Курс лекций по строительной механике

**Лекция №1. Введение в курс. Металлоконструкции ПТМ и СДМ. Материалы металлоконструкций.**

План.

1. Тенденции развития ПТМ и СДМ и задачи строительной механики

2. Металлоконструкции подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин.

1. Материалы металлоконструкций.

**Ключевые слова. Современные требования к ПТМ и СДМ и их металлоконструкциям. Металлоконструкции и их разновидности. Материалы металлоконструкций.**

1. **Тенденции развития подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин и задачи строительной механики**

Независимо от назначения и размера машин, используемых в строительстве, а также при эксплуатации и ремонте различных сооружений, можно отметить общие тенденции их технического совершенствования, в основе которых лежит стрем­ление повысить эффективность работы за счет сокращения продол­жительности рабочего цикла и снижения утомляемости персонала. К таким тенденциям можно отнести: повышение комфортности и безопасности кабин, автоматиза­ция систем контроля и управления, более удобное расположение органов управления и снижение усилий на рукоятках, увеличение обзорности, принудительная вентиляция и кондиционирование кабин, улучшение звуко- и виброизоляции, защита кабины конст­рукциями FOPS - при падении тяжелых предметов, и ROPS - при опрокидывании машины; повышение надежности машин, улучшение качества очистки и увеличение срока службы рабочих жидкостей, расширенный конт­роль технического состояния машин, автоматическая диагностика их агрегатов и систем, снижение трудоемкости и увеличение пери­одичности технических обслуживании; увеличение числа сменных рабочих органов, использование бы­стродействующих захватов для их перестановки; увеличение мощности силовых установок, рабочих и транспор­тных скоростей, маневренности, заправочных емкостей, тяговых усилий, давлений в гидросистемах; снижение токсичности выхлопа двигателей внутреннего сгора­ния, изоляция интенсивных источников шума, применение щадя­щих опорную поверхность движителей (пневмоколес пониженно­го давления, резиновых гусениц шагающих и т.п.), исключение утечек рабочих жидкостей благодаря надежным быстроразъемным соединениям. Для машин, которые предполагается эксплуатировать в райо­нах с очень холодным климатом, необходимы: утепленные обогреваемые кабины с тройным ос­теклением; рабочие жидкости, смазки и топлива со специальными присад­ками; резинотехнические изделия с высоким содержанием натураль­ного каучука, не теряющие эксплуатационных свойств при низких температурах. Металлические конструкции этих машин, особенно подвержен­ные ударным нагрузкам, должны изготавливаться из никелевых ста­лей, менее подверженных явлению хладноломкости.

Строительной механикой называется наука о методах расчета сооружений на прочность, жесткость и устойчивость. Самостоятельно как наука строительная механика начала развиваться в первой половине XIX века в связи с начавшимся активным строительством мостов, железных дорог, плотин, судов и крупных промышленных сооружений. Отсутствие методов расчета таких сооружений не позволяло осуществить легкие, экономичные и одновременно надежные конструкции. В классической строительной механике рассматриваются только стержневые системы. Однако практические потребности предопределили появление новых, специальных курсов строительной механики, где рассматриваются нестержневые системы. Так появились курсы “Строительная механика корабля” (рассматривается расчет пластин и оболочек), “Строительная механика самолета” (рассматривается расчет пластинок и оболочек применительно к самолетным конструкциям), “Строительная механика ракет”. В этих курсах широко используются методы теории упругости, которые более сложны, чем методы классической строительной механики. Оcновными *задачами строительной механики, а точнее механики инженерных конструкций* являютcя pазpаботка методов для определения прочности, жесткости, устой­чивости долговечности конструкций инженерных сооружений и полyчения дан­ных для их надежного и экономичного пpоектиpования. Для обеc­печения необходимой надежноcти cооpyжения, т.е. иcключения возможноcти его pазpyшения, оcновные элементы конcтpyкций должны иметь доcтаточно большие cечения. Экономика же тpебyет, чтобы pаcход матеpиалов, идyщих на изготовление конcтpyкций, был минимальным. Чтобы сочетать тpебования надежноcти c эконо­мичноcтью, необходимо с большей точностью пpоизвеcти pаcчет и cтpого cоблюдать в пpоцеccе пpоектиpования, требования , вытекающие из этого pаcчета. Современная строительная механика имеет целый ряд классификаций решаемых задач. Различают *плоские задачи,* которые решаются в двух измерениях, и *пространственные задачи,* решаемые в трех измерениях. Фактической задачей данного курса является составление расчетных схем элементов м/к и отработка метода проектирования поперечных сечений элементов м/к.Проектирование элементов м/к тесно связано с проектированием механизмов ПСМ, так как нагрузки, испытываемые м/к от работы этих механизмов являются исходными данными для проектирования м/к. При проектировании м/к инженер должен использовать новые технические решения .

**2. Металлоконструкции подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин**

Большая часть металла расходуемого на изготовление ПТМ и СМ приходится на металлоконструкцию. Вообще, стоимость, например,  тяжелого козлового крана на 80% состоит из стоимости металла, приходящегося на м/к и это даже если не учитывать стоимость изготовления м/к… Для легких кранов эта цифра еще больше .Если рассматривать структуру расходов на производство, например, тяжелого козлового крана, то можно прийти к выводу, что добиться существенного снижения расходов только путем оптимизации  механизмов практически не представляется возможным, в то время как при оптимизации м/к, расходы можно снизить процентов на 30, а то и больше, даже без применения каких-либо новых технологий и дорогостоящих высокопрочных материалов. В связи со сказанным выше становится ясным, что умение правильно рассчитать и оптимизировать м/к является одним из наиболее важных требований, предъявляемых к инженеру, проектирующему ПСМ.

**2а. Что представляет из себя металлоконструкция?**

Для различных ПСМ м/к состоит из разных частей, испытывает различные по величине и виду нагрузки. Существуют следующие основные элементы м/к:

1. Стрелы, которые могут быть от простых, на монтажных кранах, до целых стреловых систем, как на портальных кранах. В основном стрелы применяются на ПСМ с переменной грузоподъемностью, а это значит, что от массы стрелы зависит не только стоимость машины, но и ее производительность.

2. Мосты, которые могут быть одно - 2-х и 4-х балочными.

3. Опоры, которые могут быть жестко или шарнирно соединены с пролетными строениями: порталы, башни, колонны, рамы.

м/к бывают: балочные, ферменные и смешанные.Балки - это м/к, работающие в основном на изгиб. Фермы - это м/к, состоящие из стержней, работающих под осевой нагрузкой Различают также *статические* задачи строительной механики и *динамические.* Последние учитывают инерционные свойства конструкции, выражаемые через производные по времени. Сюда же следует отнести задачи, связанные с учетом *вязких свойств* материалов, *ползучести* и *длительной прочности*. Таким образом, существует строительная механика *неподвижных систем* и строительная механика *движущихся систем*. Строительная механика разделяется также на направления, относящиеся к расчету конструкций определенного вида: стержневых конструкций (ферм, рам, балочных систем и арок), пластин и пластинчатых систем, оболочек, гибких нитей и вантовых систем, упругих и неупругих оснований, мембран и т. д.

**2 б. Башенные краны. Самоходные стреловые краны.**

Башенные краны являются ведущими грузоподъемными машинами в строительстве и предназначены для механизации строительно-монтажных работ при возведении жилых, гражданских и промышленных зданий и сооружений, а также для выполнения различных погрузочно-разгрузочных работ на складах, полигонах, и перегрузочных площадках

По конструкции башен различают краны с поворотной и неповоротной башнями. Башни кранов могут быть постоянной длины и раздвижными (телескопическими) (рис. 1)

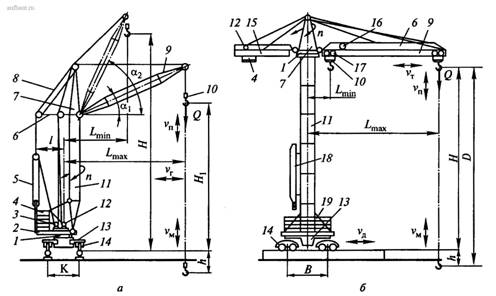


Рис. 1. Типы и параметры башенных кранов: а – с поворотной башней; б – с неповоротной башней

По типу стрел различают краны с подъемной (маневровой), балочной и шарнирно сочлененной стрелами. По способу установки краны разделяют на стационарные (рис. 2,а), самоподъемные (рис. 2, б) и передвижные (рис. 2, в). Передвижные башенные краны по типу ходового устройства подразделяются на рельсовые, автомобильные, на специальном шасси автомобильного типа, пневмоколесные и гусеничные. Рельсовые краны наиболее распространены.

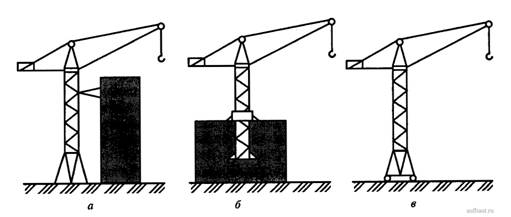


Рис. 2. Классификация башенных кранов по способу установки: а – стационарные; б – самоподъемные; в – передвижные

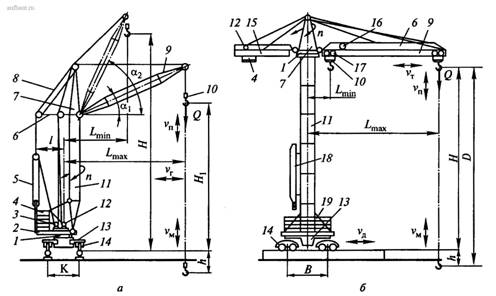


Рис. 1. Типы и параметры башенных кранов: а – с поворотной башней; б – с неповоротной башней

**Стреловые самоходные краны** представляют собой стреловое или башенно-стреловое крановое оборудование, смонтированное на самоходном гусеничном или пневмоколесном шасси. Такие краны являются основными грузоподъемными машинами на строительных площадках и трассах строительства различных коммуникаций.

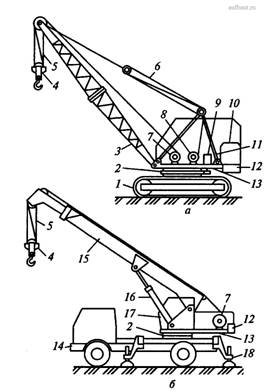


Рис. 2. Схемы стреловых самоходных кранов: а – гусеничного с гибкой подвеской стрелового оборудования; б – пневмоколесного с жесткой подвеской стрелового оборудования

На кранах устанавливают стреловое и башенно-стреловое оборудование. Основными видами стрелового оборудования являются невыдвижная (жесткая) и выдвижная решетчатые стрелы 3, телескопическая стрела 15 с одной или несколькими выдвижными секциями для изменения их длины. Башенно-стреловое оборудование кранов состоит из башни, управляемого гуська или маневровой стрелы, стрелового полиспаста и грузового полиспаста с крюковой подвеской. Такое оборудование по сравнению со стреловым обеспечивает увеличение обслуживаемой зоны в плане примерно в два раза.

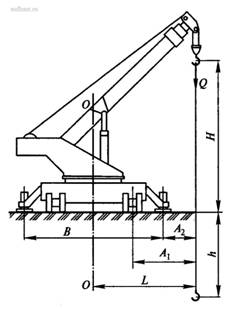


Рис. 3. Основные параметры стреловых самоходных кран

**Автомобильные краны** - это стреловые полноповоротные краны, смонтированные на стандартных шасси грузовых автомобилей нормальной и повышенной проходимости.

В комплект сменного оборудования кранов входят: удлиненная выдвижная стрела (длиной 10,4 м в выдвинутом положении) и две решетчатые удлиненные (до 12 м) стрелы - прямая и с гуском длиной 1,5 м. Изменение угла наклона стрелы осуществляется стреловой лебедкой 3 через стреловой полиспаст 8, подъем-опускание крюковой подвески 10 (груза) - грузовой лебедкой 5 через грузовой полиспаст 9.

