



**С. А. Соколов**

# **СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА и МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ МАШИН**



Электронный аналог печатного издания: Соколов С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин : учебник. — СПб. : Политехника, 2011. — 422 с. : ил.

УДК 621.86.01; 629.02  
ББК 34.42  
С59



**ПОЛИТЕХНИКА**  
**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
Санкт-Петербург 2012

[www.polytechnics.ru](http://www.polytechnics.ru)

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по университетскому образованию в качестве учебника для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки  
«Технологические машины и оборудование»*

**Р е ц е н з е н т ы:**

Д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспортные и технологические машины»  
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета  
*К. П. Манжула;*  
кафедра «Подъемно-транспортные машины» Санкт-Петербургского универси-  
тета водных коммуникаций, заведующий кафедрой профессор  
*Е. Н. Андрианов*

**Соколов, С. А.**

**С59** Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник / С. А. Соколов. — СПб. : Политехника, 2012. — 422 с. : ил.

**ISBN 978-5-7325-0969-4**

Представлены методы анализа напряженно-деформированного состояния конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок, методы расчета конструкций по критериям прочности, жесткости, устойчивости, сопротивления усталости и трещиностойкости. Рассмотрены вопросы технологичности, даны приложения общих расчетных методов для проектирования несущих конструкций различных машин.

Книга является учебником по дисциплине «Строительная механика и металлические конструкции», которая входит в состав специальных дисциплин подготовки бакалавров по направлению «Технологические машины и оборудование», а также изучается студентами специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование».

Книга может быть использована проектировщиками металлических конструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин, сельскохозяйственной и буровой техники, специальных транспортных средств, складского оборудования, контейнеров и других объектов.

**УДК 621.86.01; 629.02**  
**ББК 34.42**

**ISBN 978-5-7325-0969-4**

**© С. А. Соколов, 2012**

## О Г Л А В Л Е Н И Е

<b>Введение</b> . . . . .	8
<b>Список сокращений</b> . . . . .	10
<b>Г л а в а 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ</b> . . . . .	11
<b>1.1. Виды металлических конструкций</b> . . . . .	–
<b>1.2. Эксплуатационные воздействия</b> . . . . .	14
<b>1.3. Виды отказов металлических конструкций</b> . . . . .	17
<b>1.4. Последовательность проектирования конструкции</b> . . . . .	21
<b>1.5. Основы расчета конструкций</b> . . . . .	22
1.5.1. Общие положения построения расчетных методик . . . . .	–
1.5.2. Системы инженерных расчетов . . . . .	24
1.5.3. Методы анализа напряженно-деформированного состоя- ния конструкций . . . . .	28
<b>Г л а в а 2. СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ (аналитические методы расчета)</b> . . . . .	33
<b>2.1. Модели стержневых систем</b> . . . . .	–
2.1.1. Основные понятия и допущения . . . . .	–
2.1.2. Кинематический анализ стержневых расчетных схем . . . . .	35
<b>2.2. Определение внутренних усилий в балках и рамах</b> . . . . .	40
2.2.1. Расчет при действии неподвижной нагрузки . . . . .	–
2.2.2. Расчет при действии подвижной нагрузки . . . . .	45
2.2.3. Использование линий влияния для расчета конструкций . . . . .	49
<b>2.3. Определение внутренних усилий в элементах ферм</b> . . . . .	57
2.3.1. Структура и статическая модель фермы . . . . .	–
2.3.2. Расчет ферм при действии неподвижной нагрузки . . . . .	58
2.3.3. Расчет ферм при действии подвижной нагрузки . . . . .	64
<b>Г л а в а 3. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ</b> . . . . .	67
<b>3.1. Основы расчета упругих стержневых систем</b> . . . . .	–
3.1.1. Принцип возможных перемещений . . . . .	–
3.1.2. Работа внешних сил . . . . .	69
3.1.3. Работа внутренних сил . . . . .	71
3.1.4. Теоремы об упругих системах . . . . .	75
<b>3.2. Определение перемещений</b> . . . . .	76
3.2.1. Общая формула перемещений . . . . .	–
3.2.2. Частные случаи определения перемещений . . . . .	78
3.2.3. Методика и примеры определения перемещений . . . . .	79
<b>Г л а в а 4. СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ СИСТЕМЫ</b> . . . . .	85
<b>4.1. Свойства статически неопределимых систем</b> . . . . .	–

