схема главной фермы моста козлового крана

Алгоритм расчета:

1. В соответствии с Таблицей 8.8 (Узловые соединения решетчатых ферм) EN 1993-1-9 определяется категория элемента для расчета на выносливость. В данном случае узел занимает промежуточную категорию элемента между № 45 и № 90, а проверке подлежат и поясные элементы и раскосы. Проверяются условия применимости параметров данного узла к требованиям Таблицы 8.8:

— толщины стенок труб поясов и раскосов $t_0 = 8 \text{ мм} \leq 8 \text{ мм}$; $t_1 = 7 \text{ мм} \leq 8 \text{ мм}$ - условия выполняются;

— угол наклона раскосов к поясам $35^\circ \leq \theta = 49^\circ \leq 50^\circ$ - условие выполняется;

— условие $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_1} = \frac{159}{8} \cdot \frac{8}{7} = 22,7 \leq 25$ - выполняется;

— диаметр поясной трубы $d_0 = 159 \text{ мм} \leq 300 \text{ мм}$ - условие выполняется;

— эксцентриситет расцентровки узла $-0,5d_0 \leq e_{i/p} = 0 \text{ мм} \leq 0,25d_0$ - условие выполняется;

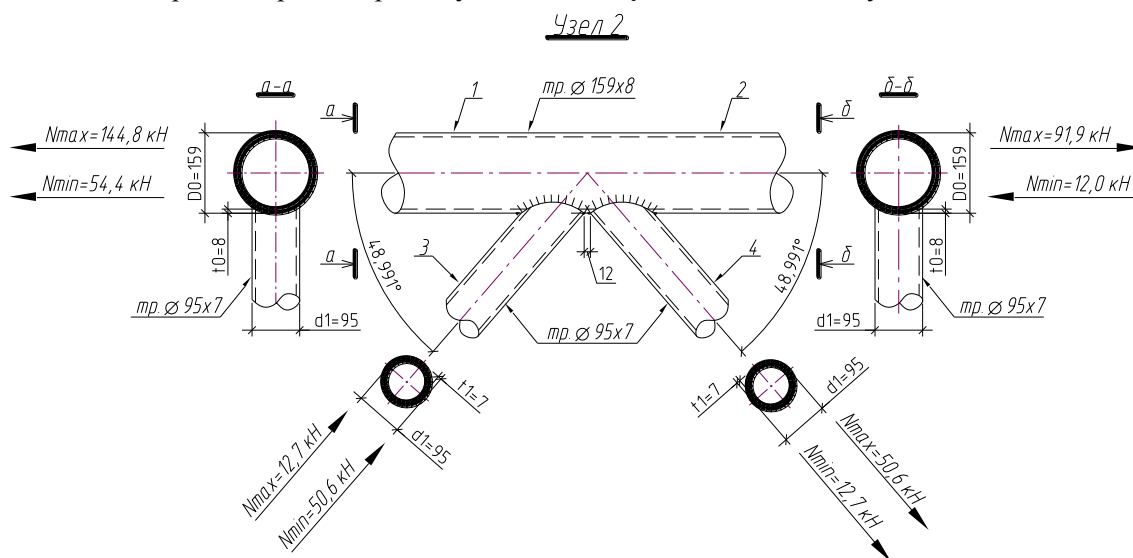


Рисунок 2 — Конструкция К – образного узла №2

— соотношение толщин стенок поясной трубы и раскосов $\frac{t_0}{t_1} = \frac{8}{7} = 1,14$, следовательно,

узел относится к категории №51 (категория определена методом линейной интерполяции между № 45 и № 90).

2. В соответствии с Приложением В, Таблицей В.1 СН РК EN 1991-3, определяется принадлежность козловой крана к соответствующему классу усталостного воздействия и класса оборудования.

В данном случае козловой кран относится к классу S_2 , а оборудование к классу HC1.

3. В соответствии с 2.12.1 п.4 СН РК EN 1991-3 определяется усталостная нагрузка на одно колесо тележки крана:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{\max,i} = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot (\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = 1,1 \cdot 0,315 \cdot 37,5 = 12,99 \text{ кН},$$

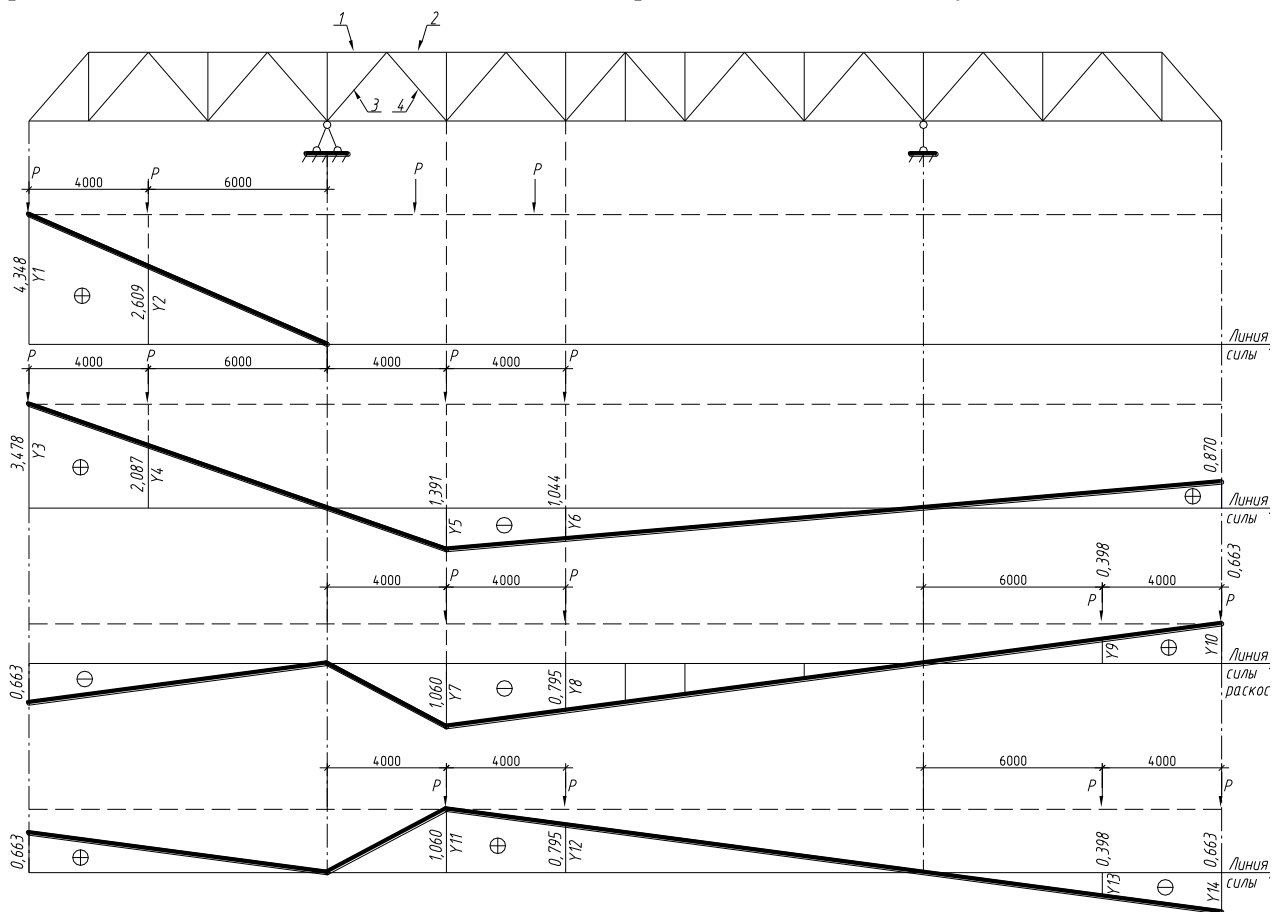
где $\varphi_{fat} = \frac{1+\varphi}{2} = \frac{1+1,2}{2} = 1,1$ - коэффициент эквивалентного разрушения при динамическом воздействии в нормальных условиях, определяемый по (2.19) 2.12.1 п.7 СН РК EN 1991-3;

$\lambda_i = 0,315$ - коэффициент эквивалентного разрушения при классе крана S_2 для введения поправки на соответствующий стандартизированный спектр усталостного нагружения и абсолютное количество циклов нагружения относительно $N = 2,0 \cdot 10^6$ циклов.

Коэффициент λ_i определяется по Таблице 2.12 СН РК EN 1991-3, в данном случае - для нормальных напряжений.

4. Определяются максимальные и минимальные внутренние усилия цикла для каждого элемента узла в отдельности.

Нагрузка является подвижной, следовательно, необходимо рассматривать линии влияния продольных сил «N» в поясных элементах №1, 2 и раскосах № 3, 4. - см. Рисунок 3.



4.1 Продольные силы в элементах от постоянной нагрузки:

— в поясе «1» $N_{q,1} = \gamma_{Ff} \cdot q \cdot \omega_{л.в,1} = 2,5 \cdot 21,74 = 54,4 \text{ кН}$ (растяжение);

— в поясе «2» $N_{q,2} = \gamma_{Ff} \cdot q \cdot \omega_{л.в,2} = 2,5 \cdot 7,83 = 19,6 \text{ кН}$ (растяжение);

— в опорном раскосе «3» $N_{q,3} = \gamma_{Ff} \cdot q \cdot \omega_{л.в,3} = 2,5 \cdot (-10,6) = -26,5 \text{ кН}$ (сжатие);

— в раскосе «4» $N_{q,4} = \gamma_{Ff} \cdot q \cdot \omega_{л.в,4} = 2,5 \cdot 10,6 = 26,5 \text{ кН}$ (растяжение),

где $\omega_{л.в,1} = 0,5 \cdot 4,348 \cdot 10 = 21,74 \text{ м}$ - площадь линии влияния для элемента «1»;

$\omega_{л.в,2} = 0,5 \cdot 3,478 \cdot 10 - 0,5 \cdot 1,391 \cdot 20 + 0,5 \cdot 0,87 \cdot 10 = 7,83 \text{ м}$ - площадь линии влияния для элемента «2»;

$\omega_{л.в,3} = -0,5 \cdot 0,663 \cdot 10 - 0,5 \cdot 1,06 \cdot 20 + 0,5 \cdot 0,663 \cdot 10 = -10,6 \text{ м}$ - площадь линии влияния для элемента «3»;

$\omega_{л.в,4} = 0,5 \cdot 0,663 \cdot 10 + 0,5 \cdot 1,06 \cdot 20 - 0,5 \cdot 0,663 \cdot 10 = 10,6 \text{ м}$ - площадь линии влияния для элемента «4»;

4.2 Максимальные и минимальные продольные усилия цикла в поясе «1»:

— максимальное:

$$N_{\max} = Q_e \cdot (Y_1 + Y_2) + N_{q,1} = 12,99 \cdot (4,348 + 2,609) + 54,4 = 144,8 \text{ кН (растяжение);}$$

— минимальное:

$$N_{\min} = 0 + N_{q,1} = 0 + 54,4 = 54,4 \text{ кН (растяжение),}$$

где $Y_1 = 4,348$, $Y_2 = 2,609$ – ординаты линии влияния «N₁» под каждым колесом при самом неблагоприятном для N_{\max} положении тележки,

$N_{q,1} = 54,4 \text{ кН}$ - усилие в поясе «1» от постоянной нагрузки.

4.3 Максимальные и минимальные продольные усилия цикла в поясе «2»:

— максимальное:

$$N_{\max} = Q_e \cdot (Y_3 + Y_4) + N_{q,2} = 12,99 \cdot (3,478 + 2,087) + 19,6 = 91,9 \text{ кН (растяжение);}$$

— минимальное:

$$N_{\min} = Q_e \cdot (Y_5 + Y_6) + N_{q,2} = 12,99 \cdot (-1,391 - 1,044) + 19,6 = -12,0 \text{ кН (сжатие),}$$

где $Y_3 = 3,478$, $Y_4 = 2,087$, $Y_5 = -1,391$, $Y_6 = -1,044$, – ординаты линии влияния «N₂» под каждым колесом при самом неблагоприятном для N_{\max} и N_{\min} положении тележки,

$N_{q,2} = 19,6 \text{ кН}$ - усилие в поясе «2» от постоянной нагрузки.

4.4 Максимальные и минимальные продольные усилия цикла в опорном раскосе «3»:

— максимальное:

$$N_{\max} = Q_e \cdot (Y_9 + Y_{10}) + N_{q,3} = 12,99 \cdot (0,663 + 0,398) - 26,5 = -12,7 \text{ кН (сжатие);}$$

— минимальное:

$$N_{\min} = Q_e \cdot (Y_7 + Y_8) + N_{q,3} = 12,99 \cdot (-1,06 - 0,795) - 26,5 = -50,6 \text{ кН (сжатие),}$$

где $Y_9 = 0,663$, $Y_{10} = 0,398$, $Y_7 = -1,06$, $Y_8 = -0,795$, – ординаты линии влияния «N₃» под каждым колесом при самом неблагоприятном для N_{\max} и N_{\min} положении тележки,

$N_{q,3} = -26,5 \text{ кН}$ - усилие в опорном раскосе «3» от постоянной нагрузки.

4.5 Максимальные и минимальные продольные усилия цикла в раскосе «4»:

— максимальное:

$$N_{\max} = Q_e \cdot (Y_{11} + Y_{12}) + N_{q,4} = 12,99 \cdot (1,06 + 0,795) + 26,5 = 50,6 \text{ кН (растяжение);}$$

— минимальное:

$$N_{\min} = Q_e \cdot (Y_{13} + Y_{14}) + N_{q,4} = 12,99 \cdot (-0,398 - 0,663) + 26,5 = 12,7 \text{ кН (растяжение),}$$

где $Y_{11} = 1,06$, $Y_{12} = 0,795$, $Y_{13} = -0,398$, $Y_{14} = -0,663$, – ординаты линии влияния «N₄» под каждым колесом при самом неблагоприятном для N_{\max} и N_{\min} положении тележки,

$N_{q,4} = 26,5 \text{ кН}$ - усилие в раскосе «4» от постоянной нагрузки.

5. Определяются максимальные и минимальные напряжения цикла в элементах узла:

5.1 Поясной элемент «1»

— максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0} = \frac{144,8 \cdot 10}{37,93} = 38,2 \text{ МПа (растяжение);}$$

— минимальные напряжения:

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{A_0} = \frac{54,4 \cdot 10}{37,93} = 14,3 \text{ МПа (растяжение).}$$

5.2 Поясной элемент «2»

— максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_0} = \frac{91,9 \cdot 10}{37,93} = 24,2 \text{ МПа (растяжение);}$$

— минимальные напряжения:

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{A_0} = \frac{-12,0 \cdot 10}{37,93} = -3,2 \text{ МПа (сжатие).}$$

5.3 Опорный раскос «3»

— максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_1} = \frac{-12,7 \cdot 10}{19,34} = -6,6 \text{ МПа (сжатие);}$$

— минимальные напряжения:

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{A_1} = \frac{-50,6 \cdot 10}{19,34} = -26,2 \text{ МПа (сжатие).}$$

5.4 . Раскос «4»

— максимальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_1} = \frac{50,6 \cdot 10}{19,34} = 26,2 \text{ МПа (растяжение);}$$

— минимальные напряжения:

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{A_1} = \frac{12,7 \cdot 10}{19,34} = 6,6 \text{ МПа (растяжение),}$$

где $A_0 = 37,93 \text{ см}^2$, $A_1 = 19,34 \text{ см}^2$ – площади поперечного сечения соответственно элементов пояса и раскосов.