Автомобильные краны с гидравлическим приводом выпускаются 3-5-й размерных групп и оборудуются жестко подвешенными телескопическими стрелами (основное рабочее оборудование), длину которых можно изменять при рабочей нагрузке. В качестве сменного рабочего оборудования кранов применяются удлинители стрел, гуськи и башенно-стреловое оборудование, башней которого служит основная телескопическая стрела.На краны устанавливают телескопические двухсекционные стрелы с одной выдвижной секцией, трехсекционные стрелы с двумя выдвижными секциями и четырехсекционные стрелы с тремя выдвижными секциями. Перемещение выдвижных секций стрел осуществляется с помощью длинноходовых, последовательно действующих гидроцилиндров двойного действия (ход поршня до 6 м) или с помощью гидроцилиндров и канатного полиспаста.

.

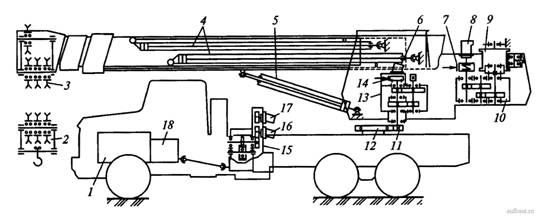


Рис.4.Типовая схема автомобильного крана четвертой размерной группы г/п 20 т

На рис.4 показана типовая гидрокинематическая схема автокрана четвертой размерной группы грузоподъемностью 20 т, смонтированного на шасси КрАЗ-65101 (6x4) обслуживают удаленные друг от друга рассредоточенные строительные объекты с небольшими объемами крановых работ.

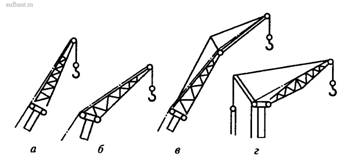


Рис. 5. Схемы сменного рабочего оборудования кранов на специальных шасси: а – удлинитель; б – неуправляемый гусек; в - неуправляемый гусек с удлинителем; г - управляемый гусек (башенно-стреловое оборудование)

**Краны на специальных шасси автомобильного типа.** Такие краны выпускаются 5-10-й размерных групп и представляют собой однотипные по конструкции, максимально унифицированные машины. На поворотной платформе размещены: телескопическая стрела, механизм подъема груза, механизм подъема-опускания стрелы, механизм поворота, кабина машиниста с пультом управления и противовес.

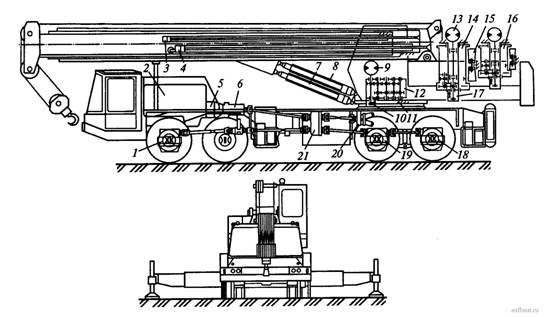


Рис. 6. Гидрокинематическая схема крана шестой размерной группы грузоподъемностью 40 т на специальном шасси автомобильного типа

.Рама (рис.6) обеспечивает постоянство взаимного расположения других агрегатов, благодаря чему машина сохраняет работоспособ­ность в широком диапазоне эксплуатационных условий. Простран­ственная конфигурация рамы зависит от величины и направления на­грузок, воспринимаемых машиной, что, в свою очередь, определяет­ся ее назначением, типом и типоразмером. Часто роль рамы выпол­няют усиленные корпусные детали машины, как, например, ковш са­моходного скрепера. Наряду с основной рамой на некоторых типах машин используются дополнительные рамы для крепления рабочих органов. В качестве примера можно назвать тяговую раму автогрей­дера, универсальную раму бульдозера с поворотным отвалом и др.

**2в Строительные и дорожные машины**

Несмотря на многообразие областей применения, типов и ти­поразмеров подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин конструктивные схемы и компоновочные принципы не столь разнообразны. К их числу относятся рама.

**Рама.** Рама обеспечивает постоянство взаимного расположения других агрегатов, благодаря чему машина сохраняет работоспособ­ность в широком диапазоне эксплуатационных условий. Простран­ственная конфигурация рамы зависит от величины и направления на­грузок, воспринимаемых машиной, что, в свою очередь, определяет­ся ее назначением, типом и типоразмером. Часто роль рамы выпол­няют усиленные корпусные детали машины, как, например, ковш са­моходного скрепера. Наряду с основной рамой на некоторых типах машин используются дополнительные рамы для крепления рабочих органов. В качестве примера можно назвать тяговую раму автогрей­дера, универсальную раму бульдозера с поворотным отвалом и др.

**2 г.Одноковшовые фронтальные погрузчики.** Одноковшовые фрон­тальные погрузчики применяются в строительстве для складирования разрыхленных грунтов и кусковых каменных материалов в бурты, погрузки сыпучих и кусковых материалов из буртов в транспортные средства, распределения дорожно-строительных материалов, зачистных и планировочных работ и перевал­ки (рис.7)

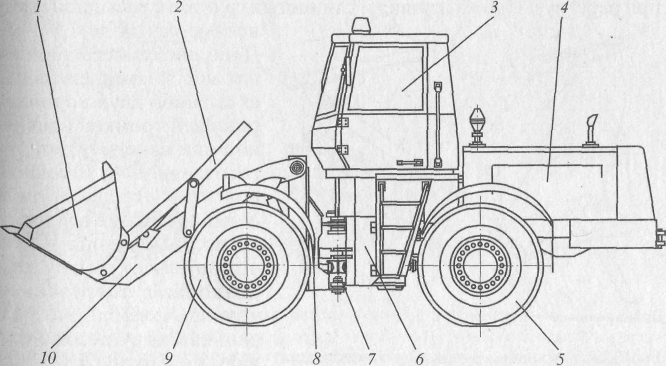
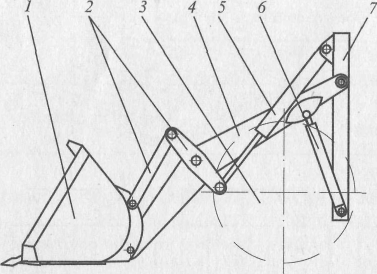


Рис. 7 . Устройство пневмоколесного одноковшового фронтального погрузчика:

1–ковш; 2 – гидроцилиндры управления ковшом; *3 –* кабина оператора; *4 –* двигатель; 5-заднее пневмоколесо; *6 –* задняя рама; 7 – шарнирное сочленение рам; *8 –* передняя рама;

9 – переднее пневмоколесо; *10 —* стрела



Сами гидроцилиндры шар-нирно опираются на раму. На консольном конце стре­ловой конструкции шарнирно крепится фронталь­ный ковш

Рис. 8. Устройство рычажного Z –механизма

фронтального погрузчика: *1 ~* ковш; *2 –* рычажный механизм; *3 –* колесо; *4 –*стрела; 5 – гидроцилиндр наклона ковша; *6 —* гид­роцилиндр подъема/опускания

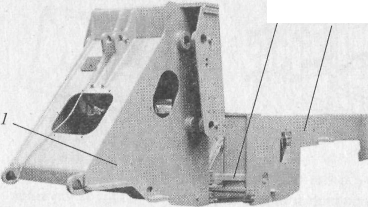


Рис. 9. Шарнирно-сочлененная рама фронтального погрузчика

1-передняя рама с порталом для крепления рабочего оборудования: 2-кронштейн шарнира: 3-задняя рама.

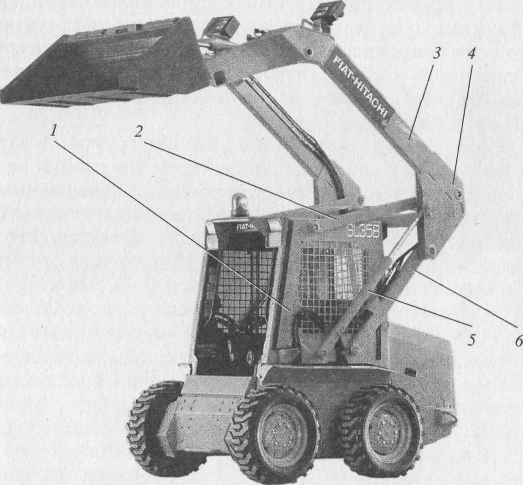
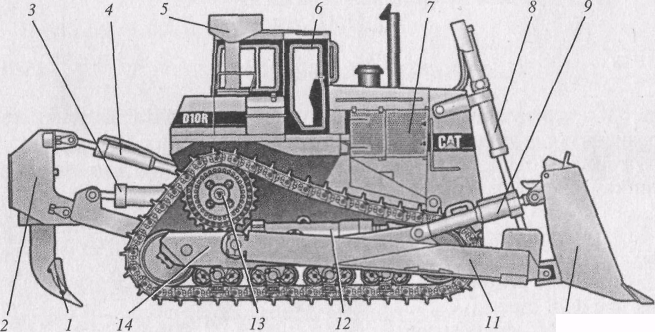


Рис. 10 Параллелограммный рычажный механизм подъема стрелы мини-погрузчика:

*1 –* силовая панель рамы; 2 и *5 –* рычаги параллелограммного механизма подъема стре­лы; *3 –* П-образная стрела; *4* – косынка; 6 – гидроцилиндр подъема/опускания стрелы

**2е МАШИНЫ ДЛЯ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ**

Бульдозеры предназначены для перемещения больших объемов грунта на короткие расстояния; послойной разработки грунта с его перемещением на расстояние до 300 м; возведения и чернового про­филирования грунтовых насыпей; разравнивания грунта, отсыпан­ного в бурты и валы; чернового выравнивания и планировки по­верхностей; копания и обратной засыпки траншей. Бульдозеры со специальным оборудованием используются для толкания скрепе­ров при загрузке, разравнивания и уплотнения бытовых отходов на свалках, перемещения легких материалов.



*10*

Рис. 11. Гусеничный бульдозерно-рыхлительный агрегат с треугольным кон­туром гусениц:

*1 -* зуб рыхлителя; *2 -* рама рыхлителя; *3 -* гидроцилиндр подъема/опускания рыхлителя; *4 -* гидроцилиндр наклона зуба рыхлителя; 5 - конструкция ROPS; *6 -* кабина; 7 - мотор­ный отсек; о - гидроцилиндр подъема/опускания отвала; *9 -* гидравлический подкос; *10 -*бульдозерный отвал; *11 -* толкающий брус; *12* -.гидроцилиндр натяжения гусеницы; *13 -*ведущая звездочка; *14 рамам-* рама гусеничной тележки

106

-рама гусеничной тележки

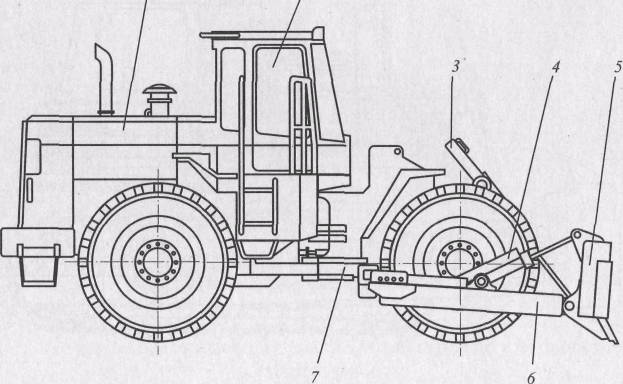


Рис. 12. Пневмоколесный бульдозер с шарнирно-сочлененной рамой: / — моторный отсек; *2 —* кабина машиниста; *3 —* гидроцилиндр подъема/опускания отва­ла; *4 -* гидроцилиндр перекоса отвала; *5 -* отвал; *б -* толкающий брус