<b>4.2. Метод сил для расчета статически неопределимых систем . . .</b>	<b>87</b>
4.2.1. Алгоритм расчета методом сил . . . . .	87
4.2.2. Учет влияния неточностей изготовления и изменения температуры . . . . .	96
<b>4.3. Метод перемещений для расчета статически неопределимых систем . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>4.4. Расчет пластин и оболочек . . . . .</b>	<b>110</b>
4.4.1. Классификация пластин и оболочек . . . . .	—
4.4.2. Модели и примеры расчета пластин под действием поперечных нагрузок . . . . .	112
4.4.3. Модели и примеры расчета оболочек . . . . .	115
<b>4.5. Применение метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций . . . . .</b>	<b>117</b>
4.5.1. Понятие о методе конечных элементов . . . . .	—
4.5.2. Организация и методика конечно-элементного исследования . . . . .	120
4.5.3. Примеры применения МКЭ . . . . .	126
<b>Г л а в а 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .</b>	<b>129</b>
<b>5.1. Общие положения динамики конструкций. Динамические модели . . . . .</b>	<b>—</b>
<b>5.2. Приведение масс . . . . .</b>	<b>132</b>
<b>5.3. Свободные колебания одномассовой системы . . . . .</b>	<b>135</b>
<b>5.4. Моделирование динамических нагрузок . . . . .</b>	<b>138</b>
5.4.1. Динамические нагрузки при работе механизма передвижения . . . . .	—
5.4.2. Динамические нагрузки при работе механизма подъема . . . . .	142
5.4.3. Динамические нагрузки при работе механизма вращения . . . . .	145
5.4.4. Затухание колебаний . . . . .	147
<b>Г л а в а 6. РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ . . . . .</b>	<b>149</b>
<b>6.1. Систематизация нагрузок . . . . .</b>	<b>—</b>
<b>6.2. Режимы работы грузоподъемных машин . . . . .</b>	<b>153</b>
<b>6.3. Весовые нагрузки . . . . .</b>	<b>154</b>
<b>6.4. Динамические нагрузки . . . . .</b>	<b>155</b>
<b>6.5. Климатические нагрузки . . . . .</b>	<b>—</b>
<b>6.6. Технологические нагрузки . . . . .</b>	<b>159</b>
<b>6.7. Специальные нагрузки . . . . .</b>	<b>—</b>
<b>Г л а в а 7. ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .</b>	<b>161</b>
<b>7.1. Общие положения . . . . .</b>	<b>—</b>
<b>7.2. Расчеты на прочность . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>7.3. Сопроотивление конструкций образованию трещин . . . . .</b>	<b>167</b>
<b>Г л а в а 8. ЖЕСТКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .</b>	<b>172</b>

Г л а в а 9. УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .	176
<b>9.1. Явление потери устойчивости элементов конструкций . . . . .</b>	–
<b>9.2. Устойчивость сжатых и сжато-изогнутых стержней . . . . .</b>	177
9.2.1. Центральные сжатые стержни . . . . .	178
9.2.2. Сжато-изогнутые стержни . . . . .	188
<b>9.3. Устойчивость балок при изгибе . . . . .</b>	193
9.3.1. Общие положения . . . . .	–
9.3.2. Расчет балок на общую устойчивость . . . . .	195
<b>9.4. Устойчивость пластин и оболочек . . . . .</b>	197
9.4.1. Общие положения . . . . .	–
9.4.2. Устойчивость прямоугольных пластин, закрепленных по четырем сторонам при одноосном нагружении . . . . .	199
9.4.3. Устойчивость прямоугольных пластин, закрепленных по четырем сторонам, в условиях двухосного напряженного состоя- ния . . . . .	207
9.4.4. Устойчивость прямоугольных пластин, закрепленных по трем сторонам при одноосном сжатии . . . . .	211
9.4.5. Устойчивость цилиндрических оболочек . . . . .	212
Г л а в а 10. СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .	214
<b>10.1. Основные понятия и базовые методики . . . . .</b>	–
10.1.1. Явление усталости конструкций . . . . .	–
10.1.2. Параметры циклического нагружения . . . . .	215
10.1.3. Усталостная кривая . . . . .	216
10.1.4. Исследование сопротивления усталости . . . . .	218
10.1.5. Диаграмма предельных амплитуд напряжений . . . . .	221
10.1.6. Напряжения для расчета на сопротивление усталости	223
10.1.7. Моделирование эксплуатационного нагружения . . . . .	225
10.1.8. Сопротивление усталости при нестационарном нагруже- нии . . . . .	228
10.1.9. Коэффициент циклического нагружения . . . . .	232
<b>10.2. Усталостные характеристики элементов конструкций . . . . .</b>	235
10.2.1. Предел выносливости при симметричном цикле на базе $N_0 = 2 \cdot 10^6$ циклов . . . . .	–
10.2.2. Определение пределов выносливости при произвольном значении коэффициента асимметрии цикла . . . . .	241
10.2.3. Определение пределов выносливости на произвольной базе . . . . .	242
<b>10.3. Методика расчета конструкций на сопротивление усталости</b>	244
10.3.1. Выбор расчетных зон и определение их усталостных ха- рактеристик . . . . .	–
10.3.2. Расчетные нагрузки . . . . .	246
10.3.3. Определение параметров нагружения РЗ . . . . .	247
10.3.4. Условие сопротивления усталости . . . . .	249
<b>10.4. Методы обеспечения сопротивления усталости . . . . .</b>	253