6. В соответствии с (6.1) 6.2 п.1 СН РК EN 1993-1-9 определяется расчетное значение размаха номинальных напряжений цикла для каждого элемента узла, вычисленное для упрощенной модели фермы с шарнирными узлами:

$$6.1 \text{ Пояс «1» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^* = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \Delta\sigma(Q_e) = 23,9 \text{ МПа},$$

где $\Delta\sigma(Q_e) = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 38,2 - 14,3 = 23,9 \text{ МПа}$ - размах нормальных напряжений цикла в поясе «1» с учетом эквивалентного коэффициента повреждения λ_i (учтено в п.3);

$$6.2 \text{ Пояс «2» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^* = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \Delta\sigma(Q_e) = 27,4 \text{ МПа},$$

где $\Delta\sigma(Q_e) = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 24,2 - (-3,2) = 27,4 \text{ МПа}$ - размах нормальных напряжений цикла в поясе «2»;

$$6.3 \text{ Опорный раскос «3» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^* = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \Delta\sigma(Q_e) = 19,6 \text{ МПа},$$

где $\Delta\sigma(Q_e) = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = -6,6 - (-26,2) = 19,6 \text{ МПа}$ - размах нормальных напряжений цикла в опорном раскосе «3».

$$6.4 \text{ Раскос «4» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^* = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \Delta\sigma(Q_e) = 19,6 \text{ МПа},$$

где $\Delta\sigma(Q_e) = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 26,2 - 6,6 = 19,6 \text{ МПа}$ - размах нормальных напряжений цикла в раскосе «4».

7. В соответствии с (6.3) 6.4 п.1 EN 1993-1-9 определяется расчетное значение размаха нормальных напряжений цикла в каждом элементе узла:

$$7.1 \text{ Пояс «1» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_1 \cdot (\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^*) = 1,5 \cdot 23,9 = 35,9 \text{ МПа};$$

$$7.2 \text{ Пояс «2» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_1 \cdot (\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^*) = 1,5 \cdot 27,4 = 41,1 \text{ МПа};$$

$$7.3 \text{ Опорный раскос «3» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_1 \cdot (\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^*) = 1,3 \cdot 19,6 = 25,5 \text{ МПа};$$

$$7.4 \text{ Раскос «4» } \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_1 \cdot (\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^*) = 1,3 \cdot 19,6 = 25,5 \text{ МПа}.$$

где $k_1 = 1,5$ и $k_1 = 1,3$ - соответственно для поясов и раскосов коэффициент увеличения номинальных размахов напряжений цикла для учета изгибающих моментов в фермах, определяемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-9 (для К - образного соединения полых профилей круглого сечения с зазором).

Как видно из расчета по п.7 - наибольшее расчетное значение размаха напряжений цикла для узла возникает в поясном элементе «2»: $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = 41,1 \text{ МПа}$, следовательно, дальнейшие расчеты необходимо производить по сечению пояса «2».

8. Производится проверка усталостной прочности узла фермы по нормальным напряжениям в соответствии с Разделом 8 СН РК EN 1993-1-9:

— проверяется условие (8.1) 8 п.1: $\Delta\sigma_2 = 41,1 \text{ МПа} < 1,5 \cdot f_y = 1,5 \cdot 275 = 412,5 \text{ МПа}$, - условие выполняется,

где $f_y = 275 \text{ МПа}$ – номинальное значение предела текучести стали марки S275, которое определяется по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1;

— проверяется условие (8.2) 8 п. 1:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{41,1}{51/1,15} = 0,93 < 1,0, - \text{условие выполняется.}$$

где $\Delta\sigma_c = 51 \text{ МПа}$ - допускаемое значение предела выносливости при долговечности $N_c = 2 \cdot 10^6$ циклов, равное категории элемента по Таблице 8.8;

$\gamma_{Mf} = 1,15$ - частный коэффициент безопасности для предела выносливости $\Delta\sigma_c$ при безопасном ресурсе и малых последствиях от разрушения моста крана. Коэффициент γ_{Mf} определен в соответствии с Таблицей 3.1 СН РК EN 1993-1-9.

Таким образом, усталостная прочность узла главной фермы моста крана – обеспечена. Узел сможет выдержать 2 млн. циклов перемен нагрузок при переменной амплитуде нагружения.

6.5 Расчетное значение размаха напряжений цикла для максимального локального значения

1. Расчетное значение локального размаха напряжений цикла $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}$ должно определяться следующим образом:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = k_f \cdot (\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}^*), \quad (6.4)$$

где k_f — коэффициент концентрации напряжения.

ПРИМЕР 3. Расчет усталостной прочности стыкового К – образного сварного шва с полным проваром.

Исходные данные: несущей конструкцией промышленного здания является 3-х пролетная, 3-х этажная рама с жестким сопряжением ригелей с колоннами и колонн с фундаментами. Пролеты рамы составляют $L = 6,0$ м, высоты этажей $H_{эт} = 4,0$ м. Конструктивная схема рамы приведена на Рисунке. 1.

Колонны рамы выполнены из сварных двутавров сечением 200×500 мм, ригели перекрытий и покрытия – из сварных двутавров сечением 170×400 мм. Материал конструкций – сталь S275.

Конструктивное исполнение промежуточных рамных узлов приведено на Рисунке 2. Для восприятия опорных изгибающих моментов ригелями, в узлах предусмотрены стыковые накладные из листовой стали сечением 140×16 мм. Для передачи изгибающих моментов на колонны стыковые накладные привариваются торцами к полкам колонн ручной электродуговой сваркой стыковыми швами по типу Т9 (ГОСТ 5264-69, условное обозначение KS), при этом, угол перехода сварного шва к основному металлу составляет 45° . Конструкция стыковых швов с разделкой кромок приведена на Рисунке 3. К ригелям стыковые накладные привариваются двумя фланговыми монтажными швами катетом $k_f = 6$ мм. Для усиления полок и стенок колонн в местах приварки стыковых накладок предусмотрены ребра жесткости толщиной 8 мм.

На ригелях перекрытия 2-го этажа посередине их пролетов установлено оборудование с эксцентриковым механизмом, создающее вертикальную пульсационную нагрузку $P(t)$, изменяющуюся от 0 до P_{\max} . По результатам статического расчета рамы в рассматриваемом узле «3» были определены величины опорных изгибающих моментов, действующих в ригелях с учетом частных коэффициентов безопасности по нагрузкам (γ_{Ff}) (см. Рисунок 1 и Рисунок 2):

- от суммы постоянных и временных длительных нагрузок $M_G = 120 \text{ кН*м}$;
- максимальный момент от пульсационной нагрузки $M_P = 50 \text{ кН*м}$.

В процессе эксплуатации здания периодические осмотры узлов на предмет усталостных повреждений производиться не будут, а последствия от возможного разрушения ригелей будут тяжелыми.

Задача 1. На ригели перекрытия оказывает воздействие пульсационная нагрузка $P(t)$ с постоянной амплитудой.

При постоянной амплитуде нагружения требуется проверить усталостную прочность стыкового К – образного сварного шва на долговечность в $2 \cdot 10^6$ циклов.

Алгоритм расчета:

1. В соответствии с Приложением В, Таблицей В.1 (Категории элементов для использования метода локального напряжения) СН РК ЕН 1993-1-9 определяется категория стыкового соединения для расчета на выносливость. В данном случае узел «А» относится к категории №100.

2. Определяются максимальные и минимальные усилия цикла в верхней стыковой накладке. Верхняя стыковая накладка работает на растяжение:

$$\text{— минимальная продольная сила } N_{\min} = \frac{M_G}{h_b} = \frac{120}{0,4} = 300 \text{ кН};$$

$$\text{— максимальная продольная сила } N_{\max} = \frac{M_G + M_P}{h_b} = \frac{120 + 50}{0,4} = 425 \text{ кН},$$

где $h_b = 0,4 \text{ м}$ – высота ригеля.

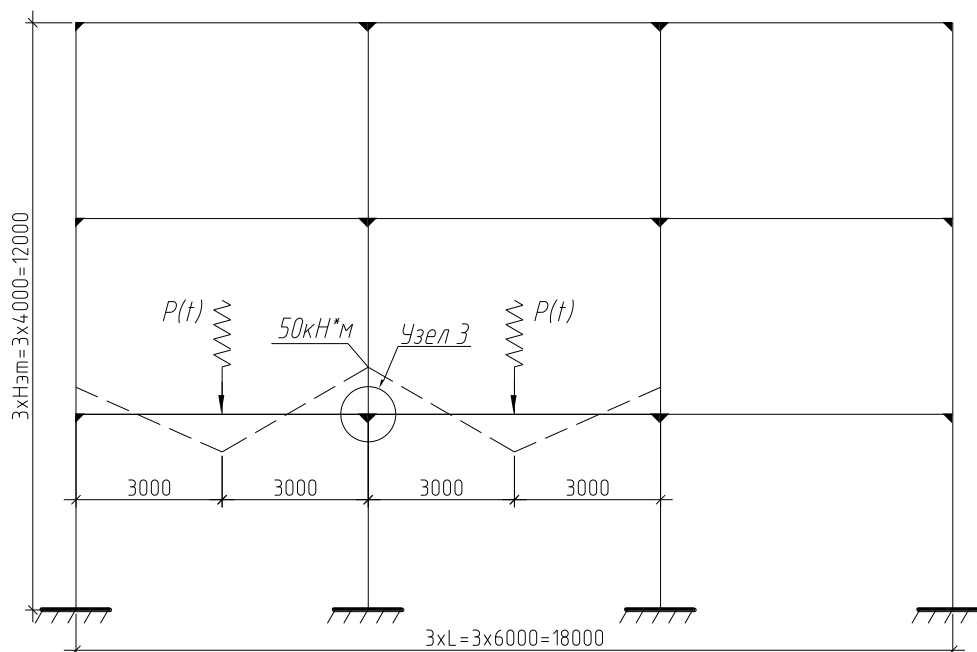
3. Определяются максимальные и минимальные номинальные напряжения цикла в стыковой накладке:

$$\text{— максимальные напряжения: } \sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_n} = \frac{425 \cdot 10}{22,4} = 189,7 \text{ МПа};$$

$$\text{— минимальные напряжения: } \sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{A_n} = \frac{300 \cdot 10}{22,4} = 133,9 \text{ МПа},$$

где $A_n = b_n \cdot t_n = 14 \cdot 1,6 = 22,4 \text{ см}^2$ – площадь поперечного сечения накладки;

$b_n = 14 \text{ см}$ – ширина сечения накладки; $t_n = 1,6 \text{ см}$ – толщина сечения накладки



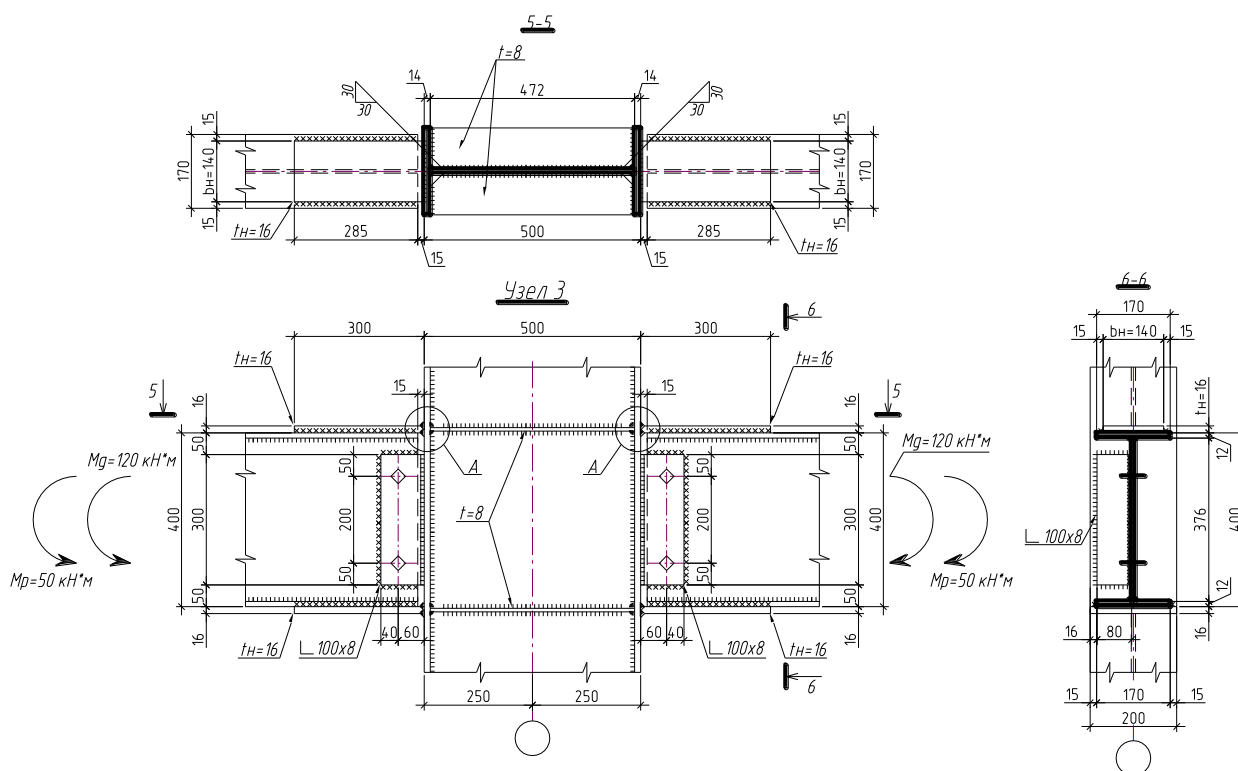
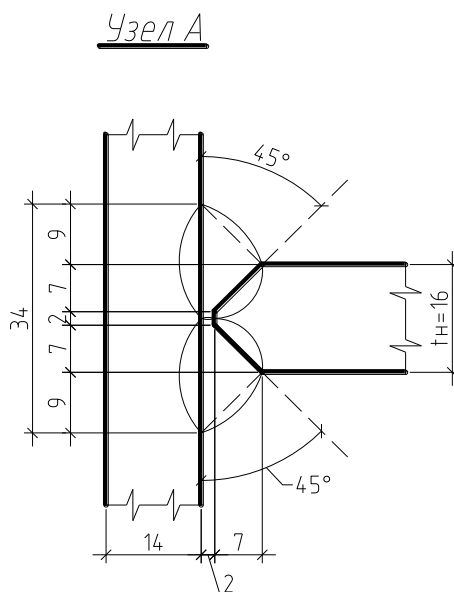


Рисунок 2 — Конструкция промежуточного жесткого узла рамы



**Рисунок 3 — Конструкция стыкового К – образного сварного шва с полным проваром
(горизонтальные ребра жесткости колонн условно не показаны)**

4. В соответствии с (6.1) 6.2 п.1 определяется расчетное значение размаха нормальных номинальных напряжений цикла в сечении накладки:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^* = \lambda \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_{\max}) = \lambda \cdot \Delta\sigma(P) = 1,0 \cdot 55,8 = 55,8 MPa ,$$

где $\lambda = 1,0$ – эквивалентный коэффициент повреждения при постоянной амплитуде цикла нагружения;

$\Delta\sigma(P) = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 189,7 - 133,9 = 55,8 \text{ МПа}$ — размах номинальных нормальных напряжений цикла в сечении накладки.