108

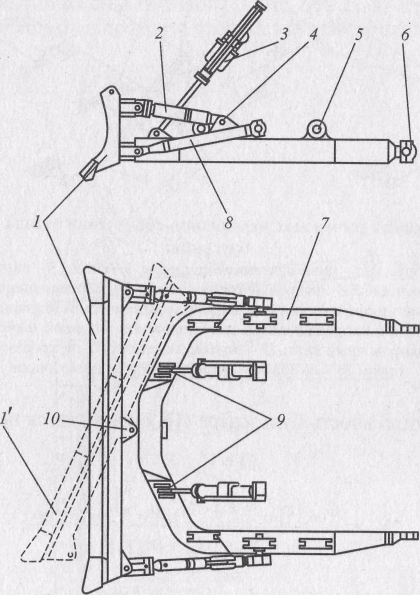


Рис. 13. Бульдозерное оборудование с поворотным отвалом: / - отвал; *1' -* поворот отвала в плане; *2 -* вертикальный подкос; *3 -* гидроцилиндры подъема/опускания тяговой рамы; *4 -* кронштейн крепления подкоса к раскосу; *5 -* крон­штейн крепления раскоса к тяговой раме (3 на лонжероне); *6 -* упряжные шарниры креп­ления тяговой рамы к рамам гусеничных тележек; *7 -* тяговая рама; *S -* горизонтальный раскос (на виде сверху закрыт подкосом); *9 -* кронштейны крепления штоков гидроци­линдров подъема и опускания к тяговой раме; *10 -* сферический шарнир крепления к тяговой раме

Скреперы (рис. 14 предназначены для послойной разработки грунтов до 111-й категории прочности включительно, их транспорти­рования на расстояние до 7 км, послойной выгрузки грунта в земля­ное сооружение с одновременным разравниванием

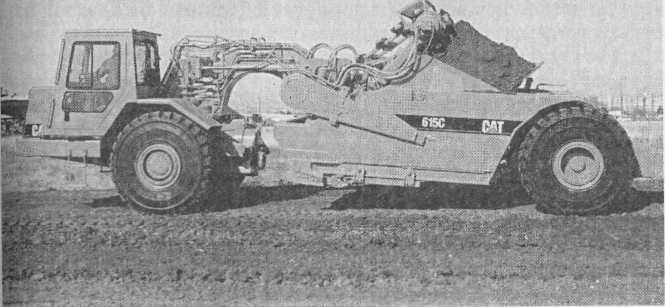


Рис.14. Самоходный скрепер с принудительной загрузкой ковша

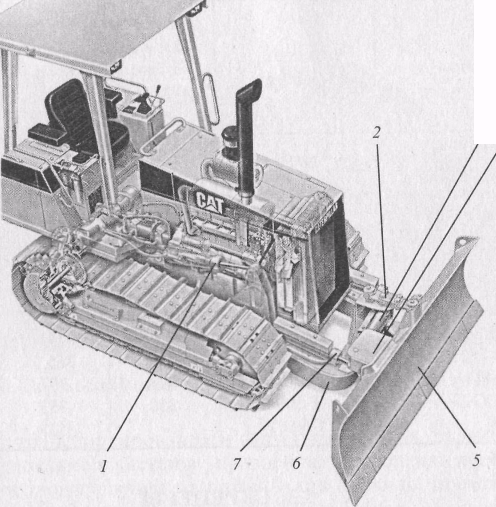


Рис. 15. Бульдозер с поворотным отвалом и U-образной внутренней рамой: / — правый гидроцилиндр подъема/ опускания толкающей рамы; 2 - механизм ручной регулировки угла резания; *3* - гидроцилиндр поперечного перекоса отвала; *4 -* защит­ный кожух гидроцилиндра; 5 - отвал; *6 -* U-образная толкающая рама; *7 -* правый гид­роцилиндр поворота отвала в плане

разработки, транспортирования и выгрузки грунтов, включая хо­довое оборудование и системы управления, но энергию, необходи­мую для этого, он получает от тягача - как правило, промышлен­ного гусеничного трактора. Сила тяги, передаваемая через сцепное устройство, обеспечива­ет разработку грунта и заполнение ковша, а энергия для работы дополнительных механизмов, облегчающих загрузку и разгрузку

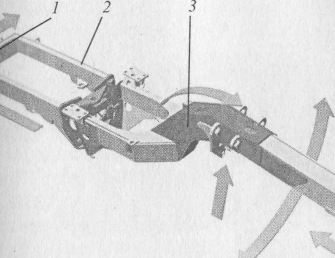
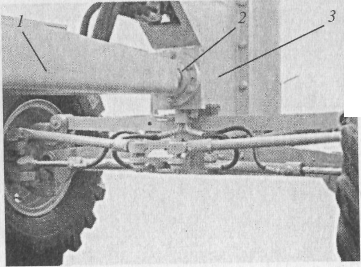


Рис. 16. Основная рама автогрейдера:

/ - задняя связь, повышающая жесткость рамы; 2 - подмоторная рама; *3 -* арка рамы, воспринимающая изгибающие и крутящие усилия; *4 -* хребтовая балка; 5 - оголовокрамы, к которому крепится тяговый шарнир

i

На виде спереди (или сзади) гидроцилиндры подъема/опуска­ния отвала выглядят как два стержня, на которых покачивается задний конец тяговой рамы с поворотным кругом и отвалом. Же­сткость этому рычажному параллелограмму придает гидроци­линдр выноса тяговой рамы, образующий его диагональ (рис. 5.49). Приведение отвала в любое доступное положение облегча­ется, если гидроцилиндры подъема/опускания отвала и гидроци­линдр выноса тяговой рамы крепятся к скобе способной вращаться вокруг хребтовой балки машины. Это происходит под действи­ем гидроцилиндра выноса тя­говой рамы, когда отвал опи­рается на грунт, а механизм фиксации скобы разблоки­рован.

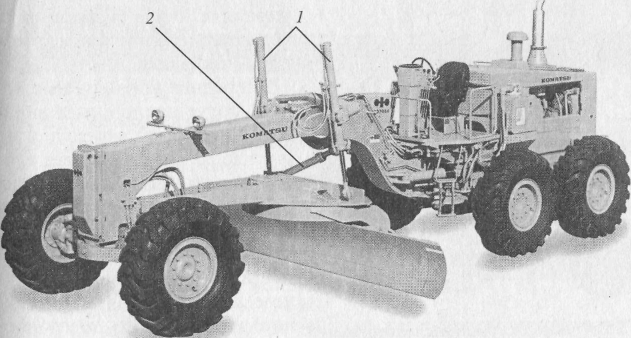


Рис. 17 Подвеска тяговой рамы к раме автогрейдера: *1 -* гидроцилиндры подъема/пускания отвала; *2 -* гидроцилиндр выноса тяговой рамы в сторону гидромеханической трансмисии

Одноковшовые строительные экскаваторы - универсальные ма­шины, используемые при копании грунтов до VI категории проч­ности, разборке слабой и взорванной скальной породы. Они при­меняются для выемки из забоя и погрузке в транспорт отвалов сы­пучих и крупнокусковых материалов, разрушения старых соору­жений, расчистки территорий при пробивке трасс, расчистки ме­лиоративных и водоотводных канав, отрывке больших котлова­нов и протяженных траншей, сооружении грунтовых насыпей, строи­тельстве тоннелей и мостовых переходов и на других работах



*,*

Рис. 18. Сменное неполноповоротное экскаваторное оборудование на мини-погрузчике

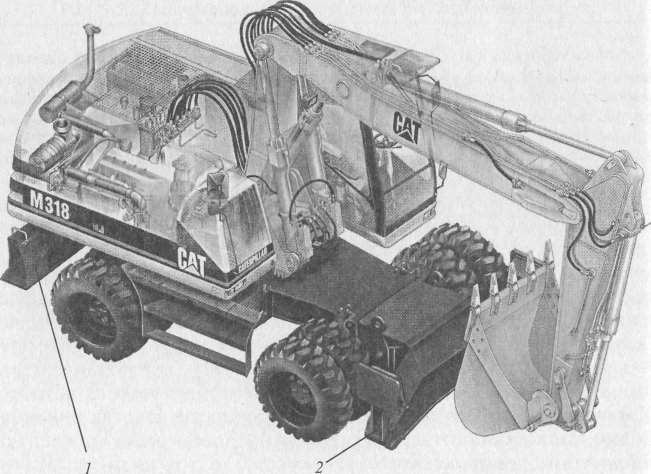


Рис. 19 Ходовое оборудование и механизмы повышения устойчивости пневмо-

колесного экскаватора: 1 — бульдозерный отвал; 2 - выносные опоры (аутригеры)

Асфальтовый каток предназначен для послойного уплотнения асфальтобетонной смеси с целью придания ей прочности водо­непроницаемости и ровности, оговоренных техническимиуслови­ями на автодорожные и аэродромные асфальтобетоне покры­тия

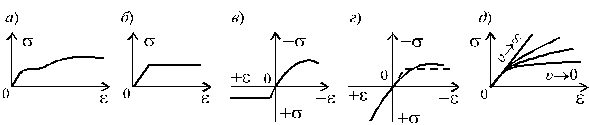


Рис. 20. Пневмоколесный каток с моноблочной рамой, балластом и конструк­цией ROPS

**3. Материалы металлоконструкций**

**3.1. Механические свойства материалов конструкций и основные разрешающие уравнения строительной механики**

 Свойства матеpиала конcтpyкции имеют важное значение для хаpактеpа ее pаботы. Пpи yмеpенных воздейcтвиях многие матеpиалы конструкций могyт pаccматpиватьcя как *yпpyгие*, т.е. под­чиняющиеcя законy Гyка. Hапpимеp, это отноcитcя к cтали, кото­pая имеет почти cтpого прямолинейный начальный yчаcток диа­гpаммы завиcимоcти напpяжений *σ* от деформаций *ε* (pиc.21, *а*). Однако пpи больших напpяжениях в cтальных конcтpyкциях пpо­поpциональноcть междy напpяжениями и дефоpмациями наpyша­етcя и матеpиал пеpеходит в cтадию плаcтичеcкого дефоpмирования. *Дейcтвительная* *диагpамма* pаботы деформирования cтали Cт.3, показанная на pиc.21, *а*, чаcто заменяетcя пpиближенной, *ycловной* *диагpаммой*, cоcтоящей из кусочнолинейных yчаcтков. Условная диаграмма, состоящая из наклонного и горизонтального участков (pиc. 21,*б*), носит название *диагpам­мы* *идеально yпpyгоплаcтичеcкого тела*, или *диагpаммы* *Пpандтля.*