<b>Глава 11. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ</b> . . . . .	256
<b>11.1. Постановка задачи о трещиностойкости конструкций</b> . . . . .	256
<b>11.2. Теоретические основы прогнозирования трещиностойкости конструкций</b> . . . . .	257
11.2.1. Некоторые сведения из механики разрушения . . . . .	—
11.2.2. Коэффициент интенсивности напряжений . . . . .	262
11.2.3. Трещиностойкость конструкций при однократном нагружении . . . . .	263
11.2.4. Трещиностойкость конструкций при циклическом нагружении . . . . .	265
<b>11.3. Расчет долговечности по критерию трещиностойкости</b> . . . . .	269
11.3.1. Моделирование процесса нагружения . . . . .	270
11.3.2. Расчет запаса трещиностойкости . . . . .	—
11.3.3. Определение критического размера трещины . . . . .	271
<b>Глава 12. СТАЛИ И СОРТАМЕНТ</b> . . . . .	275
<b>12.1. Механические и деформационные характеристики сталей</b> . . . . .	—
<b>12.2. Классификация и свойства сталей и проката</b> . . . . .	277
<b>12.3. Выбор сталей для сварных конструкций</b> . . . . .	281
<b>12.4. Сортамент проката</b> . . . . .	284
<b>Глава 13. БАЛОЧНЫЕ (ЛИСТОВЫЕ) КОНСТРУКЦИИ</b> . . . . .	287
<b>13.1. Конструкции балок</b> . . . . .	—
<b>13.2. Напряженное состояние балок</b> . . . . .	289
<b>13.3. Кручение балок</b> . . . . .	296
13.3.1. Общие понятия. Внутренние усилия при кручении . . . . .	—
13.3.2. Геометрические характеристики сечений балок . . . . .	298
13.3.3. Напряженно-деформированное состояние балок при кручении . . . . .	301
<b>13.4. Проектирование балок</b> . . . . .	304
13.4.1. Структура расчета и конструирования балок . . . . .	—
13.4.2. Оптимизация геометрических параметров балок . . . . .	311
<b>13.5. Ездовые балки</b> . . . . .	316
13.5.1. Ездовые балки с катанием по нижнему поясу. . . . .	317
13.5.2. Коробчатые ездовые балки с рельсом посередине пояса . . . . .	320
13.5.3. Ездовые балки с рельсом над стенкой (коробчатые и двутавровые) . . . . .	323
<b>13.6. Проектирование узлов</b> . . . . .	326
13.6.1. Элементы конструкций с отверстиями . . . . .	—
13.6.2. Сопряжения балок и угловые переходы . . . . .	328
13.6.3. Прерывистые связи . . . . .	332
13.6.4. Узлы крепления осей . . . . .	333
<b>Глава 14. ФЕРМЫ</b> . . . . .	335
<b>14.1. Конструкции ферм</b> . . . . .	—

<b>14.2. Напряженное состояние ферм</b> . . . . .	338
<b>14.3. Проектирование ферм</b> . . . . .	343
14.3.1. Выбор сечений стержней . . . . .	–
14.3.2. Проектирование узлов . . . . .	346
14.3.3. Сопротивление усталости элементов ферм . . . . .	347
<b>Г л а в а 15. СОЕДИНЕНИЯ</b> . . . . .	349
<b>15.1. Сварные соединения</b> . . . . .	–
15.1.1. Конструкции, свойства и качество сварных соединений . . . . .	–
15.1.2. Расчеты сварных соединений . . . . .	353
<b>15.2. Болтовые соединения</b> . . . . .	360
15.2.1. Общие положения . . . . .	–
15.2.2. Фланцевые болтовые соединения . . . . .	361
15.2.3. Болтовые соединения с продольным стыком . . . . .	367
<b>15.3. Шарнирные соединения</b> . . . . .	375
<b>Г л а в а 16. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ</b> . . . . .	379
<b>16.1. Технологические требования к конструкции</b> . . . . .	–
<b>16.2. Технология изготовления балок</b> . . . . .	383
<b>16.3. Галереи, площадки и лестницы</b> . . . . .	386
<b>16.4. Транспортировка машин и конструкций</b> . . . . .	387
<b>Г л а в а 17. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ МАШИН</b> . . . . .	390
<b>17.1. Металлические конструкции кранов мостового типа</b> . . . . .	–
17.1.1. Устройство конструкций . . . . .	–
17.1.2. Особенности расчета . . . . .	396
<b>17.2. Металлическая конструкция одноковшового гидравлического экскаватора</b> . . . . .	405
17.2.1. Устройство конструкции . . . . .	–
17.2.2. Особенности расчета . . . . .	409
<b>17.3. Конструкция вышки ножничного типа</b> . . . . .	416
17.3.1. Устройство конструкции . . . . .	–
17.3.2. Особенности расчета . . . . .	417
<b>Список литературы</b> . . . . .	422