5. В соответствии с рекомендациями 6.3 п. 1 СН РК EN 1993-1-9 определяется коэффициент концентрации напряжения, необходимый для учета увеличения локальных напряжений, обусловленного геометрией узла «А» и зонами перехода от сварных швов к основному металлу.

В данном примере коэффициент концентрации напряжений k_f определяется с применением метода конечных элементов (МКЭ), на численной модели фрагмента узла сопряжения верхних стыковых накладок с двутавром колонны и учете сварных стыковых швов. Следует отметить, что сварные швы моделировались без валиков швов (кривая линия валика шва заменялась прямой линией) и без подрезов в зонах перехода от швов к основному металлу.

Построение и расчет модели выполнялись с применением программного комплекса Лиры 9.6 при упругой работе материала – см. Рисунок 4. Моделирование фрагмента узла производилось объемными КЭ типа 34 (универсальный пространственный 6 – узловый изопараметрический КЭ) и типа 36 (универсальный пространственный 8 – узловый изопараметрический КЭ).

Нагрузка на модель создавалась единичной, величиной $\sigma(1) = 1,0 \text{ МПа}$, прикладывалась она вдоль направления действия продольных сил по торцам стыковых накладок.

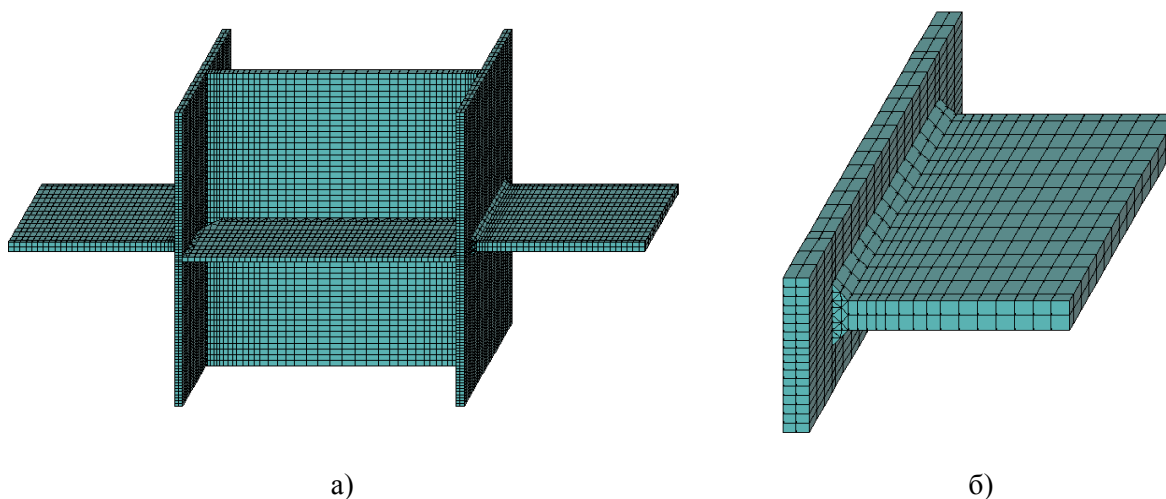


Рисунок 4 — а) Численная модель узла сопряжения верхних стыковых накладок с фрагментом колонны; б) Фрагмент расчетной схемы с моделированием К – образных стыковых швов

По результатам расчета в ПК Лиры 9.6 было определено напряженно – деформированное состояние узла – см. Рисунок 5 и Рисунок 6. Как видно из расчета, наибольшие нормальные напряжения в стыковых накладках возникают в зонах сварных швов, в местах сопряжения стенки и полок двутавра колонны. При этом, локальные напряжения превышают номинальные напряжения в накладках (вдали от сварных швов) в 1,25 раза, следовательно, коэффициент концентрации напряжений $k_f = 1,25$.

6. В соответствии с (6.4) 6.5 п.1 СН РК EN 1993-1-9 определяется расчетное значение локального размаха нормальных напряжений цикла в зоне сварных швов:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = k_f \cdot (\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}^*) = 1,25 \cdot 55,8 = 69,8 \text{ МПа};$$

где $k_f = 1,25$ – коэффициент концентрации напряжения.

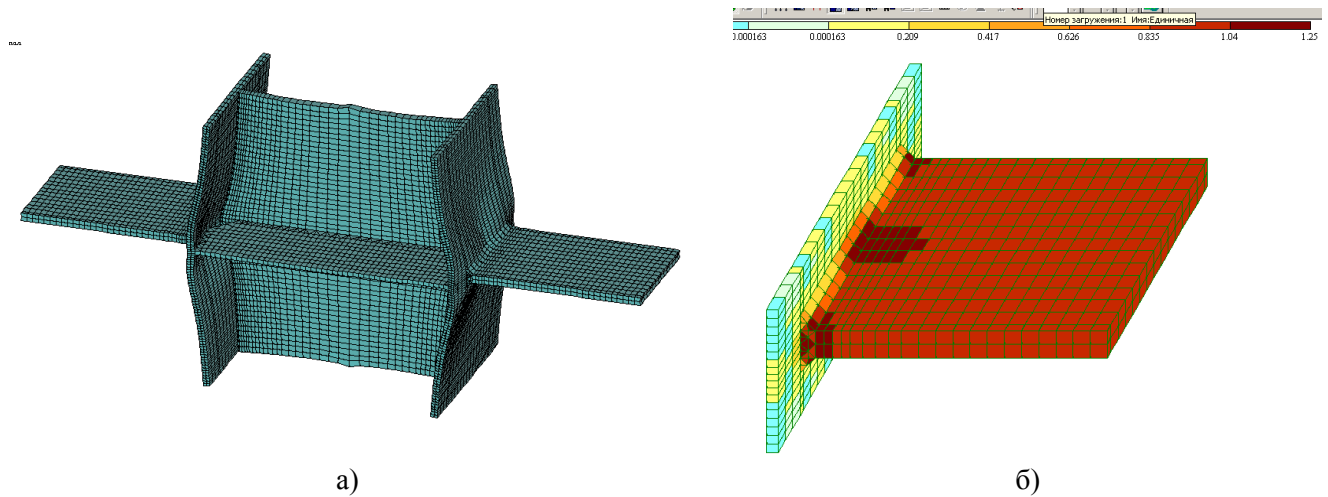


Рисунок 5 — а) Деформация узла под нагрузкой; б) Цветовая мозаика распределения нормальных напряжений σ вдоль накладки

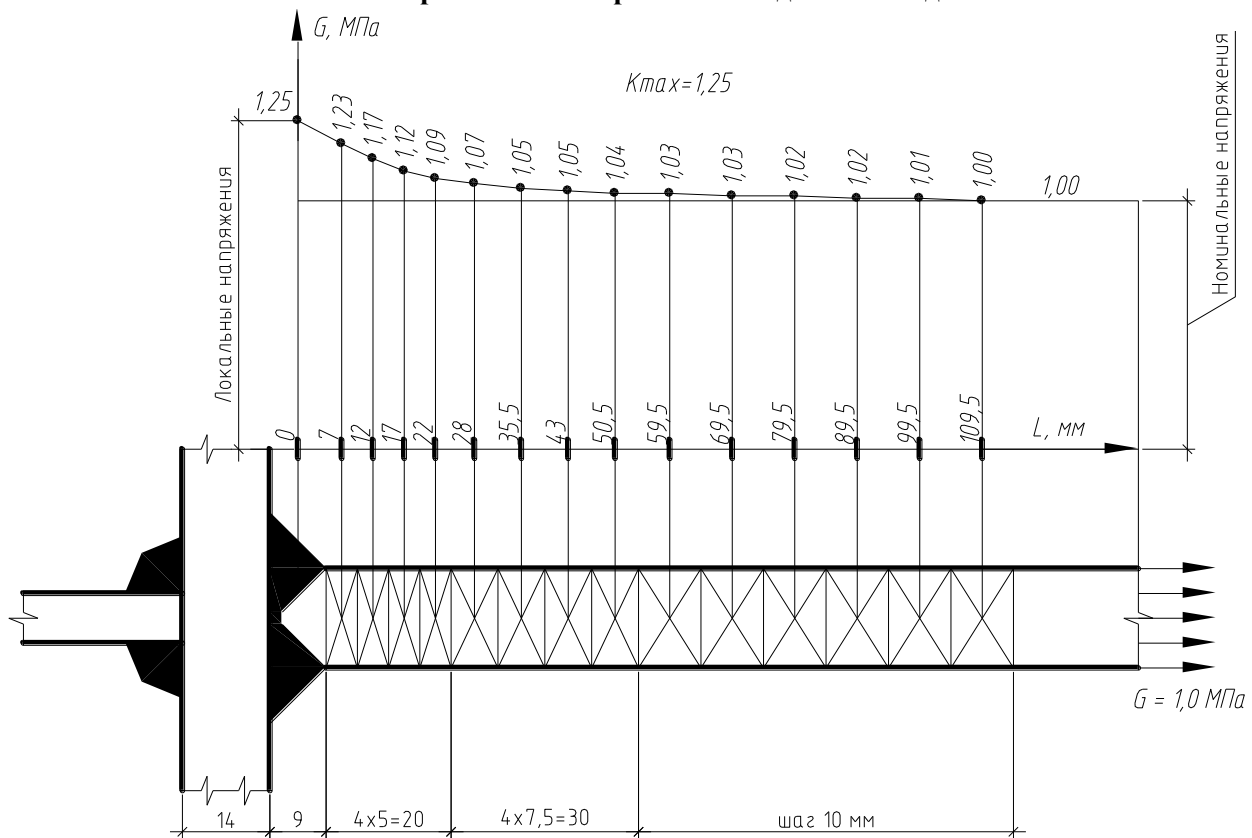


Рисунок 6 — Эпюра распределения нормальных напряжений по центрам КЭ верхней стыковой накладки вдоль её длины (зона примыкания стенки к полке двутавра)

7. Производится проверка усталостной прочности стыкового К – образного сварного шва в соответствии с Разделом 8 СН РК EN 1993-1-9:

— проверяется условие (8.1) 8 п.1: $\Delta\sigma_{\max} = 69,8 \text{ МПа} < 1,5 \cdot f_y = 1,5 \cdot 275 = 412,5 \text{ МПа}$ - условие выполняется,

где $f_y = 275$ МПа – номинальное значение предела текучести стали марки S275, которое определяется по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1;

— проверяется условие (8.2) п. 1:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{69,8}{100/1,35} = 0,94 < 1,0, \text{ - условие выполняется.}$$

где $\Delta\sigma_c = 100 \text{ МПа}$ - допускаемое значение предела выносливости при долговечности $N_c = 2 \cdot 10^6$ циклов, равное категории элемента по Таблице В.1 – см. п.1;
 $\gamma_{Mf} = 1,35$ - частный коэффициент безопасности для предела выносливости $\Delta\sigma_c$ при безопасном ресурсе и больших последствиях от разрушения узлов рамы.

Коэффициент γ_{Mf} определен в соответствии с Таблицей 3.1 СН РК EN 1993-1-9.

Таким образом, усталостная прочность стыкового К – образного сварного шва с полным проваром – обеспечена. Узел «А» сможет выдержать 2 млн. циклов перемен нагрузок при постоянной амплитуде нагружения.

Задача 2. На ригели перекрытия оказывает воздействие пульсационная нагрузка $P(t)$ с переменной амплитудой и известной историей нагружения.

История нагружения стыковой накладки задана в виде одного блока размахов номинальных напряжений, приведенного к 1000 циклам перемен нагрузок – см. Рисунок 7. Проектная долговечность рассчитана на 1500 блоков.

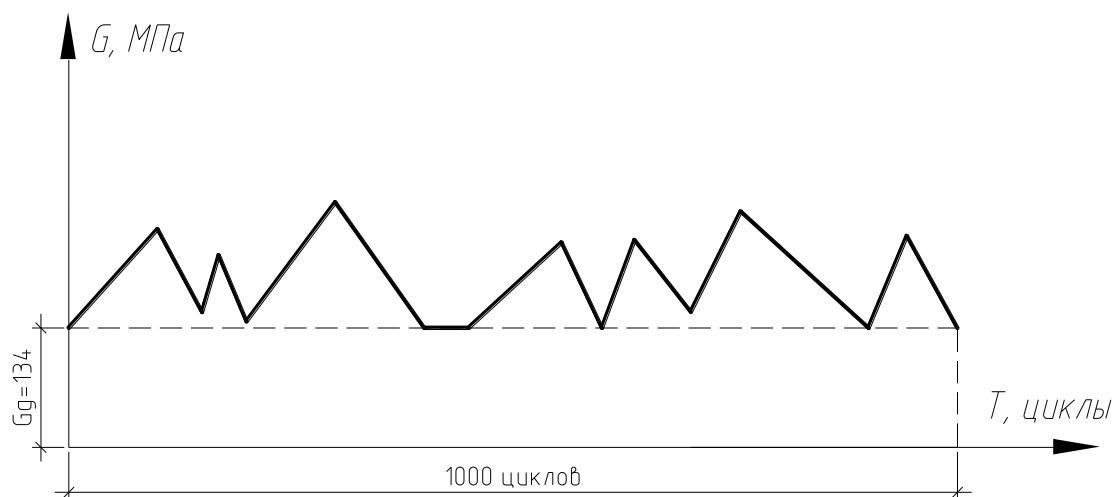


Рисунок 7 — Заданная история нагружения стыковой накладки в виде одного блока размахов номинальных нормальных напряжений.

Требуется проверить усталостную прочность стыкового К – образного сварного шва узла «А», используя оценку усталости, основанную на накоплении повреждений.