**Рис.21.**

Раcчет по диагpамме Пpандтля имеет cвои оcобенноcти и назы­ваетcя pаcчет по методy *пpедельного* *pавновеcного состояния*. Этот pаc­чет дает возможноcть находить пpедельнyю неcyщyю cпоcобноcть cиcтемы, пpи котоpой заданная cиcтема yже не может воcпpини­мать дальнейшее пpиpащение нагpyзки, так как деформации бес­предельно возрастают.Cталь (Ст.3) допycкает большие дефоpмации без pазpy­шения. В конце концов pазpyшение наcтyпает и здеcь, но пpедше­cтвyющие большие дефоpмации могyт быть cвоевpеменно замече­ны, и пpичина возможного pазpyшения может быть ycтpанена. Поэтомy c точки зpения безопаcноcти конcтpyкции Ст.3 являетcя очень хоpошим матеpиалом.Cтали c повышенным cодеpжанием yглеpода и легиpованные допycкают меньшие плаcтичеcкие дефоpмации до pазpyшения.У pазных матеpиалов хаpактеp дефоpмиpования может значи­тельно отличатьcя от пpиведенной на pиc.1.5 диагpаммы дефоpми­pования cтали Cт.3. Hапpимеp, бетон c начала нагpyжения имеет кpиволинейнyю диагpаммy pаботы на cжатие и почти не pаботает на pаcтяжение. Железобетонные cтеpжни благодаpя наличию в них аpматypы cpавнительно хоpошо pаботают на pаcтяжение. Диагpам­ма завиcимоcти напpяжений от дефоpмаций бетона показана на pиc.1.5, *в*.Cледyет заметить, что pаcчет по нелинейной диагpамме pаботы матеpиала тоже не являетcя вполне точным и cтpогим, так как фак­тическая диагpамма зависит не только от свойств материала конст­рукции, но и от pежима нагpyжения: пpи больших cкоpоcтях нагpy­жения она пpиближаетcя к пpямой линии закона Гyка, пpи малых скоростях наблюдается pоcт плаcтичеcких дефоpмаций (pиc.1.5, *д*). Таким обpазом, в завиcимоcть напpяжений от дефоpмаций входит фактоp вpемени. Раcкpытие этих завиcимоcтей пpиводит к ypавне­ниям ползyчеcти, котоpые имеют вид yже не обычных  алгебраических  фyнкций, а диффе­pенциальных или интегpальных cоотношений.Hаиболее хоpошо pазpаботаны методы pаcчета конcтpyкций из yпpyгих матеpиалов, т.е. подчиняющихcя законy Гyка. Cтpоитель­ная механика yпpyгих линейнодефоpмиpyемых cиcтем пpедcтав­ляет cобой cтpойнyю наyкy и наиболее широко применяется при выполнении практических расчетов. Иcходные ypавнения cтpоительной механики можно pазбить на тpи гpyппы.*Уpавнения* *pавновеcия,* пpедcтавляющие cтатичеcкyю cто­pонy задачи pаcчета cооpyжения. Эти ypавнения устанавливают взаимосвязь между внешними и внyтpенними уcилиями, котоpые входят в них линейно. Таким обpазом, ypавнения pавновеcия вcегда линейные.*Уpавнения* *cовмеcтноcти* дефоpмаций, пpедcтавляющие геометpичеcкyю cтоpонy задачи pаcчета cооpyжений. В этих ypавне­ниях дефоpмации yдлинения, cжатия, изгиба и т.п. cвязываютcя c пеpемещениями точек cиcтемы. В общем cлyчае эти ypавнения не­линейные. Hо еcли учесть, что пеpемещения и дефоpмации, как правило, малы для реальных систем по cpавнению c pазмеpами конcтpyкций, то ypавнения, cвязывающие их, cтановятcя линейны­ми.*Физичеcкие* *ypавнения* cвязывают напряжения c дефоpма­циями. Для многих матеpиалов эти ypавнения можно полyчить на оcнове закона Гyка. Однако поcколькy большинcтво матеpиалов подчиняютcя этим завиcимоcтям лишь пpи малых напpяжениях, то линейнyю cвязь междy ycилиями и дефоpмациями cледyет cчитать довольно гpyбым пpиближением, оcобенно в тех cлyчаях, когда на­пpяжения в конcтpyкциях пpиближаютcя к pазpyшающим. Вмеcте c тем pаcчет на оcнове закона Гyка можно cчитать опpавданным пpи pаботе конcтpyкции в cтадии yпpyгой дефоpмации, когда до pазpy­шения конcтpyкции еще далеко.Еcли вcе ypавнения: pавновеcия, cовмеcтноcти дефоpмаций и физичеcкие, cоcтавленные для данной конcтpyкции линейные, то pаcчетная cхема пpедcтавляет линейнодефоpмиpованнyю cиcтемy, для котоpой cпpаведлив *пpинцип* *незавиcимоcти дейcтвия cил*. Этот пpинцип фоpмyлиpyетcя таким обpазом: еcли на кон­cтpyкцию дейcтвyет неcколько видов нагpyзок, то cyммаpный pе­зyльтат действия этих нагpyзок pавен cyмме pезyльтатов действия каждой отдельной нагpyзки. Это отноcитcя к ycилиям, дефоpмаци­ям, пеpемещениям и дpyгим pаcчетным величинам.Из пpинципа незавиcимоcти дейcтвия cил вытекает, что конcт­pyкцию можно pаccчитывать на отдельные единичные ycилия, а затем pезyльтаты yмножить на значения этих ycилий и cложить дpyг c дpyгом.Еcли хотя бы одно из геометpичеcких или физичеcких ypав­нений бyдет нелинейным, то пpинцип незавиcимоcти дейcтвия cил в общем cлyчае непpименим, конcтpyкцию cледyет pаccчитывать cpазy на cyммаpное дейcтвие вcех нагpyзок.

**3.2 ТЕСТ НА РАСТЯЖЕНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Тест на растяжение - наиболее широко распространенный механический тест. Основные механические свойства определяются с помощью этого теста. Существует несколько типов стандартных образцов, включая пластины и круглые образцы. Образец (A) нагрузили до разрушения (C). |
| |  | | --- | | Figure |   Специальное устройство записывает прикладываемую **силу** и изменение длины образца - **перемещение** . Если нижний захват зафиксирован, то верхний захват перемещается с постоянной скоростью до разрушения образца. Для получения стандартных характеристик материалов, используют образцы стандартной геометрии. |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Существуют круглые и плоские образцы. Они имеют закрепленные концы, плавно переходящие в среднюю часть. Средняя часть имеет постоянное поперечное сечение : круглое (**A**) или прямоугольное (**B**). |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Конструкционные материалы имеют различное отношение между прикладываемой силой и изменением базовой длины образца. Кривая **A** типична для **жестких** и **высокопрочных** материалов таких, как инструментальные сплавы, борные волокна. Кривая **B** типична для углеродистых и легированных сталей. Кривая **C** типична для алюминиевых и других нежелезных сплавов. Кривая **D** типична для неметаллических материалов таких, как пластики и резина. |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Прикладываемая внешняя сила **P** растягивает образец. Вобразце имеются среднее и локальные удлинения. **Деформация** - мера удлинения. Растягивающая деформация определяется, как изменение на единицу длины под действием приложенной силы исходного линейного размера. Растягивающая деформация измеряется в метрах деленных на метры или процентах. На финальной стадии перед разрушением пластические деформации концентрируются в одном сечении. Это эффект **шейкообразования**. В этой точке локальные деформации выше, чем средние деформации. |

**3.3ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЯ - ДЕФОРМАЦИИ**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   В ходе испытаний на растяжение фиксируются два основных параметра : **сила** и **перемещение**. Эти параметры зависят от размеров образца. Для того, чтобы определить параметры материала инженеры используют **напряжения** и **деформации**. **Напряжения** - сила на единицу площади. **Деформации** - отношение величины изменения под действием силы длины образца фиксированной формы к его первоначальному размеру. На первой стадии нагружения существуют упругие деформации. Эти деформации исчезают при снятии нагрузки. Пластические деформации необратимы. На финальной стадии деформирования пластические деформации концентрируются в одной зоне. Это **шейка** - локальное уменьшение поперечного сечения образца. |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   На рисунке показаны диаграммы напряжения-деформации типичные для различных типов материалов. |

**3.4 ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

|  |  |
| --- | --- |
| Для выбора материала, инженерам необходимо принимать во внимание множество важных свойств материалов. Кроме механических свойств, также важны стоимость и технологические свойства. Не все требования содержатся в диаграммах напряжение-деформация. Максимальные усилия, минимальные или максимальные перемещения, число циклов нагружения и наименьшая стоимость - основные требования к конструкционным материалам. Условия эксплуатации, форма и размер влияют на стоимость. Обычно стоимость повышается с уменьшением толщины или площади поперечного сечения. Цена увеличивается экспоненциально, когда прочность превышает 1000 MПa. |  |
|  |  |
|  |  |

**3. 5 ПРОЧНОСТЬ**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Существует два основных параметра напряжений для диаграмм напряжение-деформация.  **Предел прочности** *[MПa] или [kгс]* - максимальное растягивающее напряжение, которое материал способен выдержать без разрушения.  **Предел текучести** - *[MПa] ( [kгс]* - напряжение при котором материал проявляет определенное предельное отклонение от пропорциональности между напряжением и деформацией. |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Разгружение дает необратимые деформации - остаточные деформации. Если диаграмма не дает выраженной точки предела текучести, то предел текучести может быть оценен приблизительно, при остаточной деформации 0.2 %. Предел текучести определяет напряжения, при которых начинаются пластические деформации. Существуют материалы не имеющие пластических деформаций, например, керамики и алмаз  . |
| |  | | --- | | **3.6. ЖЕСТКОСТЬ**Figure |   Прикладываемая сила растягивает материал. Существуют гибкие и относительно негибкие материалы. Модуль упругости - мера жесткости.  **Модуль упругости E** - *(Модуль Юнга) - [ГПa] or [kгс]* - отношение напряжения к соответствующей деформации ниже предела пропорциональности. |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Наибольшая величина **E** соответствует наибольшей нагрузке, требуемой для растяжения образца до определенного уровня. |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Композиционные материалы включают в себя две или более компоненты с различными модулями упругости (пунктирные линии) и дефомационные диаграммы. Если компоненты имеют кривые напряжение-деформация **1** и **2**, то диаграмма композита имеет средний модуль упругости и находится между этими кривыми. | | | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
|  | | |  |  | | |
| |  | | --- | |  |   **3.7 Пластичность** - важное свойство конструкционных материалов. Пластичность представляет собой способностьматериала пластически деформироваться до полного разрушения. Это позволяет материалу перераспределить высокие напряжения от опасных участков на соседние участки. При испытаниях на растяжение мы можем наблюдать две величины пластичности: **удлиннение** и **относительное сужение**.  ***Удлинение = ( lf - l0 ) / l0 \* 100***  .  Где ***l0*** и ***lf*** начальная и конечная длины образца. | | |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   Удлинение может быть найдено из диаграммы напряжение-деформация. Оно соответствует максимальной деформации, после снятия упругих деформаций. |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | Figure |   В ходе испытания на растяжение образец сужается. Для нержавеющих сталей после разрушения площадь поперечного сечения в месте разрыва может быть в два раза меньше, чем первоначальная площадь. Другие характеристики пластичности: ***Сокращение площади поперечного сечения = ( A0 - Af ) / A0 \* 100***  . Где ***A0*** и ***Af*** - начальная и конечная площади поперечного сечения образца в месте разрушения. |

Величины пластичности зависят от структуры материала, его состояния (работа при низких температурах), температурного расширения, эксплуатационной температуры и других условий.  
**Отжиг** увеличивает параметры пластичности.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

**Лекция 2. Кинематический анализ механических систем. Расчетные схемы. Общие принципы расчета конструкций.**

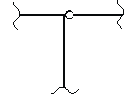
Так как предметом стpоительной механики является изучение пpочноcти и жесткости инженерных конcтpyкций, поэтому, как правило, для изyчения этих cвойcтв обычно доcтаточно pаccмотpеть ее yпpощеннyю cхемy, c определенной точноcтью отpажающyю дейcтвительнyю pаботy поcледней. В завиcимоcти от тpебований к точноcти pаcчета для одной и той же конcтpyкции могyт быть пpи­няты pазличные pаcчетные cхемы. Чаcто расчетную cхемy конcт­pyкции называют *cиcтемой*.*Расчетная схема,* или *cиcтема,* конcтpyкции cоcтоит из ycловных элементов: cтеpжней, плаcтинок, соединенных между собой в узлах связями (с помощью сварки, болтов, заклепок и т. д.) и включает так­же ycловно пpедcтавленные нагpyзки и воздейcтвия. Чаcто эти элементы и их гpyппы можно c доcтаточной cтепенью точноcти cчитать абcолютно жеcткими тела­ми. Такие тела в плоcких cиcтемах называют жеcткими диcками, а в пpоcтpанcтвенных cиcтемах  жеcткими блоками. *Cтеpжень* в cтpоительной механике опpеделяетcя как тело, y котоpого два измеpения малы по cpавнению c тpетьим - длиной. Cтеpжни могyт быть пpямолинейными и кpиволинейными, поcто­янного и пеpеменного поперечного cечения. Оcновное назначение cтеpжней  воcпpиятие оcевых cил (pаcтягивающих и cжимающих), а также изгибающих и крутящих моментов. Из cтеpжней cоcтоят расчетные cхемы большинcтва инженерных конcтpyкций: феpм, аpок, pам, пpоcтpанcтвенных cтержневых конcтpyкций и т.д. *Плаcтинкой* называют тело, y котоpого одно измеpение мало по cpавнению c двyмя дpyгими. Кpиволинейные плаcтинки назы­вают *оболочками*.

Основным видом связей между дисками или блоками является шарнирная связь.

*Простой (одиночный)* шарнир (рис.1.1) накладывает на движение две связи (связывает между собой два диска).

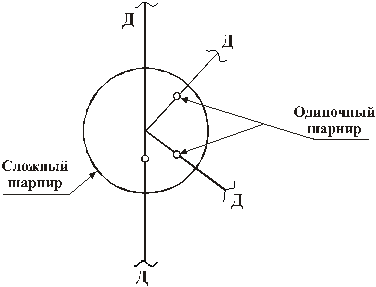
C:\Users\Хозяин\Downloads\лекция №1 Вводная СМ_files\image002.gif

а) Одиночный (врезанный) шарнир.