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

---

### 1.1. ВИДЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

*Несущей металлической конструкцией* называют основное формообразующее сооружение или систему элементов машины, которые воспринимают и передают на основание все нагрузки, действующие на машину, а также обеспечивают силовое и кинематическое взаимодействия ее механизмов. Для мостовых кранов это пролетное строение, для экскаваторов — стрела, ходовая и поворотная рамы и т. д. На металлической конструкции закрепляются механизмы, электро- и гидрооборудование, двигатель, кабина и др. Опирается металлическая конструкция на фундамент или ходовую часть (колеса либо гусеницы). Вспомогательными конструкциями являются лестницы и галереи, каркасы кабин и машинных помещений, кронштейны, поддерживающие механизмы и пр. Металлические конструкции кранов и экскаваторов составляют в большинстве случаев 50–80 % массы и 30–70 % себестоимости, а их долговечность обычно определяет срок службы машины в целом. Поэтому качество проектирования и изготовления конструкции существенно влияет на стоимость и эксплуатационные свойства машины.

Выбор типа конструкции, ее компоновка и детальное конструктивное оформление производятся в процессе общего проектирования машины в комплексе с основными механизмами, приводами, ходовой частью и другими элементами. В связи с этим универсальных методов создания общего облика конструкции не существует. Процесс создания конструкции в основном определяется особенностями машины и функциональными требованиями, а также условиями эксплуатации, экономическими условиями конкретного производства, требованиями эстетики и др.



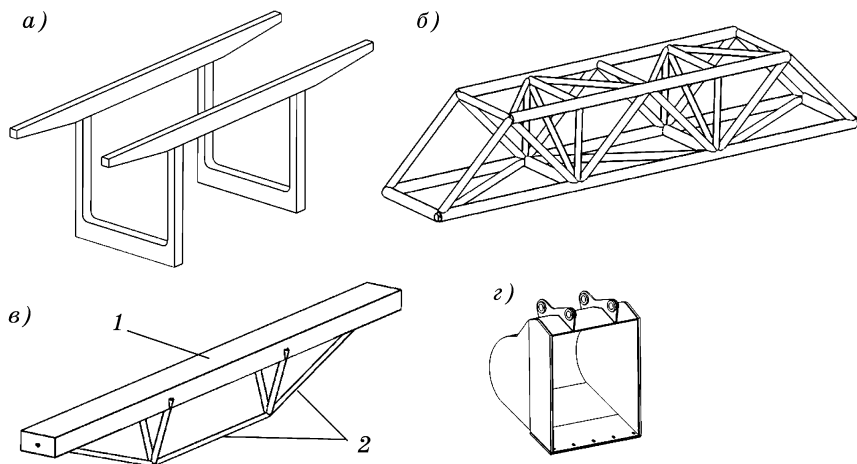
Несущие конструкции можно подразделить на неизменяемые и изменяемые (кинематические). Элементы *неизменяемых конструкций* не меняют своего относительного положения и могут перемещаться только совместно, как единое целое. К таким конструкциям относятся конструкции мостовых и козловых кранов, рамы гусеничных тракторов, автомобилей и др. *Изменяемые конструкции* представляют собой механизмы, элементы которых могут перемещаться друг относительно друга под действием приводов. Примерами таких конструкций являются стреловые системы кранов, экскаваторов и подъемников, шарнирно-сочлененные рамы скреперов и пр.

К несущим конструкциям предъявляются следующие требования:

- функциональные требования (обеспечения определенного пролета или вылета, размещения механизмов, реализации определенного набора движений и пр.);
- требования обеспечения надежности и эксплуатационной пригодности в заданных условиях эксплуатации (т. е. прочности, устойчивости, долговечности, жесткости, живучести);
- возможность транспортировки, монтажа и обслуживания машины в процессе эксплуатации;
- экономические требования, направленные на минимизацию затрат на изготовление, монтаж и эксплуатацию.

Многообразие типов и конфигураций несущих конструкций затрудняет их четкую классификацию. По структуре и принципам образования несущие конструкции машин условно можно разделить на следующие виды.