Алгоритм расчета:

1. В соответствии с Приложением В, Таблицей В.1 (Категории элементов для использования метода локального напряжения) СН РК EN 1993-1-9 определяется категория стыкового соединения для расчета на выносливость. В данном случае узел «А» относится к категории №100.
2. По заданной истории нагружения определяются размахи номинальных напряжений и соответствующее им количество циклов перемен нагрузок – см. Рисунок 8:
 — размаху напряжений $\Delta\sigma_1 = 90 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_1 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 200 = 3,0 \cdot 10^5,$$

где $1,5 \cdot 10^3$ – количество расчетных блоков перемен нагрузок в течение проектной долговечности;

200 – количество циклов, определенных для размаха напряжений $\Delta\sigma_1$ по истории нагружения;

— размаху напряжений $\Delta\sigma_2 = 85 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_2 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 200 = 3,0 \cdot 10^5;$$

— размаху напряжений $\Delta\sigma_3 = 75 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_3 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 150 = 2,25 \cdot 10^5;$$

— размаху напряжений $\Delta\sigma_4 = 70 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_4 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 100 = 1,5 \cdot 10^5;$$

— размаху напряжений $\Delta\sigma_5 = 65 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_5 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 100 = 1,5 \cdot 10^5;$$

— размаху напряжений $\Delta\sigma_6 = 60 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_5 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 200 = 3,0 \cdot 10^5;$$

— размаху напряжений $\Delta\sigma_7 = 50 \text{ МПа}$ - соответствует количество циклов

$$n_5 = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 50 = 7,5 \cdot 10^4.$$

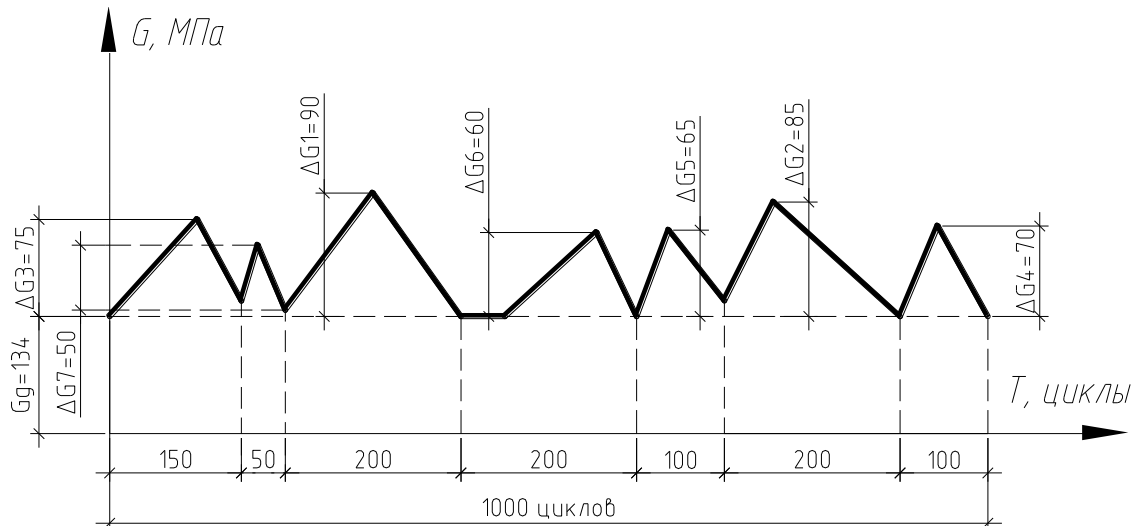


Рисунок 8 — Определение размахов номинальных напряжений и соответствующих им количества циклов в стыковой накладке

3. В соответствии с рекомендациями 6.3 п. 1 СН РК EN 1993-1-9 определяется коэффициент концентрации напряжения k_f , необходимый для учета увеличения локальных напряжений, обусловленного геометрией узла «А» и зонами перехода от сварных швов к основному металлу.

Коэффициент концентрации напряжений определен в задаче 1 и составляет $k_f = 1,25$.

4. В соответствии с (6.4) 6.5 п. 1 СН РК EN 1993-1-9 определяются расчетные значения локальных размахов напряжений циклов в зоне сварных швов, с учетом частного коэффициента безопасности для предела выносливости γ_{Mf} :

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_1$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_1 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 90 \cdot 1,35 = 151,9 \text{ МПа} ;$$

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_2$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_2 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 85 \cdot 1,35 = 143,4 \text{ МПа} ;$$

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_3$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_3 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 75 \cdot 1,35 = 126,6 \text{ МПа} ;$$

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_4$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_4 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 70 \cdot 1,35 = 118,1 \text{ МПа} ;$$

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_5$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_5 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 65 \cdot 1,35 = 109,7 \text{ МПа} ;$$

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_6$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_6 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 60 \cdot 1,35 = 101,3 \text{ МПа} ;$$

— для размаха напряжений $\Delta\sigma_7$:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf} = k_f \cdot \Delta\sigma_7 \cdot \gamma_{Mf} = 1,25 \cdot 50 \cdot 1,35 = 84,4 \text{ МПа} ,$$

где $k_f = 1,25$ – коэффициент концентрации напряжения;

$\gamma_{Mf} = 1,35$ - частный коэффициент безопасности, определенный в п.7 задачи 1.

На основании рассчитанных значений локальных размахов напряжений циклов и соответствующих им чисел циклов строится спектр размаха локальных напряжений цикла переменной амплитуды – см. Рисунок 9.

5. По кривой усталости категории №100 на Рисунке 7.1 СН РК EN 1993-1-9, для каждого из расчетного значения локальных размахов напряжений цикла определяются расчетные долговечности в виде количества циклов до разрушения – см. Рисунок10:

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_1 = 151,9 \text{ МПа}$ соответствует $N_1 = 1,44 \cdot 10^6$ циклов;

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_2 = 143,4 \text{ МПа}$ соответствует $N_2 = 1,53 \cdot 10^6$ циклов;

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_3 = 126,6 \text{ МПа}$ соответствует $N_3 = 1,71 \cdot 10^6$ циклов;

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_4 = 118,1 \text{ МПа}$ соответствует $N_4 = 1,80 \cdot 10^6$ циклов;

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_5 = 109,7 \text{ МПа}$ соответствует $N_5 = 1,89 \cdot 10^6$ циклов;

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_6 = 101,3 \text{ МПа}$ соответствует $N_6 = 1,98 \cdot 10^6$ циклов;

— размаху локальных напряжений $\Delta\sigma_7 = 84,4 \text{ МПа}$ соответствует $N_7 = 8,4 \cdot 10^6$ циклов.

6. В соответствии с гипотезой Пальмгрена – Майнера определяется суммарное усталостное повреждение стыкового шва в течение проектной долговечности:

$$D_q = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \frac{n_5}{N_5} + \frac{n_6}{N_6} + \frac{n_7}{N_7} = \frac{3 \cdot 10^5}{1,44 \cdot 10^6} + \frac{3 \cdot 10^5}{1,53 \cdot 10^6} + \frac{2,25 \cdot 10^5}{1,71 \cdot 10^6} +$$

$$+ \frac{1,5 \cdot 10^5}{1,80 \cdot 10^6} + \frac{1,5 \cdot 10^5}{1,89 \cdot 10^6} + \frac{3 \cdot 10^5}{1,98 \cdot 10^6} + \frac{7,5 \cdot 10^4}{8,4 \cdot 10^6} = 0,208 + 0,196 + 0,132 + 0,083 + 0,079 + 0,152 +$$

$$+ 0,009 = 0,859$$

где $n_1; n_2; n_3; n_4; n_5; n_6; n_7$ – число циклов, соответствующее каждому i -му размаху локальных напряжений (см. п. 2.).

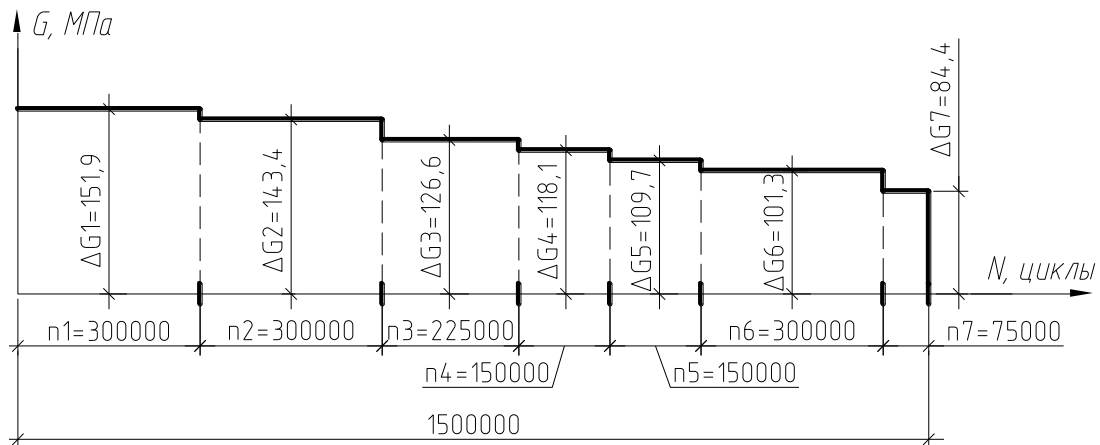


Рисунок 9 — Спектр размаха локальных напряжений цикла переменной амплитуды

7. В соответствии с п. А.6 Приложения А производится оценка усталостной прочности:

— по критерию накопления повреждений $D_q = 0,859 \leq 1,0$ - условие выполняется;

— по критерию размаха напряжений цикла

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = 98,7 \text{ МПа} \leq \sqrt[m]{D_q} \cdot \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} = \sqrt[3]{0,859} \cdot \frac{100}{1,35} = 70,4 \text{ МПа} \text{ - условие не выполняется}$$

где $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = 98,7 \text{ МПа}$ - эквивалентный спектр размахов локальных напряжений постоянной амплитуды на базе $N_c = 2 \cdot 10^6$ циклов, определенный по кривой усталости категории №100 для эквивалентного числа циклов постоянной амплитуды равного

$$N = \frac{N_c}{D_q} = \frac{2 \cdot 10^6}{0,859} = 2328289;$$

$D_q = 0,859$ - усталостное повреждение в течение проектной долговечности;

$$m = 3$$

$\Delta\sigma_c = 100 \text{ МПа}$ - допускаемое значение предела выносливости при долговечности

$N_c = 2 \cdot 10^6$ циклов, равное категории элемента по Таблице В.1 – см. п.1;

$\gamma_{Mf} = 1,35$ - частный коэффициент безопасности, определенный в п.7 задачи 1;

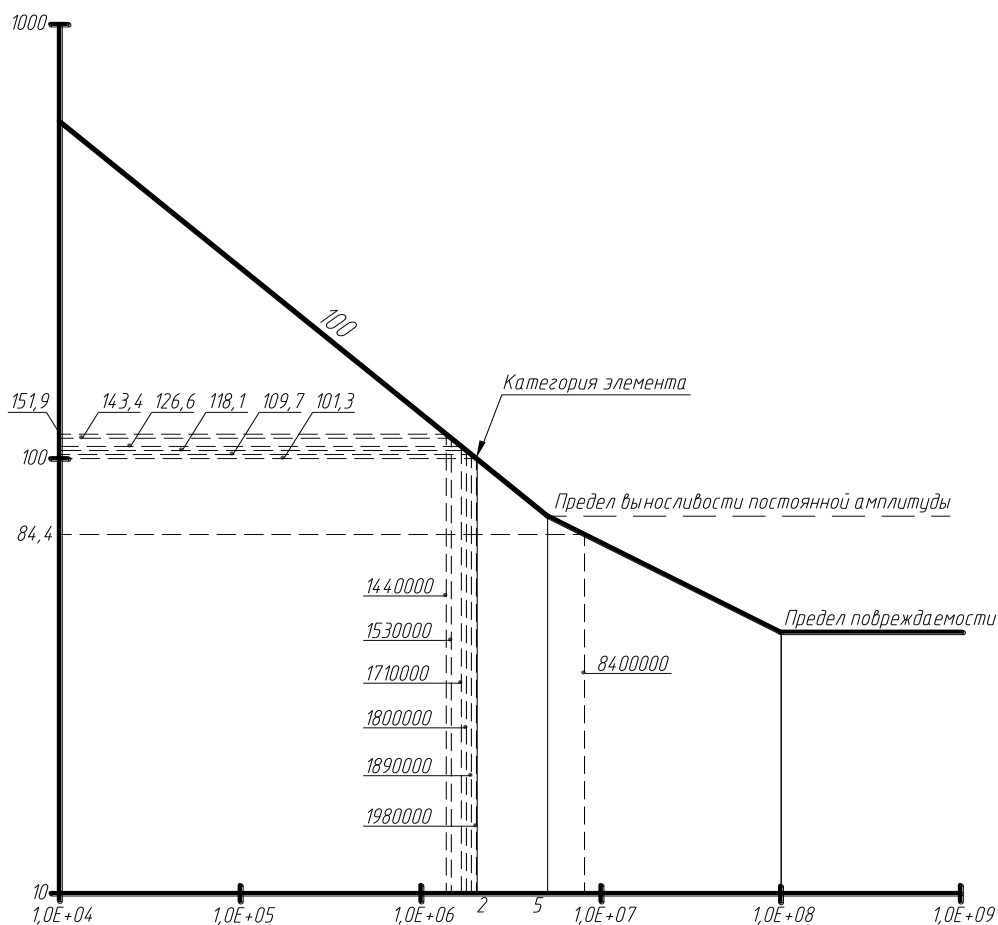


Рисунок 10 — Определение расчетных долговечностей от каждого размаха локальных напряжений цикла в расчетном спектре

Из результатов расчета следует, что усталостная прочность стыкового К – образного сварного шва при переменной амплитуде нагружения – не обеспечена. Узел «А» не сможет выдержать 1500 блоков перемен нагрузок.

Для обеспечения проектной долговечности узла «А» необходимо снижать величины размахов номинальных напряжений путем увеличения поперечного сечения накладок или проектировать более надежное соединение с высокой категорией для расчета на усталость.

7 ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ

7.1 Общие положения

7.1.1 (7.1(1)) Предел выносливости для номинальных размахов напряжений цикла представлен сериями кривых $(\log \Delta \sigma_R) - (\log N)$ и кривых $(\log \Delta \tau_R) - (\log N)$ ($S - N$ — кривые), которые соответствуют типовым категориям элементов. Каждая категория элементов обозначается числом, равным значению предела выносливости $\Delta \sigma_S$ и $\Delta \tau_S$, Н/мм², определенного на базе 2 млн. циклов нагружения.

7.1.2 (7.1(2)) Для номинальных напряжений постоянной амплитуды пределы ограниченной выносливости могут быть получены следующим образом:

а) $\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6$, где $m=3$ для $N \leq 5 \cdot 10^6$ (см. Рисунок 7.1);

б) $\Delta t_R^m \cdot N_R = \Delta t_C^m \cdot 2 \cdot 10^8$, где $m=5$ для $N \leq 10^8$, (см. Рисунок 7.2);

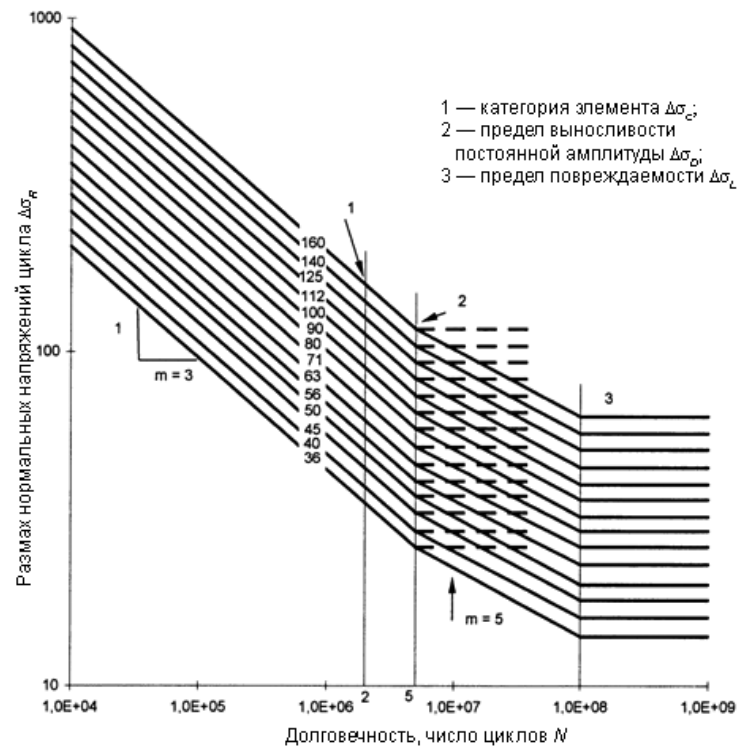


Рисунок 7.1 — Кривые сопротивления усталости для размаха нормальных напряжений цикла

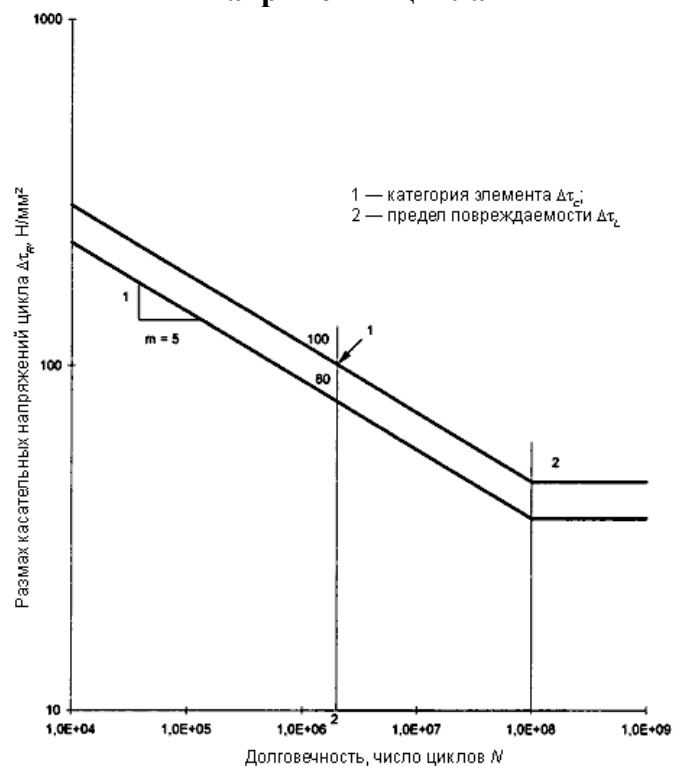


Рисунок 7.2 — Кривые сопротивления усталости для размаха касательных напряжений цикла

в) $\Delta\sigma_D = (2/5)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0,737 \Delta\sigma_C$ — предел выносливости постоянной амплитуды (см. Рисунок 7.1);

г) $\Delta\tau_L = (2/100)^{1/5} \Delta\tau_C = 0,457 \Delta\tau_C$ — предел повреждаемости (см. Рисунок 7.2).