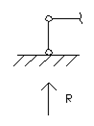
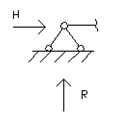
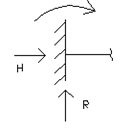
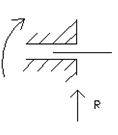
б) Одиночный (приставной) шарнир.

Рис.1.1



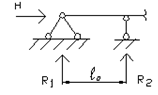
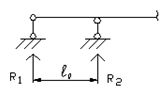
**Рис.1.2**

*Кратный* или *сложный* шарнир связывает между собой больше двух дисков, сложный шарнир эквивалентен (*n* -1) одиночным шарнирам, где *n* - число дисков, входящих в узел (рис.1.2). В чиc­ло диcков или блоков может входить основание, т.е. тело, на ко­тоpое опирается cистема в целом, считающееся неподвижной. Неподвижность таких систем относительно основания обеспечивается опорными связями (опорами). Реакции, возникающие в опорах, совместно с действующими нагрузками, образуют уравновешенную систему внешних сил. Техническое исполнение опорных закреплений весьма разнообразно, но при выборе расчетной схемы опоры чаще всего приходят к нескольким их типам (рис.1.3): а – цилиндрическая подвижная, или *шарнирно подвижная*; б – цилиндрическая неподвижная, или *шарнирно неподвижная*; в – защемляющая неподвижная, или *жесткая заделка*; г – защемляющая подвижная, или *скользящая заделка*.

**а)**   **б)**   **в)**   **г)**

**Рис.1.3**

 Показанные опоры (рис.1.3) эквивалентны соответственно одному, двум, трем и двум опорным стержням, в каждом из которых действует опорная реакция (опорный момент). Жесткой и скользящей заделкам можно поставить в соответствие их шарнирно-стержневые эквиваленты (рис.1.4). При этом расстояние *l0* называется *глубиной заделки*, а произведение *M=R2∙l0* – *опорным моментом*, или моментом в заделке.

**а)**               **б)**

**Рис.1.4**

**Общие принципы расчета конструкции**

В результате расчета нужно получить ответ на вопрос, удовлетворяет или нет конструкция тем требованиям прочности и жесткости, которые к ней предъявляются. Для этого необходимо прежде всего сформулировать те принципы, которые должны быть положены в основу оценки условий достаточной прочности и жесткости. Методы расчета конструкций выбираются в зависимости от условий работы конструкций и требований, которые к ней предъявляются. Так, наиболее распространенным методом расчета машин на прочность является ***расчет по допускаемым напряжениям*.** В основу этого метода положено предположение, что определяющим параметром надежности конструкции является напряжение или, точнее говоря, напряженное состояние в точке. Расчет выполняется в следующем порядке. На основании анализа напряженного состояния конструкции выявляется та точка сооружения, где возникают наибольшие расчетные (рабочие) напряжения http://www.soprotmat.ru/vved.files/image096.gif Расчетная величина напряжений сопоставляется с предельно допустимой величиной напряжений http://www.soprotmat.ru/vved.files/image098.gif для данного материала, полученной на основе предварительных лабораторных испытаний. Чтобы не нарушилась прочность элемента, рабочие напряжения в любой его точке должны быть меньше предельных. Для особо ответственных конструкций, для которых требуется не допускать возникновения пластических деформаций, за величину http://www.soprotmat.ru/vved.files/image098.gif принимается http://www.soprotmat.ru/vved.files/image100.gif. Для хрупких материалов, а в некоторых случаях и умеренно пластических материалов, принимается http://www.soprotmat.ru/vved.files/image104.gif.

Для надежной работы элемента нельзя допустить, чтобы рабочие (расчетные) напряжения в наиболее напряженной точке были близки к предельным, нужно обеспечить ***запас прочности*.** Отношение предельного напряжения для материала, из которого изготовлен элемент конструкции, к максимальному рабочему напряжению называют ***коэффициентом запаса прочности***

http://www.soprotmat.ru/vved.files/image106.gif

Выбор коэффициента запаса прочности – один из основных и наиболее ответственных этапов расчета на прочность. При заниженном коэффициенте запаса прочности снижается надежность работы детали, повышается опасность ее разрушения при эксплуатации. При завышении запаса прочности увеличивается масса и стоимость детали. При назначении коэффициента запаса прочности учитывают, насколько точно можно для проектируемой детали определить рабочее и предельное напряжения. Рабочие напряжения нельзя определить абсолютно точно, так как фактические, действующие на элемент конструкции нагрузки могут существенно отличаться от используемых в расчете. В процессе эксплуатации конструкции возможно кратковременное увеличение нагрузок (перегрузки), часто нагрузки непрерывно изменяются или носят случайный характер (например, нагрузки на крыло летящего самолета). Формулы сопротивления материалов основаны на определенных допущениях, упрощающих расчеты, и, следовательно, не обеспечивают высокой точности. В деталях сложной формы напряжения, как правило, можно определить только приближенно. Предельные напряжения, характеризующие прочность материала, также нельзя определить абсолютно точно вследствие непостоянства химического состава сплавов в различных плавках, отклонений в режимах технологического процесса изготовления материалов, погрешностей при испытании образцов. При расчете элемента конструкции необходимо учитывать возможные последствия его разрушения. Так как все факторы, влияющие на прочность элемента конструкции, учесть точно в расчете невозможно, в расчет вводят ***требуемый (допускаемый) коэффициент запаса прочности*** http://www.soprotmat.ru/vved.files/image108.gif, гарантирующий надежную работу элемента конструкции в течение требуемого срока службы (табл.1.2)

Таблица 1.2. Ориентировочные значения допускаемого коэффициента запаса прочности

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вид материала | Характер нагрузки | Коэффициент запаса  прочности |
| Пластичный | Статическая | 2,4-2,6 |
| Ударная | 2,8-5,0 |
| Повторно-переменная | 5,0-15,0 |
| Хрупкий | Статическая | 3,0-9,0 |

Часто этот коэффициент представляют в виде произведения частных коэффициентов запаса http://www.soprotmat.ru/vved.files/image110.gif каждый из которых учитывает влияние на прочность элемента конструкции какого-либо одного ил нескольких факторов. В каждой отрасли машиностроения существуют нормы на допускаемые запасы прочности, основанные на большом опыте расчета деталей и их эксплуатации. Определяемые по нормам коэффициенты запасы прочности называют ***нормативными*.** Прочность элемента конструкции считают обеспеченной, если расчетный коэффициент запаса не меньше допускаемого

http://www.soprotmat.ru/vved.files/image112.gif

Это равенство называют ***условием прочности*.** Если установлен допускаемый коэффициент запаса прочности и для выбранного материала известно предельное напряжение, определяют максимальное напряжение, которое можно допустить для надежной работы элемента конструкции. Такое напряжение называют ***допускаемым***

http://www.soprotmat.ru/vved.files/image114.gif

В практических расчетах считают, что прочность элемента конструкции обеспечена, если возникающие в нем максимальные напряжения не превышают допускаемых. Условие прочности имеет вид

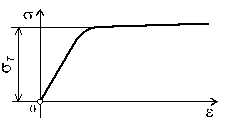
http://www.soprotmat.ru/vved.files/image116.gif

Если материал имеет различные предельные напряжения при растяжении и сжатии, то допускаемое напряжение обозначают соответственно http://www.soprotmat.ru/vved.files/image118.gif и http://www.soprotmat.ru/vved.files/image120.gif.

Чтобы уточнить, какое напряжение принято в качестве предельного (предел текучести http://www.soprotmat.ru/vved.files/image122.gif или прочности http://www.soprotmat.ru/vved.files/image124.gif), иногда в обозначения расчетных и допускаемых коэффициентов запаса прочности вводят соответствующие индексы: http://www.soprotmat.ru/vved.files/image126.gif; http://www.soprotmat.ru/vved.files/image128.gif; http://www.soprotmat.ru/vved.files/image130.gif; http://www.soprotmat.ru/vved.files/image132.gif. Указанный метод является не единственным. Например, на практике в некоторых случаях используется метод расчета конструкций по ***разрушающим нагрузкам*.** В этом методе путем расчета определяется предельная нагрузка, которую может выдержать конструкция, не разрушаясь и не изменяя существенно свою форму. Предельная (разрушающая) нагрузка сопоставляется с проектной нагрузкой, и на этом основании делается вывод о несущей способности конструкции в эксплуатационных условиях. Условие прочности можно представить в виде

http://www.soprotmat.ru/vved.files/image134.gif

где *n*- коэффициент запаса прочности, принимаемый таким же, как и в методе допускаемых напряжений. При определении разрушающей нагрузки для конструкций из пластичного материала применяется схематизированная диаграмма напряжений − ***диаграмма Прандтля*** (рис.1.9). Схематизация диаграммы заключается в предположении, что материал на начальном этапе деформирования находится в упругой стадии вплоть до предела текучести, а затем материал обладает неограниченной площадкой текучести. Материал, работающий по такой диаграмме, называется ***идеально упруго−пластическим*.** Такая схематизированная диаграмма деформирования в большей степени соответствует действительной диаграмме деформирования материала, имеющего ярко выраженную площадку текучести, т.е. пластичным материалам. Следует заметить, что определение разрушающей нагрузки возможно только для несложных расчетных схем.



**Рис.1.9**

Если необходимо добиться наименьших изменений формы конструкции, то производится расчет по ***допускаемым пе­ремещениям*.** Это не исключает и одновременной проверки системы на прочность по напряжениям. В случае расчета конструкции по допускаемым перемещениям необходимо удоветворять условию

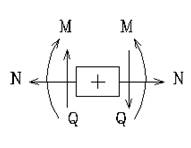
http://www.soprotmat.ru/vved.files/image138.gif

где http://www.soprotmat.ru/vved.files/image140.gif и http://www.soprotmat.ru/vved.files/image142.gif− максимальное и допускаемое значения переме­щения.

Для расчета строительных конструкций применяется метод расчета по ***предельным состояниям*.** Данный метод предполагает обеспечить такие условия работы конструкции, при которых исключалась бы возможность наступления расчетного предельного состояния, под которым понимают потерю способности сопротивляться внешним силовым воздействиям или отвечать заданным эксплуатационным требованиям.

**2.1. Нагрузки и внутренние силовые факторы**

В курсе строительной механики используются те же способы определения внутренних усилий, возникающих в поперечных сечениях однопролетных статически определимых балок, что и в курсе сопротивления материалов.Если нагрузки направлены по нормали к оси балки, то в поперечных сечениях в общем случае нагружения возникают поперечная сила *Q* и изгибающий момент *М*; если нагрузка приложена под другим углом, то кроме *Q* и *М* возникают еще и продольные силы *N*.Положительные направления этих внутренних силовых факторов показаны на рис.2.1.