*Балочные и рамные конструкции* представляют собой отдельные балки или рамы, т. е. системы балок, соединенных друг с другом шарнирными или жесткими связями. Они обычно изготавливаются из листового проката. Основным силовым фактором, вызывающим наибольшие напряжения в элементах этих конструкций, как правило, являются изгибающие моменты. Дополнительные напряжения создаются продольными и поперечными усилиями и крутящими моментами. Балочно-рамными являются конструкции многих мостовых и козловых кранов (рис. 1.1, а), стрелы порталных кранов и экскаваторов, рамы скреперов, платформы и пр.



**Рис. 1.1.** Основные типы конструкций

*Ферменные конструкции* — это стержневые системы, состоящие из треугольных панелей (рис. 1.1, б). Такая структура приводит к тому, что при узловом приложении нагрузок стержни ферм в основном загружаются продольными усилиями. Для изготовления стержней обычно используются фасонный прокат или трубы. Ферменные конструкции используют в башенных и козловых кранах, конвейерных эстакадах и др.

*Шпренгельные и балочно-ферменные конструкции* являются гибридными (комбинированными). Шпренгельная конструкция состоит из главной балки 1, усиленной стержневой системой 2, которую называют шпренгелем (рис. 1.1, в). Такое усиление существенно повышает жесткость конструкции и снижает напряжения в балке от изгиба. Элементы шпренгельной системы в основном загружаются продольными усилиями. Эти конструкции используют в стрелах порталных кранов и шагающих экскаваторов, пролетных строениях козловых кранов и пр. В балочно-ферменной конструкции балка используется для восприятия местных нагрузок, а ферма обеспечивает пространственную жесткость системы.

*Оболочечными* или *пластинчатыми* называют пространственные, сплошностенчатые конструкции, несущими элементами которых являются пластины или оболочки. К ним

относятся цистерны, сосуды давления, бункеры, ковши и пр. (рис. 1.1, з).

Достоинствами балочно-рамных конструкций являются: высокая технологичность, связанная с возможностью применения автоматической сварки и меньшей номенклатурой используемого проката; значительно лучшая приспособленность для работы в условиях низких температур и интенсивных циклических нагрузок. Недостатком является бóльшая металлоемкость по сравнению с ферменными и шпренгельными конструкциями.

Основное преимущество ферменных конструкций по сравнению с балочно-рамными заключается в том, что они имеют меньшую массу, особенно в конструкциях большого пролета, загруженных в значительной степени собственным весом. Кроме того, ферменные конструкции обычно получаются жестче, правда, в основном за счет больших габаритных размеров поперечного сечения. Дополнительными достоинствами являются меньшие наветренные и покрасочные площади. Недостатки этого типа конструкций связаны с низкой технологичностью из-за большой номенклатуры используемого проката, применения ручной сварки и сложной процедуры сборки, что влечет за собой нестабильное качество. Сложная конфигурация и многочисленные узлы с короткими швами создают высокую концентрацию напряжений, что обуславливает низкую хладостойкость и плохое сопротивление усталости. Габаритные размеры сечений, большие, чем у балочно-рамных конструкций, также ограничивают область применения ферм.

Поскольку шпренгельные и балочно-ферменные конструкции представляют собой комбинированный вид, то соотношение их достоинств и недостатков зависит от качества найденного конструктивного решения.

## 1.2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В процессе эксплуатации конструкции подвергаются механическим (силовым и кинематическим) и физико-химическим воздействиям. Основными воздействиями являются

силовые, которые называют *нагрузками* (гл. 6). Кинематические воздействия — это заданные перемещения определенных точек конструкции. Нагрузки и кинематические воздействия создают в элементах конструкции внутренние усилия и деформации.

По характеру изменения во времени нагрузки можно разделить на постоянные и переменные. *Постоянными* являются нагрузки, которые во времени не изменяются по значению, направлению и месту приложения к конструкции. Если изменение силы или заданного перемещения происходит с большой скоростью, то это вызывает колебание конструкции, и такое воздействие называют *динамическим*.

Совокупность нагрузок, одновременно приложенных к конструкции, называют *комбинацией нагрузок*. Для проектировочных расчетов выбирают наиболее опасные реально возможные комбинации нагрузок.

Физико-химические воздействия являются сопутствующими. Они влияют на свойства конструкции и тем самым в той или иной степени способствуют развитию повреждения от силовых воздействий. Наиболее типичными физико-химическими воздействиями считаются тепловые и коррозионные.

Тепловые воздействия создают в конструкции температурные поля, обычно переменные по объему конструкции и изменяемые во времени. Эти поля вызывают появление неравномерных температурных деформаций и дополнительных напряжений. В зависимости от причин, их порождающих, эти воздействия делятся на климатические и технологические.