7.1.3 (7.1(3)) Для спектров номинальных напряжений с размахами напряжений цикла выше и ниже предела выносливости постоянной амплитуды $\Delta\sigma_D$ сопротивление усталости должно быть определено по полным кривым сопротивления усталости следующим образом:

а) $\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6$, где $m=3$ для $N \leq 5 \cdot 10^6$;

б) $\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6$, где $m=5$ для $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10 \cdot 10^8$;

в) $\Delta\sigma_L = (5/100)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0,549 \Delta\sigma_D$ — предел повреждаемости (см. Рисунок 7.1).

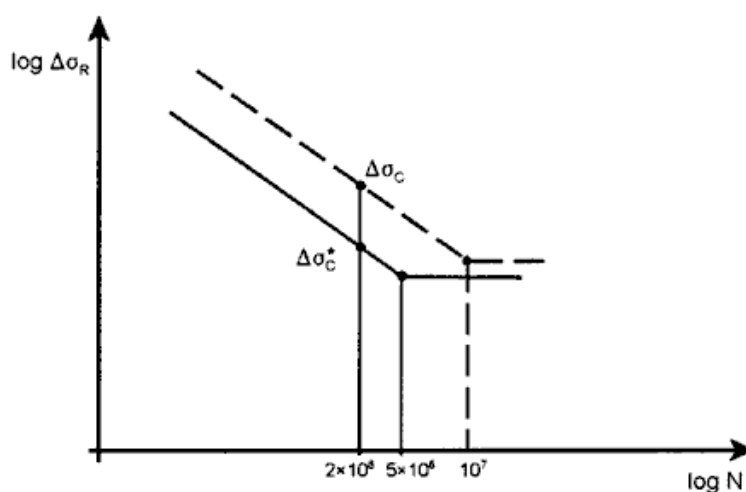


Рисунок 7.3 — Кривая сопротивления усталости для определения альтернативного предела выносливости $\Delta\sigma_C$ для деталей, классифицированных как $\Delta\sigma_C^*$

7.1.4 (7.1(3)) ПРИМЕЧАНИЕ 1) При назначении соответствующей категории для конкретного элемента конструкции значение размаха напряжений $\Delta\sigma_C$ на базе $N_C = 2$ млн. циклов нагружения определялось на основании результатов испытания с 95 % обеспеченностью неразрушения и 75 % уровнем доверительной вероятности для $\log N$, с учетом среднеквадратичного отклонения, размера образца и влияния остаточных напряжений. Число точек на графике (не меньше 10) выбиралось из соображений статистического анализа, см. Приложение D СН РК EN 1990.

7.1.5 (7.1(3)) ПРИМЕЧАНИЕ 2) Национальное Приложение может разрешать назначение категорий элементов по пределу выносливости для конкретного применения в случае, если оценка производится в соответствии с Примечанием 1. Согласно Пункту НП.2.9 Национального Приложения к СН РК EN 1993-1-9: «Разрешается назначать категорию элементов по пределу выносливости для конкретного применения, если оценка производится в соответствии с Примечанием 1 Пункта 7.1(3) СН РК EN 1993-1-9:2005/2011».

7.1.6 (7.1(3)) ПРИМЕЧАНИЕ 3) Данные испытаний для некоторых элементов точно не совпадают с кривыми сопротивления усталости на Рисунке 7.1. Для гарантированного исключения некорректных значений такие элементы отмечены знаком «*» и размещаются на одну категорию элементов ниже, чем этого требует их предел выносливости на базе

$2 \cdot 10^6$ циклов. Дополнительная проверка может повысить уровень классификации таких элементов на одну категорию в случае, если предел выносливости постоянной амплитуды $\Delta\sigma_D$ определен как предел выносливости на базе 10^7 циклов для $m=3$ (см. Рисунок 7.3).

7.1.7 (7.1(4)) Категории элементов по $\Delta\sigma_C$ и $\Delta\tau_C$ для номинальных напряжений представлены в СН РК EN 1993-1-9 (см. Таблицы 8.1-8.10).

7.1.8 (7.1(5)) Категории предела выносливости $\Delta\sigma_C$ для локальных размахов напряжений приведены в Приложении В настоящего пособия.

7.1.8 (7.1(5) ПРИМЕЧАНИЕ) Национальное Приложение может назначать предел выносливости $\Delta\sigma_C$ и $\Delta\tau_C$ для элементов, не охваченных СН РК EN 1993-1-9 (см. Таблицы 8.1 и 8.10) и Приложением В настоящего пособия.

7.2 Изменение предела выносливости

7.2.1 Элементы без сварки или со сварными соединениями с полностью снятыми внутренними остаточными напряжениями

7.2.1.1 (7.2.1(1)) В элементах без сварки или со сварными соединениями с полностью снятыми внутренними остаточными напряжениями влияние среднего напряжения цикла на предел выносливости может быть учтено назначением уменьшенного эквивалентного размаха напряжений цикла $\Delta\sigma_{E,2}$, если часть цикла или весь цикл является сжимающим.

7.2.1.2 (7.2.1(2)) Эквивалентный размах напряжений цикла может быть определен суммой растянутой части и 60 % величины сжатой части размаха напряжений цикла (см. Рисунок 7.4).

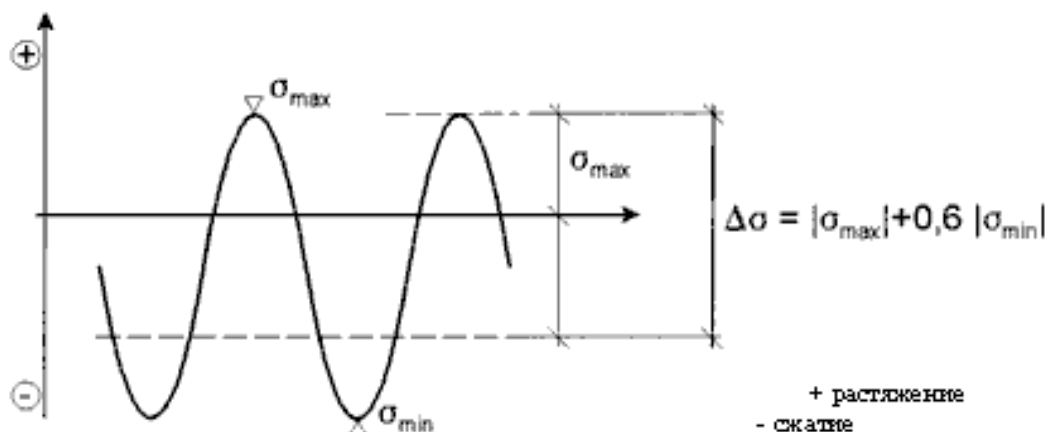


Рисунок 7.4 — Измененный размах напряжений цикла для элементов без сварки или со сварными соединениями с полностью снятыми внутренними остаточными напряжениями

7.2.2 Влияние размеров

7.2.2.1 (7.2.2(1)) Влияние размеров поперечного сечения, связанное с толщиной или другими конструктивными особенностями детали, необходимо учитывать, как указано СН РК EN 1993-1-9 (См. Таблицы 8.1-8.10). В этом случае предел выносливости определяется как:

$$\Delta\sigma_{C\text{ red}} = k_s \cdot \Delta\sigma_C. \quad (7.1)$$

ПРИМЕР 4. Расчет по оценке сопротивления усталости по методу безопасного ресурса узла крепления консоли колонны

Исходные данные: выполнить оценку сопротивления усталости по методу безопасного ресурса узла крепления консоли колонны на нагрузки от мостового крана с непрерывным режимом работы класса S6 (см. Рисунок 1).

Консоль состоит из двутавра 50Б1, сталь С255. Консоль нагружена циклическим вертикальным давлением колес крана $F_{D,max} = 206,8$ кН. Катет угловых швов, прикрепляющих консоль к колонне $k_f = 10$ мм.

2 Расчет усталостной прочности сварных швов

Эффективная толщина сварных швов равна:

$$a = k_f \cdot \cos 45^\circ = 10 \cdot 0.707 = 7.1 \text{ мм}$$

При расчете усталостной прочности угловых швов крепления консоли колонны принимаем упрощенное распределение усилий на отдельные швы соединения. Принимаем, что момент воспринимается швами полки, а поперечная сила швами стенки.

Горизонтальная составляющая изгибающего момента в консоли:

$$F = \frac{M_{\max}}{h_k} = \frac{104.31}{0.492} = 212.0 \text{ кН}$$

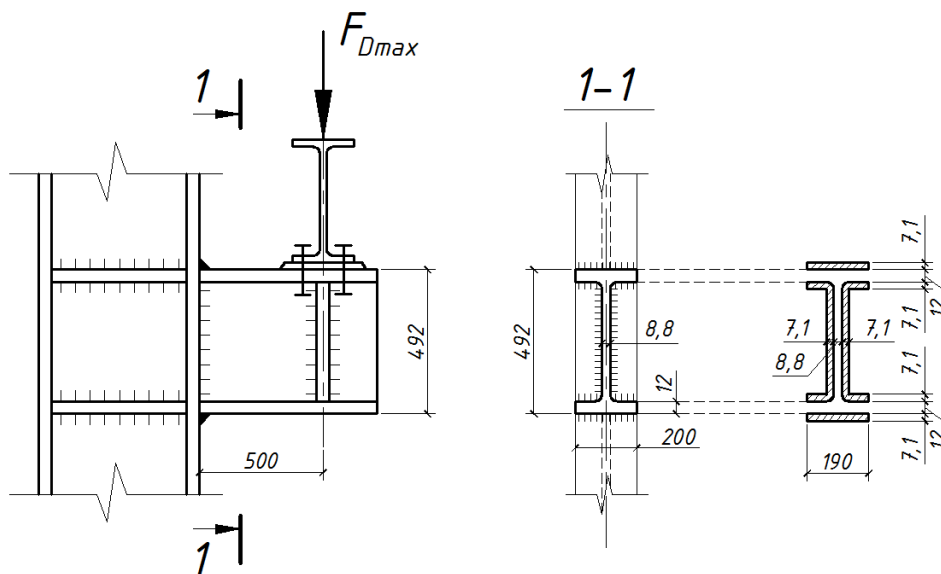


Рисунок 1 – Схема узла

Напряжение действующее в угловых швах, прикрепляющих полку консоли к полке колонны считается как нормальные напряжения σ_{wf} действующие поперек продольной оси шва определяется по формуле:

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$$

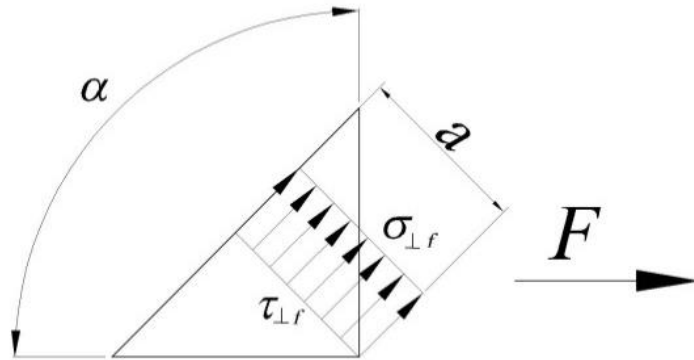


Рисунок 2 - Напряжения в сварном шве

$$\sigma_{\perp f} = \frac{F \cdot \sin \alpha / 2}{a \cdot \sum l_w}$$

$$\tau_{\perp f} = \frac{F \cdot \cos \alpha / 2}{a \cdot \sum l_w}$$

Т.к. шов равнобедренный, то:

$$\alpha / 2 = 45^\circ$$

$$\sigma_{wf} = \frac{F}{a \cdot \sum l_w} = \frac{212.0}{0.71 \cdot (19 + 19 - 0.88)} = 8.04 \text{ кН} / \text{см}^2$$

Принимаем эквивалентный размах нормальных напряжений, действующих в сварных швах прикрепляющих полки консоли к полке колонны:

$$\Delta \sigma_{E,2} = \sigma_{wf} = 8.04 \text{ кН} / \text{см}^2$$

По Таблице 8.5 СН РК EN 1993-1-9 определяем допускаемое значение предела выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов:

$$\Delta \sigma_c = 3.6 \text{ кН} / \text{см}^2$$

Проверяем усталостную прочность швов. Принимаем:

$$\gamma_{Mf} = 1.35$$

Тогда,

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{E2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 8.04}{3.6 / 1.35} = 3.32 > 1$$

Усталостная прочность сварного соединения полок консоли с полкой колонны не обеспечена.

Касательные напряжения в швах, прикрепляющие стенку консоли к полке колонны

$$\tau_{wf} = \tau_{If} = \frac{F_{D\max}}{a \cdot \sum l_w} = \frac{206.8}{0.71 \cdot 2 \cdot (49.2 - 2 \cdot 1.2)} = 3.11 \text{ кН / см}^2$$

Принимаем эквивалентный размах напряжений цикла:

$$\Delta \tau_{E,2} = \tau_{wf} = 3.11 \text{ кН / см}^2$$

По Таблице 8.5 СН РК EN 1993-1-9 принимаем допускаемое значение предела выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов:

$$\Delta \tau_c = 80 \text{ МПа}$$

Проводим проверку усталостной прочности сварных швов, прикрепляющих стенку консоли к полке колонны:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 3.41}{8.0 / 1.35} = 0.58 < 1$$

Усталостная прочность швов обеспечена.