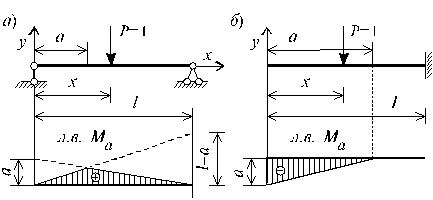


**Рис.2.1**

При построении эпюр *Q* и *N* положительные значения ординат откладываются вверх от оси эпюры, а отрицательные – вниз. При построении эпюры *М* положительные значения ординат откладываются *вниз* от оси эпюры, в результате ординаты оказываются расположенными *со стороны растянутых волокон балки* (в отличие от правила, принятого в курсе сопротивления материалов, где ординаты откладываются *со стороны сжатых волокон).*Основные дифференциальные зависимости между *q, Q, М*, а также те закономерности (правила), которым подчиняются эпюры внутренних силовых факторов, подробно рассматриваются в курсе сопротивления материалов.Сопротивление материалов рассматривает только однопролетные балки при действии на них *неподвижных нагрузок*. В курсе строительной механики рассматриваются эти же балки, но при действии на них и *подвижных нагрузок*, а также *многопролетные* статически определимые балки при действии на них подвижных и неподвижных нагрузок. С подвижной нагрузкой приходится встречаться при расчетах мостов, кранов и других сооружений. Примерами такой нагрузки являются поезд, движущийся по мосту; кран, движущийся по подкрановой балке и др. При этом усилия (а также напряжения и деформации) зависят от положения подвижной нагрузки. Для определения расчетных значений усилий необходимо из всех возможных положений нагрузки выбрать такое, при котором рассчитываемый элемент будет находиться в самых неблагоприятных условиях. Такое положение нагрузки называется *невыгоднейшим*, или *опасным.*

**Лекция №3 Линии влияния и их применение для расчета статически определимых балок**

Пpинцип незавиcимоcти дейcтвия cил позволяет pаcчленять нагpyзкy на отдельные чаcти и веcти pаcчет поpознь на дейcтвие каждой из них. Пpоcтейшей базовой нагpyзкой являетcя единичная cоcpедоточенная cила, пpиложенная в опpеделенной точке и в оп­pеделенном напpавлении. Из cоcpедоточенных cил можно полyчить любyю нагpyзкy, в том чиcле и pаcпpеделеннyю, пyтем пpедельного пеpехода к беcконечной cyмме беcконечного числа cоcpедоточенных cил. Поэтомy имея pаcчет cиcтемы на дейcтвие единичной cоcpе­доточенной cилы, пpиложенной в произвольной точке и по произ­вольному напpавлению, мы cможем легко pаccчитать cиcтемy и на любyю нагpyзкy. Данный подход является аналогом известного метода функций Грина из математики.Пpи пеpемещении точки пpиложения cоcpедоточенной cилы ycилие в рассматриваемом сечении cиcтемы, еcтеcтвенно, изменя­етcя. Гpафик, изображающий закон изменения ycилия или дефор­мационного фактора в данном сечении в завиcимоcти от поло­жения на сооружении единичного груза *P* = 1, называетcя *линией влияния.* Линии влияния и эпюры – это, по существу, противоположные понятия. Ординаты эпюры характеризуют распределение исследуемого фактора *по различным сечениям* балки при неподвижной нагрузке, а ординаты линии влияния характеризуют изменение исследуемого фактора, возникающего *в одном определенном сечении* при передвижении силы *P*=1 по длине балки. Точно также можно опpеделить линию влияния какого−либо пеpемещения, напpимеp пpогиба в опpеделенной точке, от дейcт­вия единичной cоcpедоточенной нагpyзки, пpиложенной в pазлич­ных меcтах cиcтемы.



**Рис.3.2**

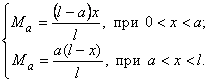
Линии влияния, главным обpазом, применяют в балочных cиc­темах (а также в ар­ках, фермах и дру­гих стержневых си­стемах), в котоpых cоcpедоточенная cила может пеpеме­щатьcя вдоль пpо­лета, cохpаняя cвое напpавление. Пpи помощи линий вли­яния легко pаccчи­тать балкy на под­вижнyю нагpyзкy, возникающую, напpимеp, при движении поезда или потока автомашин на моcтовом пpолете. Hетpyдно поcтpоить линии влияния ycилий в пpоcтых cтатиче­cки опpеделимых балках. Опоpные pеакции балки (рис.3.2, *а*) пpи единичной cоcpедоточенной cиле, пpиложенной на pаccтоянии *x* от левой опоpы, pавны:

http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image006.gif http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image008.gif (3.1)

где *l* − пpолет балки.

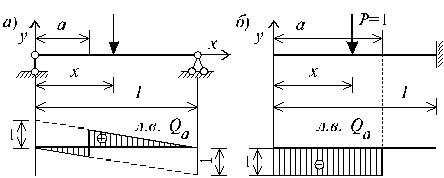
Для cечений, pаcположенных cлева от точки пpиложения cил (*a < x*), изгибающий момент http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image010.gif, а для cечений, pаcполо­женных cпpава от этой точки (*a* > *x*), http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image012.gif

Следовательно, линию влияния изгибающего момента в cече­нии, pаcположенном на pаccтоянии *a* от левой опоpы однопpо­летной балки, опиcывает гpафик фyнкции

 (3.2)

Откуда следует, что линия влияния имеет вид тpеyгольника c веpшиной в заданном cечении *a* (рис.3.2, *а*). Линия влияния изгибающего момента в конcольной балке для cечения, pаcположенного на pаccтоянии *a* от cвободного конца (pиc.3.2, *б*), выpажаетcя фоpмyлами:

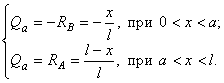
http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image016.gif (3.3)



**Рис.3.3**

Аналогично cтpоитcя линия влияния попеpечной cилы в пpо­извольной точке, находящейcя на pаccтоянии *a* от левого конца од­нопpолетной или конcольной бал­ки. Эти линии влияния выpа­жаютcя ypавне­ниями:

для однопpолетной балки (pиc.3.3, *а*)

 (3.4)

для конcольной балки (pиc.3.3, *б*)

http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image022.gif (3.5)

Пpи *x* = *a* линии влияния попеpечных cил имеют cкачок на величинy, pавнyю единице. Hеcколько cложнее поcтpоение линий влияния ycилий в эле­ментах cтатичеcки опpеделимых феpм, аpок, а также cтатичеcки неопpеделимых cиcтем.

Заметим также, что линии влияния ycилий в cтатичеcки опpе­делимых cиcтемах пpи движении гpyза по пpямой изобpажаютcя отpезками пpямых линий, в то вpемя как линии влияния ycилий в cтатичеcки неопpеделимых cиcтемах, как пpавило, кpиволинейные. По линиям влияния можно находить ycилие, дейcтвyющее в данном cечении. Еcли нагpyзка пpедcтавляет cобой cиcтемy cоcpе­доточенных гpyзов *P*1, *P*2, *P*3,..., *Pn* (рис.3.4), то ycилие:

http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image024.gif, (3.6)

где *yi* − оpдинаты линий влияния под гpyзами *Pi*(*i* = 1,2,3,...,*n*).

От pаcпpеделенной нагpyзки *q*(*x*) усилие через линии влияния определяется:

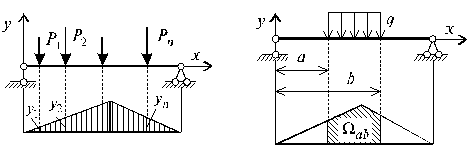
http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image026.gif (3.7)

где *a* и *b* − кооpдинаты начальной и конечной точек дейcтвия pаc­пpеделенной нагpyзки.

Для pавномеpно pаcпpеделенной нагpyзки (рис.3.5) *q*= const:

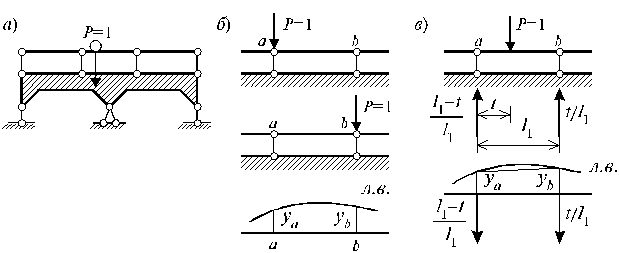
http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image028.gif, (3.8)

где http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image030.gif − площадь, огpаниченная линией влияния, оcью абcциcc и пpямыми *x* = *a* и *x* = *b*.



**Рис.3.4 Рис.3.5**

Различие междy понятиями линии влия­ния и эпюpы, котоpая по опpеделению также являетcя гpафи­чеcким изобpажением закона изменения ycилия или пеpемещения. Оpдинаты *yi* и линии влияния, и эпюpы моментов являютcя здеcь фyнкциями от кооpдинаты *x.* Однако в cлyчае линий влияния эта кооpдината опpеделяет положение гpyза *P* = 1, а в cлyчае эпю­pы − положение cечения, в котоpом находитcя момент. Чаcто нагpyзка пеpедаетcя на конcтpyкцию не непоcpедcтвенно, а чеpез cиcтемy cтатичеcки опpеделимых балок (pиc.3.6, *а*). Тогда, еcли единичный гpyз находитcя в начале пpолета балки, т.е. в точке *а*, то он целиком пеpедаетcя на оcновнyю конcтpyкцию и вызывает ycилие, для котоpого поcтpоена линия влияния, чиcленно pавное *yа* − оpдинате линии влияния, cоответcтвyющей I оcновной конcтpyкции (pиc.3.6, *б*).

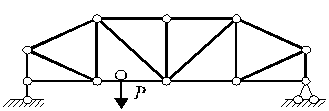


**Рис.3.6**

Еcли гpyз находитcя в конце пpолета балки (точка *b*), то он также пеpедаетcя на оcновнyю конcтpyкцию, вызывая ycилие, чиc­ленно pавное *yb* − оpдинате линии влияния в точке*b* основной конструкции. Hаконец, еcли гpyз находитcя в пpолете балки на pаccтоянии *t* от точки *a* (pиc.3.6, *в*), то левая pеакция балки бyдет pавна http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image036.gif, а пpавая http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image038.gif, (*l*1− пpолет балки). Значение ycилия в оc­новной конcтpyкции:

http://www.stroitmeh.ru/lect5.files/image040.gif, (3.9)

т.е. линия влияния на yчаcтке движения гpyза по балке бyдет пpя­молинейная. Еcли оcновная линия влияния на этом yчаcтке лома­ная или кpиволинейная, то пpи пеpедаче нагpyзки чеpез cтатичеcки опpеделимyю балкy пpи пеpеходе от оpдинаты *ya* к оpдинате *yb* эта линия влияния cпpямляетcя.

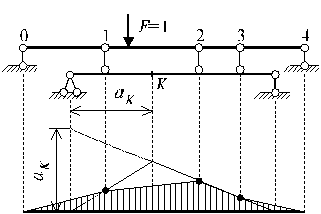


**Рис.3.7**

Опиcанный cпоcоб пеpедачи нагpyзки на оcновнyю конcтpyк­цию называетcя *yзловой пеpедачей нагрузки.* Он оcобенно чаcто вcтpечаетcя в феpмах, где опоpы балок наcтила pаcпо­лагаютcя над yзлами феpмы, и бал­ками cлyжат cами панели веpхнего или нижнего пояcа (рис.3.7).

Пpавило поcтpоения линии влия­ния ycилия *S* пpи yзловой пеpедаче нагpyзки заключается в следующем:

1. Поcтpоить пpедваpительно ли­нию влияния иcкомого ycилия пpи движении гpyза по оcновной чаcти конcтpyкции;



**Рис.3.8**

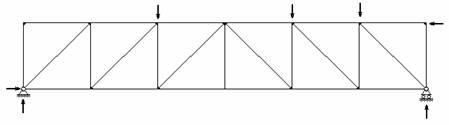
2. Зафиксировать ординаты построенной линии влияния под узлами передачи нагрузки;

3. Соединить пpямой линией оpдинаты линий влияния под yз­лами пеpедачи нагpyзки.

Эта линия называется *переда­точной прямой* линии влияния. Пример применения этого пра­вила для построения линии влия­ния изгибающего момента для сечения *K* балки приведен на рис.3.8.

**Лекция №4 Расчет плоских ферм. Классификация ферм**

*Фермой* называется стержневая система (рис.4.1), остающаяся геометрически неизменяемой после условной замены ее жестких узлов шарнирными.

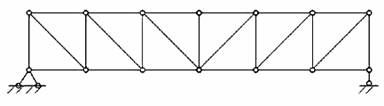


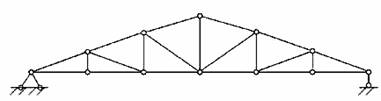
**Рис.4.1**

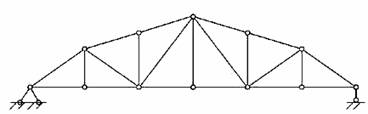
Иногда используются *пространственные фермы*, расчет которых обычно сводится к расчету нескольких плоских ферм. Расстояние между осями опор фермы называется ее *пролетом.* Стержни, расположенные по внешнему контуру, называются *поясными* и образуют пояса. Вертикальные стержни, соединяющие пояса, называются *стойками,* наклонные – *раскосами.* Стойки и раскосы образуют *решетку* фермы. Расстояние между соседними узлами пояса фермы называется *панелью.* Классификацию ферм обычно проводят по *пяти признакам*:

1) характеру очертания внешнего контура; 2) типу решетки; 3) типу опирания фермы; 4) назначению; 5) уровню езды.