*Климатические тепловые воздействия* на конструкцию связаны с природными факторами, изменением температуры окружающего воздуха и солнечного теплоизлучения. Параметры климатических воздействий для инженерных расчетов нормированы. Территория Земли разделена на зоны, каждая из которых характеризуется соответствующим типовым климатом (ГОСТ 15150–69). В зависимости от климата, для которого предназначены изделия, они изготавливаются в исполнении: У — для умеренного климата, ХЛ — для холодного климата, УХЛ — для умеренного и холодного климата, М — для умеренно-холодного морского, кото-

рый распространяется на акватории морей и океанов севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты и др. Территория России расположена в зонах умеренного, холодного и умеренно-холодного морского климата.

Параметры климатических воздействий на технику зависят также от условий ее размещения. Установлено пять типовых категорий размещения техники: 1 — на открытом воздухе; 2 — под навесом или в помещении без теплоизоляции; 3 — в закрытом помещении с естественной вентиляцией; 4 — в помещении с искусственными климатическими условиями; 5 — в помещениях с повышенной влажностью (подвалы, шахты). Требования к уровню стойкости при действии климатических факторов определяются сочетанием показателей климатического исполнения и категории размещения техники и обозначаются, например, как У1 или ХЛ2 (ГОСТ 15150–69). Наиболее значительным негативным климатическим фактором для металлических конструкций является низкая температура. Минимальные рабочие температуры, установленные для различных условий эксплуатации, приведены в табл. 1.1.

*Технологические тепловые воздействия* в основном сводятся к нагреву элементов конструкции от источников тепла, расположенных вблизи нее. Такими источниками являются, например, металлургические печи, трубопроводы, заполненные теплоносителем, жидкий металл, транспортируемый краном в ковше. Тепловые воздействия учитываются при выборе марки стали для конструкции. Для защи-

Т а б л и ц а 1.1

**Минимальные рабочие температуры воздуха по ГОСТ 15150–69, °С**

Климат	Исполнение	Категория размещения				
		1	2	3	4	5
Умеренный	У	-45*	-45*	-10	+1	-5
Холодный	ХЛ	-60	-60	-10	+1	-10
Умеренно-холодный морской	М	-40	-40	-40	-10	-40

\* Для изделий, которые могут иметь перерывы в работе, в том числе для большинства грузоподъемных машин, минимальная рабочая температура может приниматься равной -40 °С.

ты конструкций от локальных тепловых воздействий используют тепловые экраны.

Коррозионное воздействие на конструкции машин в основном связано с состоянием атмосферы, наличием в ней агрессивных примесей и влаги. В наибольшей степени ускорению коррозии способствует влажность, а также присутствие в атмосфере сернистого газа  $\text{SO}_2$ , хлористых солей (в приморских районах), хлора, сероводорода, аммиака, паров кислот и прочих соединений, которые попадают в атмосферу промышленных предприятий.

### 1.3. ВИДЫ ОТКАЗОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Техническое состояние конструкции в процессе эксплуатации зависит от совокупности внешних и внутренних факторов. *Внешними факторами* являются механические и физико-химические воздействия. К *внутренним факторам* относятся свойства материала, конфигурация и размеры конструкции, качество изготовления, накопленные повреждения и пр. Неблагоприятное сочетание внешних и внутренних факторов создает условия для возникновения отказов, т. е. для нарушения эксплуатационной пригодности конструкции. Эти отказы делятся на *внезапные*, возникающие в результате процессов, которые развиваются за время, пренебрежимо малое по сравнению со сроком службы изделия, и *постепенные*, которые обусловлены медленным изменением состояния объекта за время, сопоставимое со сроком службы.

В большинстве случаев отказ формируется в результате нескольких одновременно протекающих процессов, характер протекания и интенсивность которых зависит от совокупности воздействий и свойств изделия. Так, развитие усталостного повреждения интенсифицируется в коррозионной среде, механический износ ускоряется в условиях низких температур, хрупкому разрушению обычно предшествует усталостное повреждение. Далее кратко рассмотрены характерные особенности процессов и явлений, приводящих к отказам, и факторы, влияющие на их развитие.

*Пластическая деформация* возникает при местных или общих перегрузках конструкции, когда напряжения превышают предел текучести, а материал находится в пластичном состоянии. Пластическая деформация в небольших объемах не опасна. Она обычно происходит в сварных швах и в зонах концентрации напряжений при первых нагружениях конструкции. Однако значительная пластичность приводит к искажению размеров и формы конструкции, снижению запаса пластичности материала, а при дальнейшем развитии переходит в вязкое разрушение элемента конструкции.

Для защиты от данного повреждения на основании проектировочного расчета на прочность выбирают такие размеры и материал конструкции, которые обеспечат невозникновение чрезмерных пластических деформаций при заданном уровне эксплуатационных нагрузок (п. 7.2).