8 РАСЧЕТ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

8.1 (8(1)) Номинальные, измененные номинальные или локальные размахи напряжения цикла от многократно повторяющихся нагрузок $\psi_1 Q_k$ (см. СН РК EN 1990) не должны превышать:

- а) $\Delta \sigma \leq 1,5 f_y$ — для размахов нормальных напряжений;
 б) $\Delta \tau \leq 1,5 f_y / 3^{1/2}$ — для размахов касательных напряжений

где f_y — номинальное значение предела текучести стали, определяемое по Таблице 8.1 настоящего пособия.

Таблица 8.1 - Номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления на растяжение f_u горячекатаной конструкционной стали

Стандарт и марка стали	Номинальная толщина элемента t , мм			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540

Таблица 8.1 - Номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления на растяжение f_u горячекатаной конструкционной стали

(продолжение)

EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

8.2 (8(2)) Необходимо проверить, чтобы при усталостном нагружении:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

и

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0.$$
(8.2)

где γ_{mf} - частный коэффициент безопасности для предела выносливости $\Delta\sigma_c$, $\Delta\tau_c$, определяемый по Таблице 3.1 настоящего пособия.

8.3 (8(2) ПРИМЕЧАНИЕ) Таблицы 8.1– 8.10 СН РК EN 1993-1-9 требуют, чтобы для некоторых элементов размахи напряжений циклов были определены в главных напряжениях.

8.4 (8(3)) Если не указано обратное в категориях элементов в Таблицах 8.8 и 8.9 СН РК EN 1993-1-9, в случае совместного действия напряжений циклов $\Delta\sigma_{E,2}$ и $\Delta\tau_{E,2}$ необходимо проверить, что:

$$\left(\frac{\gamma_{ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{mf}} \right)^5 \leq 1,0. \quad (8.3)$$

8.5 (8(4)) Когда нет данных для $\Delta\sigma_{E,2}$ и $\Delta\tau_{E,2}$, может использоваться форма проверки из Приложения А настоящего пособия.

8.6 (8(4) ПРИМЕЧАНИЕ 1) Приложение А настоящего пособия предусматривает продольное направление размахов напряжений циклов. Данное представление может быть уточнено для размахов касательных напряжений циклов.

8.7 (8(4) ПРИМЕЧАНИЕ 2) Национальное Приложение может давать информацию об использовании Приложения А. Согласно Пункту НП.2.11 Национального Приложения к СН РК EN 1993-1-9: «Дополнительная информация по использованию Приложения А не приводится».

ПРИМЕР 5 Расчет по определению предела выносливости узла крепления

подкрановой балки к консоли колонны

Исходные данные: выполнить классификацию узла крепления подкрановой балки к консоли колонны по категориям (элементов, входящих в данный узел). Определить предел выносливости по нормальным и касательным напряжениям для каждого элемента входящего в данный узел (см. Рисунок 1).

2 Определение категорий элементов узла

Согласно СН РК EN 1993 – 1 – 9, каждый элемент стальной конструкции, который подвергается усталостным воздействиям, должен быть классифицирован по категориям. Категории элементов определяются по Таблицам 8.1-8.9 СН РК EN 1993 – 1 – 9.

В данном узле крепления подкрановой балки к консоли колонны необходимо определить категорию для 7 элементов, которые подвержены действию усталостного воздействия, а именно:

- трещина №1 (усталостная трещина возникает в стене подкрановой балки): категория 160 по Таблице 8.10 СН РК EN 1993 – 1 – 9;
- трещина №2 (усталостная трещина возникает в полке подкрановой балки): категория 160 по Таблице 8.1 СН РК EN 1993 – 1 – 9;
- трещина №3 (усталостная трещина возникает в полке колонны, в месте сварного соединения «стоплера» к полке колонны): категория 40 по Таблице 8.4 СН РК EN 1993 – 1 – 9;

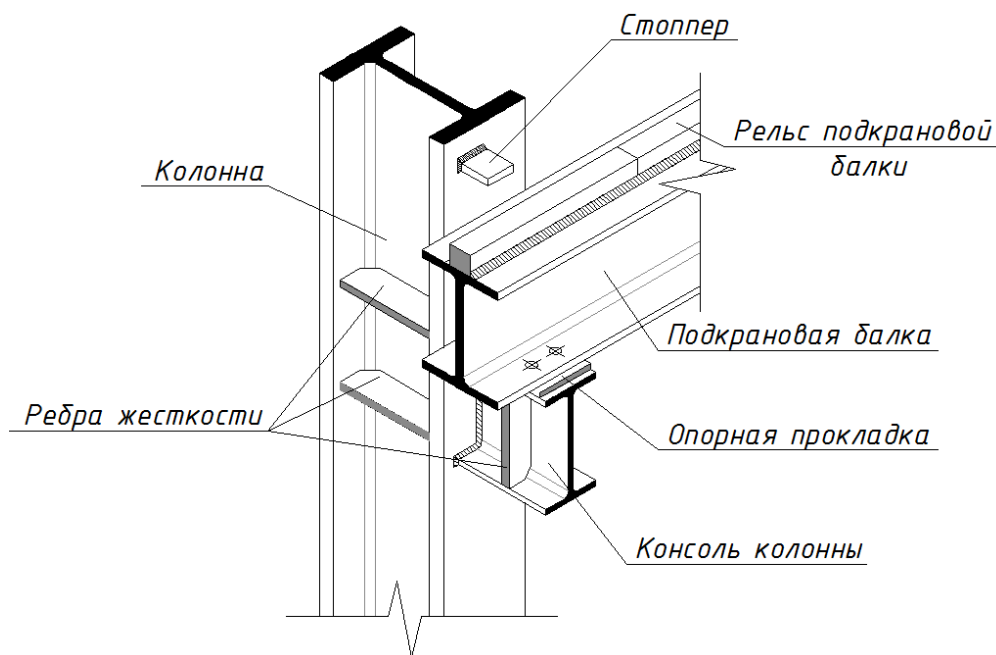


Рисунок 1 - Схема узла

- трещина №4 (усталостная трещина возникает в сварном шве): категория 125 по Таблице 8.2 СН РК EN 1993 – 1 – 9;
- трещина №5 (усталостная трещина возникает поперечном соединении рельсов подкрановой балки между собой): категория 71 по Таблице 8.3 СН РК EN 1993 – 1 – 9;
- трещина №6 (усталостная трещина возникает в угловом сварном шве узла сопряжения стенки консоли с полкой колонны): категория 36 по Таблице 8.5 СН РК EN 1993 – 1 – 9;
- трещина №7 (усталостная трещина возникает в угловом сварном шве узла сопряжения полки консоли с полкой колонны, угловой сварной шов подвержен действию сдвигающих усилий): категория 80 по Таблице 8.5 СН РК EN 1993 – 1 – 9.

3 Определение предела выносливости

Предел выносливости $\Delta\sigma_c$ для каждого элемента конструкции (см. Рисунок 2), которая подвержена действию усталостного воздействия, назначается согласно его категории (см. Таблицы 8.1-8.9 СН РК EN 1993 – 1 – 9):

- трещина №1: категории 160, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 160 \text{ Н/мм}^2;$$

- трещина №2: категории 160, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 160 \text{ Н/мм}^2;$$

- трещина №3: категории 40, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 40 \text{ Н/мм}^2;$$

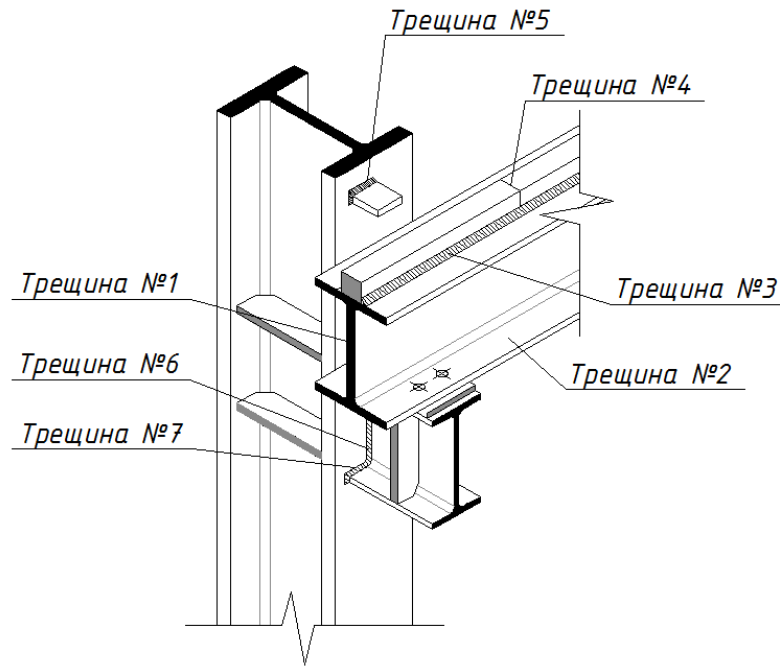


Рисунок 2 - Расположение усталостных трещин в узле

- трещина №4: категории 125, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 125 \text{ Н/мм}^2;$$

- трещина №5: категории 71, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 71 \text{ Н/мм}^2;$$

- трещина №6: категории 36, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 36 \text{ Н/мм}^2;$$

- трещина №7: категории 80, для которой предел выносливости по нормальным напряжениям равен:

$$\Delta\sigma_c = 80 \text{ Н/мм}^2.$$

Приложение А
(обязательное)

**Определение параметров
усталостного нагружения и форм контроля**

А.1 Определение нагружений

1. Типовые программы нагружения, которые достоверно отражают установленную верхнюю границу всех эксплуатационных нагрузок, ожидаемых в течение расчетной долговечности, должны определяться с использованием накопленного опыта работы похожих конструкций, Рисунок А.1 а).

А.2 История нагружения в элементе

1. История нагружения должна назначаться для элемента конструкции из соображений, учитывающих тип и форму соответствующих блоков колебаний и эффект динамического увеличения реакции конструкции, Рисунок А.1b).

2. Истории нагружения могут также быть определены с помощью измерений на похожих конструкциях или из динамических расчетов конструкции.

А.3 Подсчет циклов

1. Истории нагружения могут быть оценены одним из следующих методов подсчета циклов:

- метод дождевого потока;
- метод резервуара, Рисунок А.1 с).

Для определения:

- размахов напряжений циклов и числа циклов;
- средних напряжений, в случаях, когда требуется учитывать влияние среднего напряжения.

А.4 Спектр размаха напряжений цикла

1. Спектр размаха напряжений цикла должен определяться представлением размахов напряжений цикла и соответствующего числа циклов в убывающем порядке, Рисунок А.1d).

2. Спектры размахов напряжений цикла могут быть изменены исключением малых пиковых значений размахов напряжений цикла, которые вносят менее 1 % полного повреждения, и малых размахов напряжений цикла ниже предела повреждаемости.

3. Спектры размахов напряжений цикла могут быть стандартизованы по их форме, например с координатами $\overline{\Delta\sigma} = 1,0$ и $\overline{\Sigma n} = 1,0$.

А.5 Число циклов до разрушения

1. При использовании расчетного спектра размахи приложенных напряжений цикла $\Delta\sigma_i$ должны быть умножены на γ_{Ff} , а значения предела выносливости $\Delta\sigma_c$ должны быть поделены на γ_{Mf} для получения значения долговечности N_{Ri} — для каждого блока в спектре. Повреждение D_d в течение проектной долговечности должно вычисляться как

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}}, \quad (\text{A.1})$$

где n_{Ei} — число циклов, соответствующее размаху напряжений цикла $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$ для i -го блока во взвешенном спектре;

N_{Ri} — долговечность (в циклах), полученная из взвешенной кривой $\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} - N_R$ — для размаха напряжений цикла $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$.

2. На основании эквивалентности D_d расчетный спектр размахов напряжений цикла может быть преобразован в любой эквивалентный расчетный спектр размахов напряжений цикла, например расчетный спектр размаха напряжений цикла постоянной амплитуды, дающий эквивалентное усталостное нагружение Q_e , соответствующее числу циклов $n_{\max} = \sum n_i$, или $Q_{E,2}$, соответствующее числу циклов $N_c = 2 \cdot 10^6$.

А.6 Формы контроля

1. Оценка усталости, основанная на накоплении повреждений, должна удовлетворять следующим критериям:

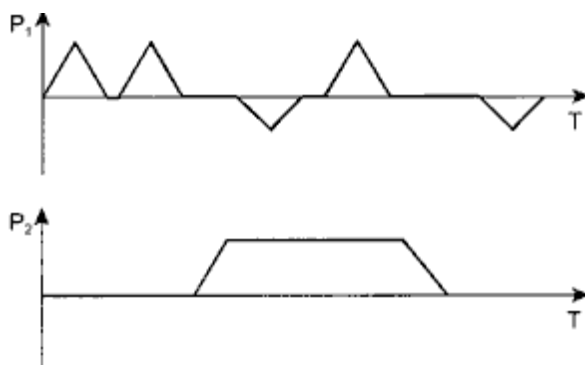
— основываться на накоплении повреждений

$$D_d \leq 1,0; \quad (\text{A.2})$$

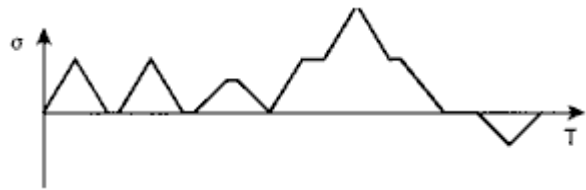
— основываться на размахе напряжений цикла

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d} \cdot \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}, \text{ где } m=3. \quad (\text{A.3})$$

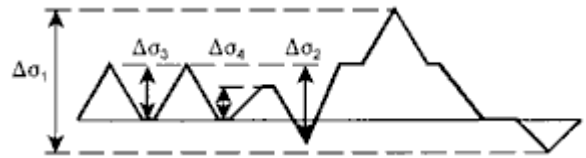
а) Последовательность нагружения:
типичный цикл нагружения
(повторяемый
раз за время проектной долговечности)



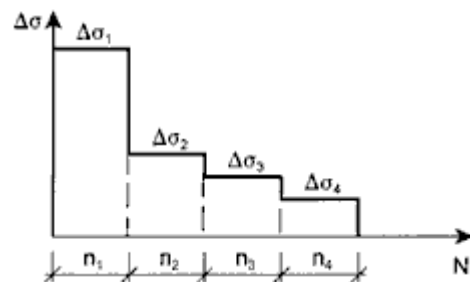
b) История нагружений элемента



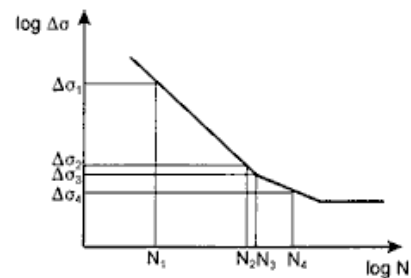
с) Подсчет числа циклов (например, методом резервуара)



d) Спектр размаха напряжений цикла



е) Число циклов до разрушения



f) Суммирование повреждений (гипотеза Пальмгрена-Майнера)

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \leq D_L$$

Рисунок А.1 — Метод накопленного повреждения

ПРИМЕР 6 Расчет по определению усталостной прочности сварной подкрановой балки

Исходные данные: проверить усталостную прочность сварной подкрановой балки пролетом $l = 12 \text{ м}$ под складские краны с непрерывным режимом работы класса S6 (тяжелый режим работы К7). Грузоподъемность крана 150кН. Материал балки – сталь С255. Сечение балки – сварной двутавр, как показано на Рисунке 1.