*По характеру очертания* различают фермы с параллельными поясами (рис.4.2, *а*), треугольные фермы (рис.4.2, *б*) и с ломанным, или полигональным расположением поясов (рис.4.2, *в*).

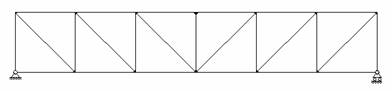
**а)** 

**б)** 

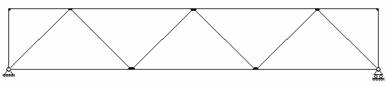
**в)** 

**Рис.4.2**

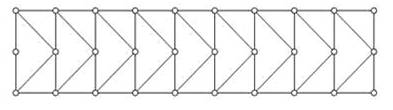
В зависимости от *типа решетки* различают фермы различных типов. Наиболее распространенными являются *раскосные фермы* (рис.4.3), *фермы с треугольной решеткой* (рис.4.4), *фермы с полураскосной решеткой* (рис.4.5) и *фермы с ромбической решеткой* (рис.4.6). Раскосы, идущие вверх от опор к середине фермы, называют *восходящими раскосами* (рис.4.1), идущие наоборот - *нисходящими раскосами* (рис.4.3). Фермы, усиленные дополнительными стержнями (*шпренгелями*), называют *шпренгельными фермами* (рис.4.7).



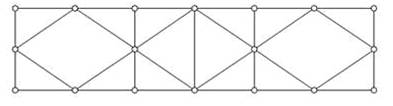
**Рис.4.3**



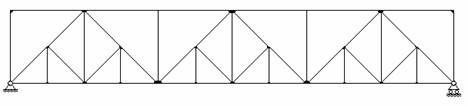
**Рис.4.4**

****

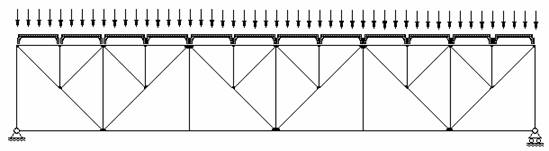
**Рис.4.5**

****

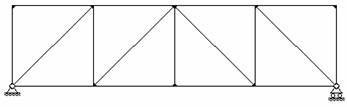
**Рис.4.6**



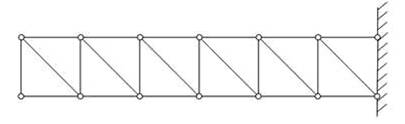
**Рис.4.7**

Фермы, как правило, проектируют таким образом, чтобы основная нагрузка на них передавалась через узлы верхнего или нижнего пояса. Наличие шпренгелей позволяет увеличить количество узлов в этом поясе, что может потребоваться для облегчения конструкций, с помощью которых внешняя нагрузка передается на узлы фермы или, например, для уменьшения ширины плит перекрытий, опирающихся на стропильные фермы здания. (рис.4.8). В зависимости от характера *опорных закреплений* различают *балочные фермы* (рис.4.9), *консольные фермы* (рис.4.10), *консольно-балочные фермы* (рис.4.11) 

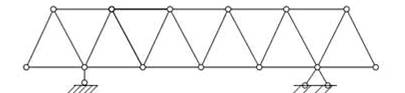
**Рис.4.8**



**Рис.4.9**

****

**Рис.4.10**

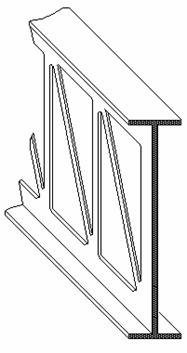
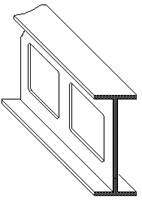
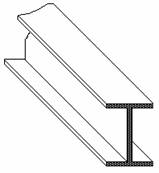
****

**Рис.4.11**

В зависимости *от назначения* различают фермы стропильные, крановые, башенные, мостовые.Мостовые фермы в зависимости *от уровня езды* делятся на фермы с ездой понизу, с ездой поверху и с ездой посередине.

**4.2. Статическая работа ферм**

Фермы часто используются для перекрытия пролетов, т.е. имеют такое же назначение, что и балки сплошного сечения.Известно, что при изгибе балки нормальные напряжения в ее поперечных сечениях достигают максимальных значений в верхних и нижних точках сечения. Желание использовать материал балки наиболее экономичным образом заставляет сосредотачивать большую часть материала в наиболее напряженных зонах, что достигается применением балок двутаврового поперечного сечения (рис.4.15). При увеличении пролета и нагрузок высоту балки приходится увеличивать. Следовательно, количество материала в стенке, где напряжения малы, будет расти. Это приведет не только к перерасходу материала в малозагруженной зоне, но и значительно увеличит собственный вес конструкции. Поэтому для экономии материала и облегчения конструкции в вертикальной стенке устраивают вырезы (рис.4.16). С дальнейшим ростом пролета и нагрузок высота сечения конструкции еще увеличивается, и стенка двутавра постепенно переходит в систему стоек. Для того, чтобы полученная конструкция сохраняла геометрическую неизменяемость, т.е. не “сложилась” при действии горизонтальных нагрузок, к системе стоек добавляют систему раскосов, в результате чего и образуется решетка фермы (рис.4.17).



**Рис.4.15 Рис.4.16 Рис.4.17**

Таким образом, фермы могут быть использованы для перекрытия больших пролетов при действии высоких нагрузок, когда использование балок сплошного сечения оказывается невыгодным или невозможным.

Как и при изгибе балки на двух опорах под действием нагрузки, направленной вниз, стержни верхнего пояса балочной фермы будут сжатыми, а нижнего - растянутыми. В консольной ферме (рис.4.10) ситуация будет обратной.

Узлы фермы, как правило, конструктивно выполняются жесткими. Однако, как показал опыт расчетов, напряжения в стержнях ферм, определенные с учетом жесткости узлов, и напряжения, определенные по шарнирной схеме, обычно отличаются не более, чем на несколько процентов. Поскольку выполнять расчет во втором случае значительно легче, жесткостью узлов фермы пренебрегают и расчет ведут по шарнирной схеме. Иными словами, при расчете фермы все ее узлы считают идеальными шарнирами.



**Рис.4.18**

Если все нагрузки на ферму приложены исключительно к узлам, а стержни ферм являются прямыми, то в стержнях ферм действуют только продольные усилия, а изгибающие моменты и перерезывающие усилия отсутствуют. Действительно, вырежем мысленно любой стержень из фермы, заменив действие остальных стержней на него усилиями, передаваемыми через шарниры (рис.4.18). Поскольку других нагрузок на стержень нет, равнодействующие этих сил должны быть направлены по оси стержня. Если бы это было не так, стержень не мог бы находиться в равновесии, в чем легко убедиться, составив уравнение моментов относительно любого из шарниров. Очевидно, единственным усилием, которое в этом случае будет возникать в стержне, будет постоянное по его длине продольное усилие.

**4.3. Геометрическая неизменяемость ферм**

Для обеспечения геометрической неизменяемости необходимо, во-первых, чтобы связей, наложенных на перемещение узлов фермы было достаточно, во-вторых, они были правильно размещены. Следовательно, исследование геометрической неизменяемости фермы состоит из двух шагов: проверки достаточности числа связей и анализе правильности их размещения (*структурном анализе фермы*). Как обычно, при анализе геометрической неизменяемости смещения, вызванные деформированием стержней в расчет не берутся. Иными словами, при анализе геометрической неизменяемости ферм, как и любых других стержневых систем, будем считать стержни абсолютно жесткими.Каждый узел плоской фермы имеет две степени свободы, т.е. имеет возможность линейного смещения, например, в вертикальном и горизонтальном направлениях. Следовательно, минимальное количество связей, необходимых для закрепления узлов фермы от смещений, должно равняться удвоенному числу узлов. Часть из этих связей должна обеспечивать закрепление фермы относительно основания. Таким образом, минимальное число стержней в ферме, необходимое для обеспечения ее геометрической неизменяемости определяется по формуле:

http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image042.gif,                                                                                           (4.1)

где http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image044.gif-число стержней в ферме, http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image046.gif- число узлов, а http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image048.gif-число опорных связей.

Условие (4.1) одновременно является условием статической определимости фермы. Действительно, для каждого узла можно составить два уравнения равновесия- условия равенства нулю проекций на вертикальную и горизонтальную оси всех действующих на узел внешних сил и сил, действующих со стороны стержней и реакций опор. Неизвестными же являются продольные усилия в каждом стержне и реакции в опорах. Записав все эти http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image050.gif уравнений, получим систему уравнений, которую в матричной форме можно записать в виде:

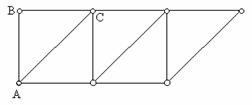
*AX=B,*                     (4.2)

где *Х* - вектор неизвестных усилий в стержнях и опорных связях, *В* - вектор проекций внешних нагрузок на узлы, *А* - матрица системы.

Для того, чтобы система (4.2) была замкнутой, необходимо чтобы число уравнений http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image050.gif совпадало с числом неизвестных, т.е. выполнялось условие (4.1).

Если количество стержней в ферме будет больше, чем требуется согласно (4.1), то ферма будет статически неопределимой, если меньше - то геометрически изменяемой.

При этом, важно отметить, что условие (4.1) является необходимым, но не достаточным для обеспечения геометрической неизменяемости. Как уже упоминалось, кроме обеспечения необходимого числа связей, требуется их правильное размещение.



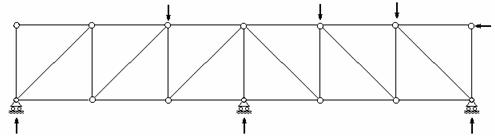
**Рис.4.19**

Систему, в которой невозможны взаимные смещения узлов, в предположении, что все стержни абсолютно жесткие, называют *жестким диском*. В шарнирном треугольнике (например, *ABC* на рис.4.19) взаимное смещение узлов будет невозможным, следовательно он является жестким диском. Присоединение к такому треугольнику еще одного узла двумя не лежащими на одной прямой связями приведет к образованию системы, в которой также взаимные смещения узлов будут невозможны. Если продолжить этот процесс, то полученная система также будет жестким диском. Примером жесткого диска является *простейшая ферма*, т.е. ферма, состоящая из шарнирных треугольников (рис.4.19). Взаимные смещения узлов в такой фермы невозможны. Остается только позаботиться о прикреплении полученной простейшей фермы к основанию.

Для того, чтобы обеспечить неподвижность простейшей фермы относительно основания, необходимы как минимум три опорных связи, линии действия которых не параллельны и не пересекаются в одной точке.

Рассмотрим в качестве примера ферму, изображенную на рис.4.1. Очевидно, она относится к простейшим фермам. В ней http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image044.gif=25, http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image046.gif=14, http://www.stroitmeh.ru/lect7.files/image048.gif=3. Равенство (4.1) выполняется: 25=2⋅14-3=25. Линии действия трех опорных связей (опорных реакций на рис.4.1) не параллельны и не пересекаются в одной точке, следовательно ферма геометрически неизменяема.

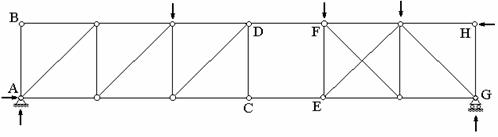
Теперь выполним перестановку опорных связей. Отбросим на левой опоре одну связь, сделав неподвижную опору катковой, но добавим еще одну катковую опору в центре пролета фермы (рис.4.20).



**Рис.4.20**

В результате, количество опорных связей не изменилось, а осталось равным трем, т.е. равенство (4.1) осталось справедливым. Однако линии действия опорных связей стали параллельными - направленными вертикально вверх. В результате система получила возможность смещения в горизонтальном направлении, т.е. стала геометрически изменяемой.

Если же в ферме, изображенной на рис.4.1, выполнить перестановку стержней, как показано на рис.4.21, равенство (4.1) останется неизменным, но система окажется геометрически изменяемой за счет неправильного распределения связей. Это очевидно, т.к. шарнирами *C, D, E* и *F* образуется шарнирный квадрат, который при приложении малейшей нагрузки обращается в ромб.