*Хрупкое разрушение* происходит в области максимальных растягивающих напряжений, если развитие пластических деформаций материала затруднено. Факторами, затрудняющими пластическое деформирование, являются низкая температура, высокая скорость нагружения и большие толщины элементов конструкции. Опасность хрупкого разрушения связана с тем, что оно может происходить при номинальных напряжениях, меньших предела текучести, и приводить к внезапной потере несущей способности конструкции.

Для предупреждения возникновения хрупких трещин необходимо снижать концентрацию напряжений и выбирать стали, сохраняющие пластичность при наименьшей допустимой температуре эксплуатации (п. 7.3, 12.3).

*Потеря устойчивости* (общей и местной) представляет собой искажение плоской или прямолинейной формы деформирования элемента конструкции под действием сжимающих напряжений, сопровождающееся существенным снижением его жесткости. Потере устойчивости подвержены сжатые стержни ферм, изгибаемые балки незамкнутого сечения и сжатые элементы тонкостенных конструкций. Этот вид отказа происходит при перегрузках, сопровождается снижением несущей способности элемента и конструкции в целом.

Устойчивость элементов конструкций обеспечивают выбором соответствующих геометрических параметров сечения или установкой ребер жесткости (гл. 9).

*Усталостное повреждение* постепенно накапливается в зонах концентрации напряжений в процессе циклического нагружения. Усталостное повреждение сначала проходит в скрытой форме вплоть до образования начальной трещины. При дальнейшем нагружении размер трещины увеличивается, что может привести к полному разрушению конструкции. Наибольшее влияние на скорость развития усталостного повреждения оказывают концентрация напряжений и амплитуда действующих напряжений.

Для защиты конструкции от усталостного повреждения следует, по возможности, снижать концентрацию напряжений, уменьшать амплитуду изменения номинальных напряжений и обеспечивать качественное изготовление конструкции (гл. 10).

*Коррозионное повреждение* — явление разрушения поверхности детали в результате химического или электрохимического взаимодействия материала со средой. Коррозия приводит к снижению несущей способности конструкции за счет уменьшения сечения конструктивного элемента и образования трещин, а также способствует ускорению развития усталостного повреждения. Скорость коррозии возрастает в области контакта двух разнородных металлов, обладающих разными электрическими потенциалами (например, сталь и алюминий), в области концентрации напряжений, в местах скопления грязи и влаги. Большую опасность представляет щелевая коррозия, которая происходит в местах постоянного контакта двух элементов конструкции, например при нарушении герметичности болтовых и заклепочных соединений. При этом продукты коррозии, имеющие больший объем, чем металл, из которого они образовались, распирают стык, что приводит к разрушению узла.

Основным способом защиты несущих конструкций от коррозии является применение защитных лакокрасочных или металлических покрытий. Конструкции, предназначенные для работы на открытом воздухе, должны быть спроектированы так, чтобы в них не было карманов и желобов, в кото-



рых скапливаются вода, пыль и грязь. Защита от коррозии емкостей и трубопроводов, соприкасающихся с агрессивными жидкостями и газами, рассматривается в специальной литературе.

*Изнашивание* — постепенное изменение размеров и формы тела в результате удаления частиц материала с его поверхности или его остаточной деформации при трении о другое тело. Изнашиванию подвержены рабочие органы строительных машин, ходовые части, шарнирные узлы конструкций, а также рельсы и направляющие. Изнашиваемые элементы, как правило, делают заменяемыми.

Снижению скорости износа способствуют рациональная конструкция узла трения, обоснованный выбор материалов, термообработка, повышение точности изготовления и монтажа и пр.

*Чрезмерные* (по величине или времени затухания) *упругие деформации* несущих конструкций могут приводить к нарушению работы расположенных на них механизмов, снижению производительности машины, а также оказывать вредное воздействие на самочувствие оператора. Необходимая жесткость конструкции достигается увеличением моментов инерции сечений.

*Ползучесть* — непрерывное возрастание деформаций под действием постоянных длительно действующих нагрузок. Скорость ползучести оказывается тем больше, чем выше действующие напряжения и температура конструкции. Другим проявлением ползучести является *релаксация*, которая заключается в уменьшении остаточных напряжений. Ползучесть, релаксация остаточных сварочных напряжений и ремонт с применением сварки приводят к необратимому изменению формы конструкции.

Пластическая деформация, хрупкое разрушение, потеря устойчивости становятся причинами внезапных отказов, а усталостное и коррозионное повреждения, износ и ползучесть — постепенных. Чрезмерные упругие деформации конструкции нарушают процесс нормальной эксплуатации, но не являются повреждением. Они возникают в результате ошибки конструктора. При проектировании необходимо на основании накопленного опыта и анализа условий эксплуа-

тации выбрать из представленного списка виды повреждений, возможные для данной конструкции, и предпринять меры защиты от них.