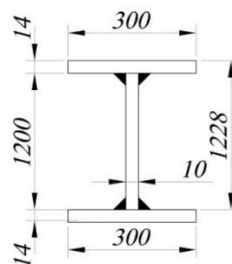


Рисунок 1 – Сечение сварной подкрановой балки

Усталостную нагрузку на подкрановую балку можно определить по ТКП EN 1991-3-2009 по формуле:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i}$$

где $Q_{max,i}$ - максимальное характеристическое значение вертикальной нагрузки на i колесо;

$\lambda_i = \lambda_{i,1} \cdot \lambda_{i,2}$ - коэффициент эквивалентного разрушения для введения поправки на соответствующий спектр усталостного нагружения определяется по Таблице 2.12 EN 1991-3-2009, для нормальных напряжений $\lambda_i = 0,794$, для касательных напряжений $\lambda_i = 0,871$;

φ_{fat} - коэффициент эквивалентного нагружения при динамическом воздействии, применяется большим из значений:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2} \text{ или } \varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2}$$

Коэффициент динамичности:

$$0,9 < \varphi_1 < 1,1$$

Принимаем по Таблице 2.5 EN 1991-3-2009:

$$\varphi_{2,min} = 1,15 \text{ и } \beta_2 = 0,51$$

V_n - постоянная скорость подъема груза в м/с, принимаем $V_h = 0,60 \text{ м / с}$

Коэффициент динамичности:

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot V_h = 1,15 + 0,51 \cdot 0,60 = 1,46$$

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2} = \frac{1 + 1,1}{2} = 1,05$$

$$\varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2} = \frac{1 + 1,46}{2} = 1,23$$

Принимаем $\varphi_{fat} = 1,23$.

Для крана грузоподъемностью 150кН, номинальное давление колеса крана:

$$Q_{max,i} = 190 \text{ кН}$$

Усталостная нагрузка от колеса крана для определения нормальных напряжений в балке:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i} = 1,23 \cdot 0,794 \cdot 190 = 185,56 \text{ кН}$$

Усталостная нагрузка от колеса крана для определения касательных напряжений в балке:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i} = 1,23 \cdot 0,871 \cdot 190 = 203,52 \text{ кН}$$

Расчет на усталостную прочность элементов подкрановой балки выполняем на усталостную нагрузку от одного крана.

Максимальный изгибающий момент в подкрановой балке:

$$M_{max} = 742,4 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Максимальная поперечная сила в подкрановой балке:

$$Q_{max} = 331,7 \text{ кН}.$$

Проверяем усталостную прочность элементов подкрановой балки. Примем схему нагружения подкрановой балки, как показано на рисунках.

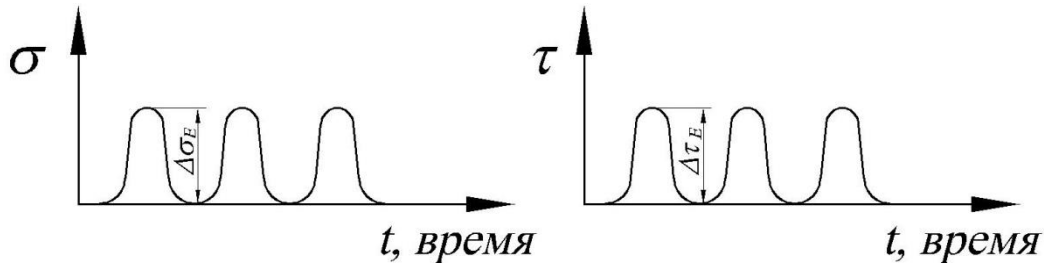


Рисунок 2 – Схема циклического нагружения подкрановой балки

Определяем места предполагаемого усталостного повреждения и назначаем в соответствии с Таблицами 8.1 – 8.10 СН РК EN 1993-1-9 категории элементов, число которого равно значению предела выносливости $\Delta\sigma_C$ и $\Delta\tau_C$ в Н/мм².

Усталостная трещина 1 возникает в нижнем поясе балки в зоне угловых швов, выполненных автоматической сваркой, по Таблице 8.2 СН РК EN 1993-1-9 определяем:

$$\Delta\sigma_N = 12.5 \hat{\sigma}_f / \sqrt{n}^2.$$

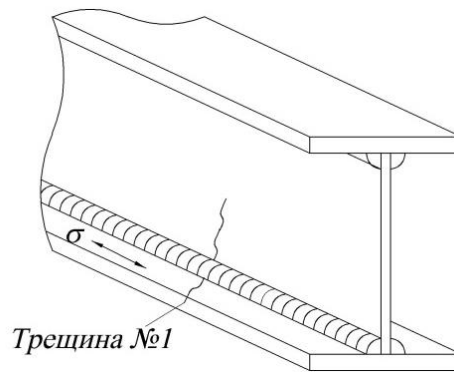


Рисунок 3 – Схема первой усталостной трещины в подкрановой балке

Усталостная трещина 2 возникает в сварных швах соединяющих полку со стенкой, по Таблице 8.5 СН РК EN 1993-1-9 определяем $\Delta\tau_C = 8.0 \text{ кН} / \text{см}^2$.

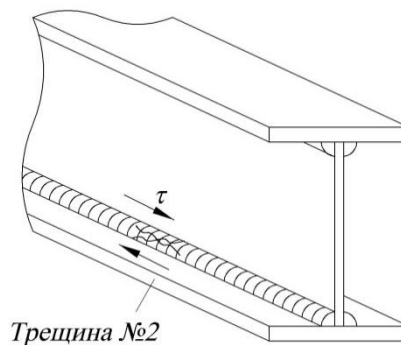


Рисунок 4 – Схема второй усталостной трещины в подкрановой балке

Усталостная трещина 3 возникает в стенке опорной части балки от действия максимальных касательных напряжений, по Таблице 8.1 ТКП 1993-1-9 определяем $\Delta\tau_C = 10.0 \text{ кН} / \text{см}^2$.

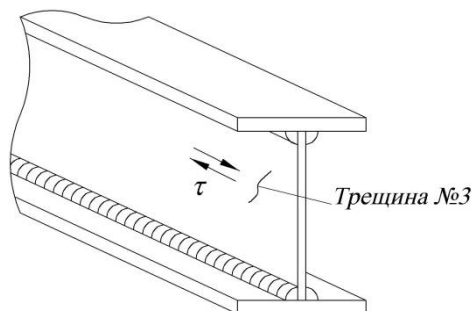


Рисунок 5 – Схема третьей усталостной трещины в подкрановой балке

Усталостная трещина 4 возникает в угловых швах, прикрепляющих верхнюю полку к стенке балки, от вертикального сжатия колесными нагрузками, по Таблице 8.10 СН РК EN 1993-1-9 определяем $\Delta\sigma_c = 3.6 \text{ кН} / \text{см}^2$.

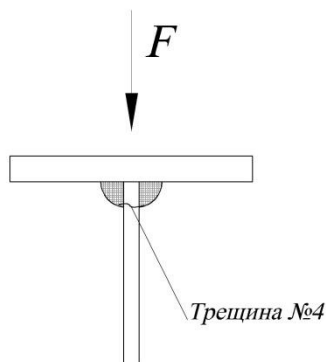


Рисунок 6 – Схема четвертой усталостной трещины в подкрановой балке

Проводим проверку по упрощенной методике усталостной прочности элементов. По Таблице 1 принимаем частный коэффициент безопасности размахов напряжений циклов постоянной амплитуды: Проверяем усталостную прочность нижнего пояса балки в месте возможного образования трещины №1.

Максимальный размах нормальных напряжений цикла для нижнего пояса балки:

$$\Delta\sigma_{E2} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{742.4 \cdot 100}{7386} = 10.05 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

$$\gamma_{Mf} = 1.35.$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 10.05}{12.5 / 1.35} = 1.2 \geq 1.0$$

Усталостная прочность нижнего пояса не обеспечена.

Проверяем усталостную прочность поясных сварных швов, в месте возможного образования трещины №2.

Катет шва:

$$k_f = 6 \text{ мм}, \quad a = 6 \cdot \cos 45^\circ = 6 \cdot 0.707 = 4.2 \text{ мм}$$

Размах касательных напряжений:

$$\Delta\tau_{E2} = \frac{Q_{\max} \cdot S}{I_x \cdot 2a} = \frac{331.7 \cdot 2550}{453497 \cdot 2 \cdot 0.42} = 2.22 \text{ кН} / \text{см}^2$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 2.22}{8.0 / 1.35} = 0.41 < 1.0$$

Усталостная прочность поясных сварных швов обеспечена.

Проверяем усталостную прочность стенки опорной части балки от действия размахов максимальных касательных напряжений в месте возможного образования трещины №3:

$$\Delta\tau_{E2} = \frac{Q_{\max} \cdot S}{I_x \cdot t_w} = \frac{331.7 \cdot 4350}{453497 \cdot 1.0} = 3.18 \text{ кН} / \text{см}^2 = 31.8 \text{ Н} / \text{мм}^2$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 3.18}{10.0 / 1.35} = 0.47 < 1.0$$

Усталостная прочность стенки опорной части балки обеспечена.

Проверяем усталостную прочность угловых сварных швов, прикрепляющих полку к стенке, от вертикального сжатия колесными нагрузками, в месте возможного образования трещины №4:

$$\Delta\sigma_{\perp E2} = \frac{Q_e}{2a \cdot l_{ef}} = \frac{185.56}{2 \cdot 0.42 \cdot 35.4} = 6.39 \text{ кН} / \text{см}^2$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{\perp E2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 6.39}{3.6 / 1.35} = 2.6 > 1.0$$

Усталостная прочность сварных швов, прикрепляющих верхнюю полку к стенке балки, от колесных сварных нагрузок не обеспечена.

Выполним расчет элементов, где усталостная прочность не обеспечена, по методу, основанному на линейной гипотезе накопления повреждений. Этот метод можно применить, когда имеется достаточно информации об условиях эксплуатации и известна история нагружения конструкции.

Рассчитаем усталостную прочность сварного соединения верхней полки к стенке балки на колесную нагрузку. Напряжения в поясных швах:

$$\Delta\sigma_{\perp E2} = 6.39 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

Строим спектр размахов напряжений цикла, используя Таблицу 2.11 ТКП EN 1991-3-2009.

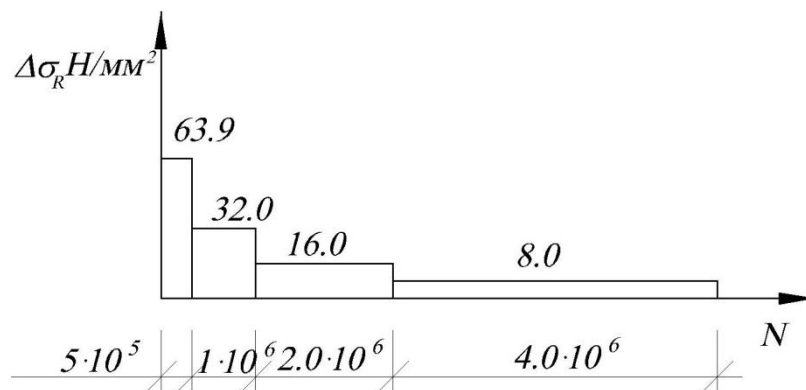


Рисунок 7 – Спектр размаха напряжений цикла в сечении швов

Определяем число циклов ограниченной выносливости для всех значений размахов напряжений спектра по Формулам 4.

$$\text{Для } \Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_{\perp E2} = 6.39 \text{ кН} / \text{см}^2, m = 3$$

$$N_1 = \frac{\Delta\sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^m} = \frac{3.6^3 \cdot 2 \cdot 10^6}{6.39^3} = 3.6 \cdot 10^5 \text{ циклов}$$

Для $\Delta\sigma_2 = 3.20 \text{ кН} / \text{см}^2$

$$N_2 = \frac{\Delta\sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^m} = \frac{3.6^3 \cdot 2 \cdot 10^6}{3.2^3} = 2.85 \cdot 10^6 \text{ циклов}$$

Для $\Delta\sigma_3 = 1.6 \text{ кН} / \text{см}^2$, $\Delta\sigma_D = 0.737 \cdot \Delta\sigma_c = 0.737 \cdot 3.6 = 2.65 \text{ кН} / \text{см}^2$

Для данного участка кривой усталости $m = 5$ при $5 \cdot 10^6 < N < 10 \cdot 10^8$

$$N_3 = \frac{\Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_3^m} = \frac{2.65^3 \cdot 5 \cdot 10^6}{1.6^5} = 6.23 \cdot 10^7 \text{ циклов}$$

Последняя ступень спектра нагружения в накоплении повреждений не участвует.

Определяем накопление повреждений по Формуле 13.8

$$D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = \frac{5 \cdot 10^5}{3.6 \cdot 10^5} + \frac{1 \cdot 10^6}{2.85 \cdot 10^6} + \frac{2 \cdot 10^6}{6.23 \cdot 10^7} = 1.77 > 1.0$$

Усталостная прочность соединения полки балки со стенкой не обеспечена. Необходимо уменьшить локальные напряжения в сварных швах, увеличив их катеты или назначить стыковые сварные швы.

Приложение В
(обязательное)

Соппротивление усталости с использованием метода локального напряжения

6.1.1.1.1.1.1 Для применения метода локального напряжения в таблице В.1 приведены категории элементов с трещинами, зарождающимися от:

- краев стыковых сварных швов;
- краев ребер, приваренных угловыми швами;
- краев угловых швов в крестообразных соединениях.

Таблица В.1 — Категории элементов для использования метода локального напряжения

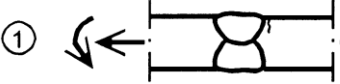
Категория элементов	Элемент конструкции	Описание	Требования
112		1) Стыковое соединение с полным проваром	<p>1) Все швы фрезеруются до поверхности пластин параллельно направлению, указанному стрелкой.</p> <p>Участки натекания металла на поверхность основного металла удаляются, края пластин должны быть сфрезерованы до поверхности в направлении действия напряжения.</p> <p>Сварка с обеих сторон, проверка неразрушающим контролем</p> <p>По поводу отклонения от осей см. Примечание 1</p>

Таблица В.1 — Категории элементов для использования метода локального напряжения
(продолжение)


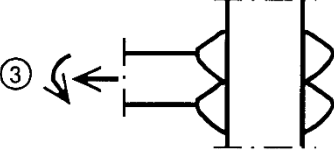
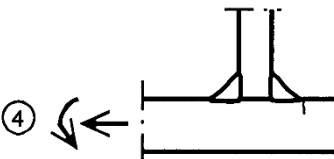
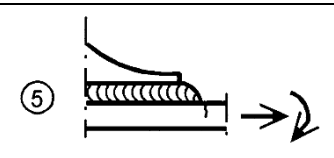
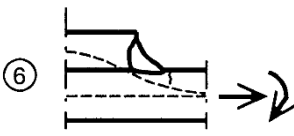
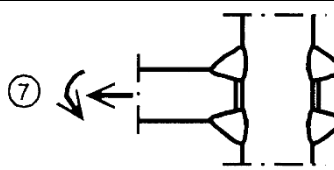
Категория элементов	Элемент конструкции	Описание	Требования
100	② 	2) Стыковое соединение с полным проваром	2) Сварной шов не фрезеруется до поверхности Участки натека металла на поверхность основного металла должны быть удалены, края пластин должны быть сфрезерованы до поверхности в направлении действия напряжения Сварка с обеих сторон По поводу отклонения от осей см. Примечание 1
100	③ 	3) Крестообразное соединение с полным проваром стыковых К-образных швов	3) Угол наклона поверхности сварного шва $\leq 60^\circ$ По поводу отклонения от осей см. Примечание 1
100	④ 	4) Угловые швы, не несущие нагрузки	4) Угол наклона поверхности сварного шва $\leq 60^\circ$ См. также Примечание 2
100	⑤ 	5) Торцы кронштейнов, торцы продольных ребер жесткости	5) Угол наклона поверхности сварного шва $\leq 60^\circ$ См. также Примечание 2

Таблица В.1 — Категории элементов для использования метода локального напряжения
(продолжение)

Категория элементов	Элемент конструкции	Описание	Требования
100	⑥ 	6) Концы нахлесточных пластин и подобные им соединения	6) Угол наклона поверхности сварного шва $\leq 60^\circ$ См. также Примечание 2
90	⑦ 	7) Крестообразные соединения с несущими нагрузку угловыми швами	7) Угол наклона поверхности сварного шва $\leq 60^\circ$ По поводу отклонения от осей см. Примечание 1 См. также Примечание 2
<p>ПРИМЕЧАНИЯ</p> <p>1 Таблица В.1 не учитывает эффекты отклонения от осей. Они должны рассматриваться отдельно в процессе определения напряжения.</p> <p>2 Таблица В.1 не учитывает зарождения усталостных трещин от корня сварного шва с последующим распространением через толщину шва.</p> <p>3 Определение угла наклона поверхности шва см. в СН РК EN 1090.</p>			

ПРИМЕР 7. Расчет по определению усталостной прочности болтового соединения

Исходные данные: проверить усталостную прочность болтов креплений балок подвесных путей к нижним поясам стропильных ферм. Опорная реакция балок в узлах $F = 42.24 \text{ кН}$. Принимаем 4 болта диаметром $d_b = 24 \text{ мм}$ класса прочности 5.8.

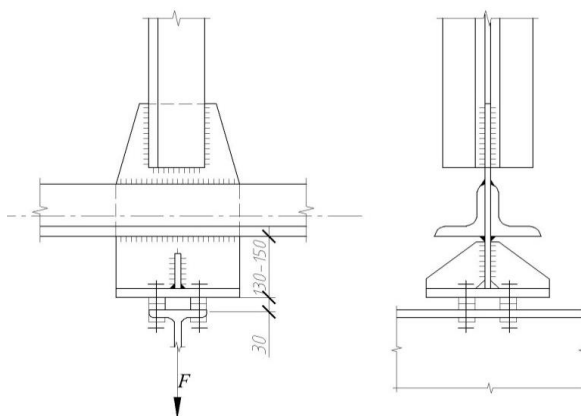


Рисунок 1 – Крепление балок подвесных путей к стропильным фермам

2 Определение усталостной прочности болтового соединения

Размах растягивающих напряжений в болтах:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \frac{F}{4A_{bn}} = \frac{42.24}{4 \cdot 3.52} = 3.0 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

По Таблице 8.1 СН РК EN 1993-1-9 принимаем допускаемое значение предела выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов:

$$\Delta\sigma_c = 50 \text{ МПа}.$$

Проверяем усталостную прочность болтов в узлах креплений балок подвесных путей по методу безопасного ресурса:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1.1 \cdot 3.0}{5 / 1.35} = 0.891 < 1.$$

Усталостная прочность болтов обеспечена.

ПРИМЕР 8 Расчет по определению долговечности сварного К - образного узла из прямоугольных труб

Исходные данные: требуется выполнить проверку долговечности нижнего пояса К - образного узла из прямоугольных труб в ферме (см. Рисунок 1).

Раскосы и нижний пояс фермы выполнены из нержавеющей стали марки 1.4301 с номинальным пределом текучести $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$ (см. Таблицу 2.1 СН РК EN 1993-1-4).

Раскос представляет собой замкнутое квадратное сечение размером $30 \times 30 \times 2 \text{ мм}$, а нижний пояс - $50 \times 50 \times 4 \text{ мм}$.

Нижний пояс фермы подвержен переменному воздействию с известной историей нагружения:

- $\Delta\sigma_1 = 100 \text{ Н/мм}^2$ и $n_1 = 10 \times 10^3$
- $\Delta\sigma_2 = 70 \text{ Н/мм}^2$ и $n_2 = 100 \times 10^3$
- $\Delta\sigma_3 = 40 \text{ Н/мм}^2$ и $n_3 = 1000 \times 10^3$

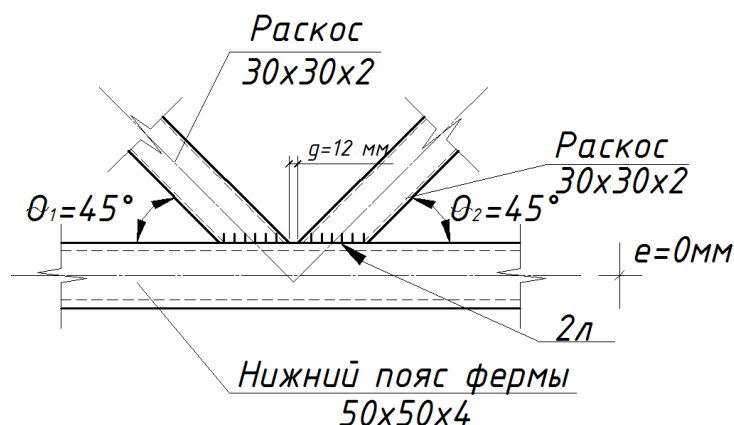


Рисунок 1 – Схема сварного узла сопряжения раскосов и нижнего пояса в ферме

2 Определение предела выносливости

Согласно СН РК EN 1993-1-9, предел выносливости назначается в зависимости от категории элемента. В данном примере сварной узел сопряжения раскосов с нижним поясом – элемент 2,

категория элемента 71 по Таблице 8.7 СН РК EN1993-1-9, так как отношение толщины стенки нижнего пояса к толщине стенки раскоса равно:

$$t_0 = 4 \text{ мм}$$

$$t_1 = t_2 = 2 \text{ мм}$$

$$t_0/t_i = t_0/t_1 = t_0/t_2 = 4/2 = 2 \text{ мм}$$

Таким образом, предел выносливости для данного узла равен:

$$\Delta \sigma_c = 71 \text{ Н/мм}^2 \text{ при } m = 5$$

Усталостная трещина может возникнуть в нижнем поясе – в месте сопряжения одного из раскосов к нижнему поясу фермы (см. Рисунок 2).

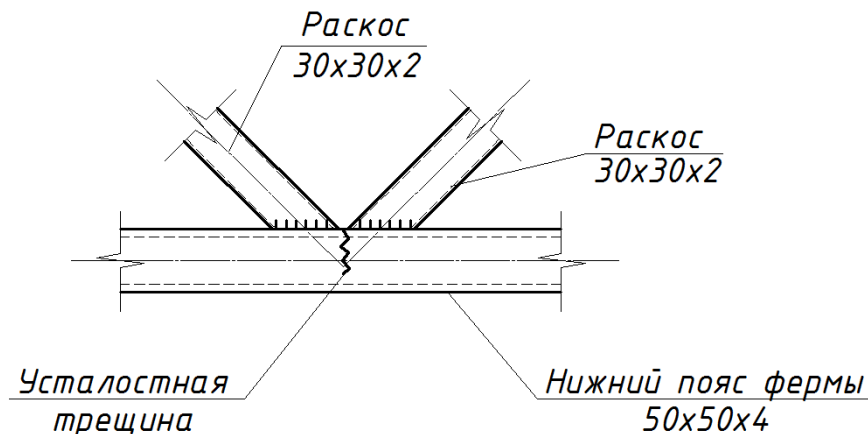


Рисунок 2 - Усталостная трещина в нижнем поясе фермы

3 Требования к узловым соединениям решетчатых ферм (см. Таблицу 8.7 СН РК EN 1993-1-9)

Согласно Таблице 8.7 СН РК EN 1993-1-9, при расчете усталости узловых соединений решетчатых ферм необходимо выполнение следующих требований:

$$t_0 = 4 \text{ мм} < 8 \text{ мм}$$

$$t_1 = t_2 = 2 \text{ мм} < 8 \text{ мм}$$

$$\theta = 45^\circ < 50^\circ$$

$$t_0 = 4 \text{ мм} < 8 \text{ мм}$$

$$b_0 = 50 \text{ мм} < 200 \text{ мм}$$

$$h_0 = 50 \text{ мм} < 300 \text{ мм}$$

$$\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} = \frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_1} = \frac{50}{4} \cdot \frac{4}{2} = 25 \leq 25$$

$$\frac{h_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} = \frac{h_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_1} = \frac{50}{4} \cdot \frac{4}{2} = 25 \leq 25$$

$$\frac{b_i}{b_0} = \frac{b_1}{b_0} = \frac{b_2}{b_0} = \frac{30}{50} = 0,6 > 0,4$$

$$\frac{b_i}{b_0} = \frac{b_1}{b_0} = \frac{b_2}{b_0} = \frac{30}{50} = 0,6 < 1,0$$

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{h_1}{h_0} = \frac{h_2}{h_0} = \frac{30}{50} = 0,6 > 0,25$$

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{h_1}{h_0} = \frac{h_2}{h_0} = \frac{30}{50} = 0,6 < 1,0$$

$$0.5 (b_0 - b_1) = 0.5 (b_0 - b_1) = 0,5 (50-30) = 10 \text{ мм} < g=12 \text{ мм}$$

$$1.1 (b_0 - b_1) = 1.1 (b_0 - b_1) = 1,1 (50-30) = 22 \text{ мм} > g=12 \text{ мм}$$

$$2t_0 = 2 \cdot 4 = 8 \text{ мм} < g=12 \text{ мм}$$

Таким образом, требования Таблицы 8.7 СН РК EN 1993-1-9 для узлового соединения решетчатой фермы выполняется.

4 Определение коэффициентов k_1 , γ_{Mf} и γ_{Ff}

Значение коэффициента увеличения номинальных размахов напряжений цикла для учета изгибающих моментов в фермах k_1 определяется по Таблице 4.2 СН РК EN 1993-1-9:

$$k_1 = 1,5.$$

Значение частного коэффициента безопасности для предела выносливости K_{Mf} в СН РК EN 1993-1-9 не приведено, но с достаточной мерой надежности γ_{Mf} равен:

$$\gamma_{Mf} = 1,0.$$

Значение частного коэффициента безопасности для эквивалентных размахов напряжений циклов постоянной амплитуды γ_{Ff} определяется по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-9:

$$\gamma_{Ff} = 1,15.$$

5 Определение накопленного повреждения D_d

Накопленное повреждение D_d в нижнем поясе фермы определяется по Формуле (А.1) СН РК EN 1993-1-9:

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}};$$

где n_{Ei} – число циклов, соответствующее размаху напряжений цикла $\gamma_{Ff} \cdot \Delta \delta$ для i – го блока во взвешенном спектре;

N_{Ri} – долговечность (в циклах), полученная из взвешенной кривой $\frac{\Delta \delta_c}{\gamma_{Mf}} - N_R$ для размаха напряжений цикла $\gamma_{Ff} \cdot \Delta \delta$;

Долговечность определяется по Пункту 7 СН РК EN 1993-1-9 и по формуле:

$$N_{Ri} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\Delta \delta_c}{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff} \cdot K_1 \cdot \Delta \delta_i} \right)^m$$

Таким образом, долговечность N_{Ri} равна:

$$\text{при } \delta_1 = 100 \text{ Н/мм}^2 \rightarrow N_{R1} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{71}{1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,5 \cdot 100} \right)^5 = 23,62 \cdot 10^3$$

$$\text{при } \delta_2 = 70 \text{ Н/мм}^2 \rightarrow N_{R2} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{71}{1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,5 \cdot 70} \right)^5 = 140,56 \cdot 10^3$$

$$\text{при } \delta_3 = 40 \text{ Н/мм}^2 \rightarrow N_{R3} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{71}{1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,5 \cdot 40} \right)^5 = 230,71 \cdot 10^3$$

Значит, накопленная усталость D_d равна:

$$D_d = \sum_i^3 \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = \frac{n_1}{N_{R1}} + \frac{n_2}{N_{R2}} + \frac{n_3}{N_{R3}} = \frac{10 \cdot 10^3}{23,62 \cdot 10^3} + \frac{100 \cdot 10^3}{140,56 \cdot 10^3} + \frac{1000 \cdot 10^3}{230,71 \cdot 10^3} =$$

$$D_d = 0,423 + 0,711 + 4,334 = 5,468$$

Согласно Формуле (А.2) СН РК EN 1993-1-9:

$$D_d = 5,468 > 1,0$$

Следовательно, нижний пояс фермы не удовлетворяет требованиям по усталостной прочности.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] СН РК EN 1993-1-11-2009. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-11. Проектирование конструкций с элементами, работающими на растяжение.
- [2] EN 12385-2-2009. Стальные проволочные канаты. Безопасность. Часть 2. Определения, обозначения и классификация.
- [3] EN 12385-10-2009. Стальные проволочные канаты. Безопасность. Часть 10. Канаты спиральной свивки для конструкционного применения общего назначения
- [4] EN 12385-4-2009. Стальные проволочные канаты. Безопасность. Часть 4. Многопрядные канаты общего назначения для подъема грузов.
- [5] EN 10138-2-2009. Предварительно напряженные стальные элементы. Часть 2. Проволока.
- [6] СН РК EN 1993-1-1-2009 Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
- [7] JCSS Probabilistic model code. Part 3: Resistance models. 3.04 - Static properties of prestressing steel (prestressed concrete).
- [8] СН РК EN 1993-1-8 Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений.

Ресми басылым

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКА МИНИСТРЛІГІНІҢ
ҚҰРЫЛЫС, ТҰРҒЫН ҮЙ-КОММУНАЛДЫҚ ШАРУАШЫЛЫҚ ІСТЕРІ ЖӘНЕ
ЖЕР РЕСУРСТАРЫН БАСҚАРУ КОМИТЕТІ

**Қазақстан Республикасының
НОРМАТИВТІК–ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**

ҚР НТҚ 03-01-9.1-2011
(ҚР ҚН EN 1993-1-9/2011 әзірленген)

БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ
1-7 бөлімі. Қажу беріктігі

Басылымға жауаптылар: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ

050046, Алматы қаласы, Солодовников көшесі, 21
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – қабылдау бөлмесі

Издание официальное

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО
ХОЗЯЙСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ МИНИСТЕРСТВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НОРМАТИВНО–ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
Республики Казахстан

НТП РК 03-01-9.1-2011
(к СН РК EN 1993-1-5/2011)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Часть 1-7. Усталостная прочность

Ответственные за выпуск: АО «КазНИИСА»

050046, г. Алматы, ул. Солодовникова, 21
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – приемная