#### **1.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ**

В процессе проектирования должны быть найдены конструктивно-технологические решения, которые обеспечат выполнение всех требований, предъявляемых к конструкции (п. 1.1). В общем случае проектирование целесообразно выполнять по следующей схеме.

1. Проектирование начинают с выбора типа конструктивного решения и создания общего образа конструкции исходя из компоновки машины в целом с учетом функциональных требований, конструктивных ограничений и технологических возможностей предприятия, а также опыта проектирования подобных машин. Определяют виды проката, которые могут быть использованы для изготовления основных элементов конструкции, т. е. листовой или фасонный прокат, трубы, гнутые профили и пр. Предварительно устанавливают марку стали или перечень сталей, которые могут быть применены.

2. Определяют эксплуатационные воздействия, формируют расчетные комбинации нагрузок и составляют таблицу нагрузок (п. 6.1). Устанавливают расчетные положения и направления подвижных и переменных нагрузок. Для изменяемых конструкций определяют расчетные положения их частей, при которых можно ожидать возникновения наибольших напряжений в элементах.

3. Производят предварительную оценку геометрических параметров сечений по условию прочности (гл. 7). Расчет на прочность начинают с наиболее нагруженных сечений основных элементов конструкций.

4. Проверяют выполнение условия жесткости, которое устанавливает ограничение упругих прогибов от действия переменных нагрузок (гл. 8). При необходимости изменяют параметры сечений элементов конструкции, которые

вносят наибольший вклад в расчетное перемещение. По результатам анализа расчетов на прочность и жесткость оценивают рациональность выбранного материала и при необходимости корректируют решение (п. 12.3).

5. Проверяют общую устойчивость балок открытого сечения и сжатых стержней (п. 9.2, 9.3). При отрицательных результатах расчета изменяют сечение этих элементов или вводят дополнительные связи.

6. Проверяют местную устойчивость тонкостенных элементов конструкции, в которых действуют наибольшие напряжения сжатия, сдвига и их комбинации (п. 9.4). Если условие местной устойчивости не выполняется, то принимают решение об изменении их размеров или размещении ребер и диафрагм.

7. Проверочный расчет на сопротивление усталости выполняют для основных сечений конструкции, подвергаемых интенсивному циклическому нагружению (гл. 10). Если долговечность конструкции окажется меньше требуемой, то корректируют конструктивно-технологическое решение.

8. В процессе проектирования отдельных узлов конструкции производят расчет на прочность и сопротивление усталости сварных соединений, узлов, воспринимающих местные нагрузки, шарнирных узлов, монтажных соединений, кронштейнов и пр. (гл. 13–15).

## 1.5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ

### 1.5.1. Общие положения построения расчетных методик

Расчет конструкции по различным критериям работоспособности по существу является математическим моделированием ее свойств и поведения под воздействием внешних факторов. *Модель* — это условный (упрощенный) образ реального объекта (системы, процесса), адекватно отражающий его свойства, существенные для целей данного исследования. Но, как известно, все модели и исходные данные, используемые в расчетах, являются приближенными

оценками некоторых реальных величин и процессов. На стадии проектирования точно не известны ни эксплуатационные нагрузки, ни свойства стали, ни качество изготовления конструкции и т. д. Поэтому инженерный расчет неизбежно будет иметь некоторую погрешность, однако эта погрешность, как говорят, должна «идти в запас надежности».

Инженерные проверочные и проектировочные расчеты по любому критерию работоспособности строятся в форме требования выполнения неравенства двух параметров. Один параметр ( $\Lambda$ ) характеризует фактическое состояние или поведение конструкции, а другой ( $\Phi$ ) — предельное состояние. Так, сравнивается действующее напряжение с допускаемым напряжением, долговечность — с требуемой долговечностью, прогиб — с допустимым прогибом. В зависимости от характера критерия работоспособности это условие имеет вид неравенства

$$\Lambda \leq \Phi \text{ или } \Lambda \geq \Phi. \quad (1.1)$$

Для обеспечения надежности такого расчета структура расчетных условий и правила определения значений величин  $\Lambda$  и  $\Phi$  должны быть построены так, чтобы выполнение условия (1.1) гарантировало с высокой вероятностью невозникновение отказа в реальной конструкции, если она качественно изготовлена и эксплуатируется в нормативных условиях. При этом чем тяжелее последствия возможного отказа, тем больше должна быть вероятность его невозникновения.

Типовые инженерные расчеты металлических конструкций строят на основе следующих допущений:

- а) материал конструкции идеально упругий;
- б) размеры и форма конструкции полностью соответствуют проекту;
- в) перемещения, возникающие под действием нагрузок, весьма малы по сравнению с габаритными размерами поперечных сечений;
- г) напряженное состояние конструкции обусловлено только эксплуатационными воздействиями (т. е. не учитываются остаточные напряжения от сварки, гибки, соединений с натягом и пр.).