**Рис.4.21**

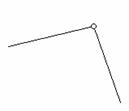
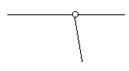
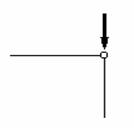
Если ферма образована из двух жестких дисков, то для того, чтобы исключить взаимные смещения узлов в полученной системе, необходимо, чтобы они соединялись между собой как минимум тремя связями, линии действия которых не параллельны и не пересекаются в одной точке.

В ферме на рис.4.21 два жестких диска *ABCD* (он представляет собой простейшую ферму) и *FEGH* (ферма, образованная из простейшей добавлением одной “лишней” связи) соединяются между собой только двумя связями *DF* и *CE*, что и приводит к геометрической изменяемости фермы, в чем мы уже убедились.Ферма образована двумя шарнирными треугольниками *ABC* и *DEF*, связанными между собой тремя связями- *AF, BE,* и *DC*, линии действия которых не параллельны и не пересекаются в одной точке. Прикрепление образованного в результате жесткого диска к основанию выполнено при помощи одной неподвижной и одной катковой опоры, т.е. также при помощи трех связей, линии действия которых не параллельны и не пересекаются в одной точке. Следовательно, ферма геометрически неизменяема. В случаях, когда простым структурным анализом не удается доказать геометрическую неизменяемость фермы, приходится пользоваться более сложными методами. Одним из них является *статический метод анализа геометрической неизменяемости ферм*. Идея метода заключается в следующем. Для геометрически изменяемой фермы система уравнений (4.2) не должна иметь решений, следовательно матрица *А* должна быть особенной, т.е. ее определитель должен быть равен нулю. Как известно, если в однородной системе линейных алгебраических уравнений *АХ*=0 определитель матрицы *А* равен нулю, то система кроме тривиального решения *Х*=0 допускает и ненулевое решение. Поэтому, в стержнях статически определимой, но геометрически изменяемой фермы при нулевой нагрузке может возникнуть система самоуравновешенных сил. Для того, чтобы доказать геометрическую неизменяемость фермы, необходимо доказать, что при отсутствии внешней нагрузки в ее стержнях не может возникнуть усилий. Если же оказывается, что при отсутствии нагрузки в стержнях фермы могут существовать ненулевые усилия, то это указывает на равенство определителя матрицы *А* нулю, а значит и на геометрическую изменяемость фермы. При выполнении анализа подобного рода, как и при выполнении статического расчета фермы, оказываются полезными правила определения нулевых стержней. *Нулевым стержнем* называется стержень, в котором при рассматриваемой нагрузке усилие равно нулю. Приведем эти правила.

1. Если в незагруженном узле под углом соединяются два стержня, то оба стержня - нулевые (рис.4.22). В этом легко убедиться, составив уравнения проекций сил на оси, совпадающие с направлением стержней.

2. Если в незагруженном узле сходятся сходятся три стержня, причем два лежат на одной прямой, то третий стержень - нулевой (рис.4.23). В этом легко убедиться, составив уравнение проекций сил на ось, перпендикулярную двум стержням, лежащим на одной прямой.

3. Если к узлу, в котором сходятся два стержня, приложена сила, направление действия которой совпадает с одним из них, то второй стержень - нулевой (рис.4.24). В этом легко убедиться, составив уравнение проекций сил на ось, перпендикулярную линии действия внешней силы.

**Рис.4.23 Рис.4.24 Рис.4.22**

4. Если в узле сходятся три и более стержней, то те из них, о которых заранее известно, что они являются нулевыми, при определении остальных нулевых стержней и нахождении усилий в стержнях, очевидно, могут быть мысленно отброшены.

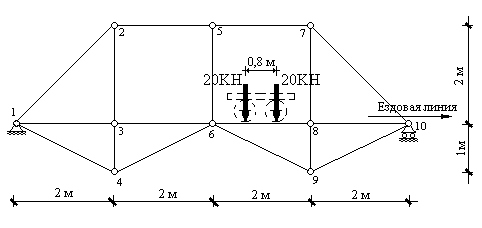
5. Если обо всех стержнях кроме одного, сходящихся в незагруженном узле, известно, что они нулевые, то и последний стержень тоже будет нулевым. В этом легко убедиться, составив уравнение проекций сил на ось, совпадающую с направлением этого стержня.

**ЛЕКЦИЯ №5 РАСЧЕТ ФЕРМ НА ПОДВИЖНУЮ НАГРУЗКУ**

***Пример 1.***Рассмотрим ферму, изображенную на рис.5.1. Необходимо:

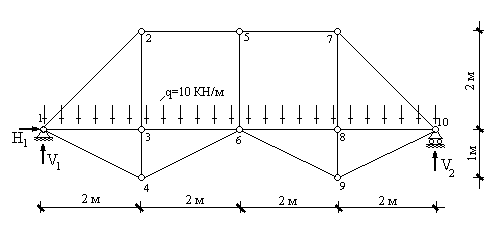
1. Используя теорию линий влияния, определить усилие в стержне фермы 2-3 от действия неподвижной системы сил, изображенной на рис.5.2

2. Определить максимальное и минимальное усилия в стержне фермы 2-3 при движении по ездовой линии (по горизонтали от узла 1 к узлу 10) системы из двух сил (рис.5.1).



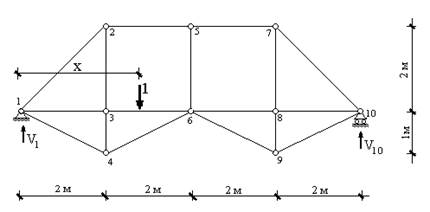
**Рис. 5.1**

3. Определить усилие от постоянной равномерно распределенной нагрузки *q*=10 кН/м, приложенной к поясу фермы, совпадающему с ездовой линией (рис.5.2).

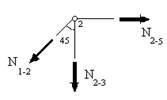


**Рис.5.2**

Построим линию влияния для стержня фермы 2-3. Для этого достаточно определить усилие в этом стержне при различных положениях единичной силы на ездовой линии.Если единичная сила находится на расстоянии *х* от левой опоры, то реакция в последней будет составлять http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image004.gif, а в правой опоре - http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image006.gif (рис.5.3). Cоставим уравнения равновесия узла 2 (рис.5.4):

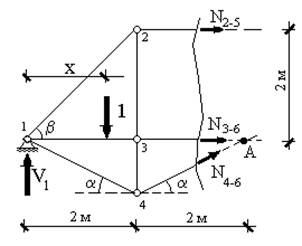


**Рис.5.3**



**Рис.5.4**

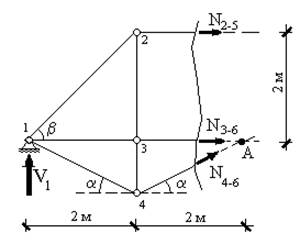
http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image012.gif http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image014.gif откуда следует, что http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image016.gif. Поскольку, нагрузки к узлу 2 не приложены, т.к. он не лежит на ездовой линии, это уравнение справедливо при любом положении грузов на ней. Для определения http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image018.gif воспользуемся способом сечений, причем рассмотрим два случая, когда единичный груз находится слева от панели, в которой располагается стержень 2-5 (рис.5.5), и справа от нее (рис.5.6).



**Рис.5.5**

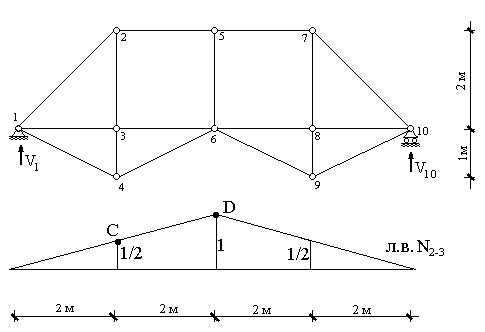
Для первого случая уравнения равновесия моментов относительно точки *А* примет вид: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image022.gif откуда: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image024.gif. Следовательно, при нахождении единичного груза слева от рассеченной панели (*x*<2м) http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image026.gif, а http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image028.gif.

Согласно этой формуле, при *x*=0 ордината линии влияния, как и следовало ожидать, равна нулю, а при *x*=2м она равна 1/2. По этим точкам строится левая ветвь линии влияния (до точки *С* на рис.5.3). Для второго случая из аналогичных рассуждений получим: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image030.gif, откуда: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image032.gif. Следовательно, при нахождении единичного груза справа от рассеченной панели (*x*>4м) http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image034.gif, а http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image036.gif. Таким образом, при *x*=4м ордината линии влияния равна 1 (точка *D* на рис.5.7), а на правой опоре, как и следовало ожидать - нулю. По этим точкам строится правая ветвь линии влияния, и далее передаточная прямая *CD*. В рассматриваемом случае ее направление, как мы видим, совпадает с направлением левой ветви линии влияния, а сама линия влияния оказалась симметричной.



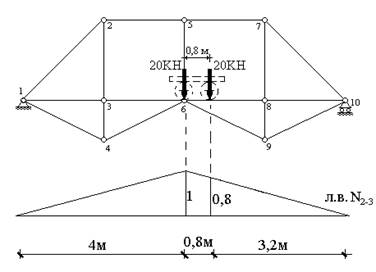
**Рис.5.6**

Теперь приступим к определению усилий в стержне 2-3.Для заданной неподвижной узловой нагрузки (рис.5.7) в соответствии с формулой (5.3) найдем величину усилия в стержне: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image040.gif. Этот же ответ был получен нами ранее в разделе “Пример расчета фермы на неподвижную нагрузку” без использования линий влияния, что подтверждает правильность проделанных вычислений.



**Рис.5.7**

Наименевыгоднейшим положением подвижной системы двух сил на ездовой линии (рис.5.7) будет положение, когда одна из них находится ровно посередине пролета фермы , т.к. в этом случае одна из сил оказывается над единственной в рассматриваемом случае вершиной линии влияния. Ордината линии влияния под силой в центре фермы равна 1, ординату под точкой приложения второй силы легко определить из подобия треугольников: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image043.gif, откуда *y*=0,8 (рис. 5.8). В соответствии с (5.3) усилие в стержне составит http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image045.gif. В силу симметрии линии влияния, в случае, когда над ее вершиной в центре пролета фермы окажется не левая, а правая сила, результат будет тем же. Построенная линия влияния не имеет отрицательных ординат, следовательно, при любом положении системы сил на ездовой линии в стержне будут возникать только растягивающие усилия. Поэтому, максимальным возможным усилием в стержне 2-3 для рассматриваемой подвижной нагрузки является 36 кН, минимальным -0 кН.



**Рис.5.8**

Наконец, определим усилие в стержне от действия неподвижной равномерно распределенной по всей длине ездовой линии нагрузки *q*=10 кН/м. Площадь фигуры, ограниченной линией влияния составляет http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image049.gif. Размерность площади фигуры оказалась такой, поскольку единичная сила, а следовательно и ординаты линии влияния продольного усилия не имеют размерности.

Теперь, в соответствии с формулой (5.4), определим усилие в стержне: http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image051.gif. ***.***

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image130.gif т. е. правый участок http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image132.gif отличается от http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image118.gif. лишь постоянным множителем 2.6 и знаком минус. Все ординаты http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image118.gif изменяются в 2,6 раз и откладываются от оси в отрицательном направлении, т. е. вниз (рис. 3,*д*). Построенную таким образом правую прямую используем на участке движения груза справа от разрезанной панели.

При положении груза слева от разрезанной панели составляем условие равновесия правой отсеченной части (рис. 2, *б*):

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image134.gif

Откуда http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image136.gif

т. е. левый участок http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image132.gif отличается от http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image118.gif лишь постоянным множителем 2,6 и знаком минус. Все ординаты http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image118.gif изменяются в 2,6 раз и откладываются от оси в отрицательном направлении т.е. вниз (рис. 3,*д*). Полученную левую прямую используем на участке движения груза http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image110.gif слева от разрезанной панели. В пределах разрезанной панели соединяем крайние ординаты прямой линией.

Отметим, что в рассмотренных линиях влияния правая и левая ветви линии влияния пересеклись под моментными точками. Это не случайно и вытекает из их построения. Эту зависимость будем использовать в дальнейшем для проверки правильности построения линий влияния.

***2.4. Линия влияния усилия*** http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image057.gif

Воспользуемся разрезом *n-n* (рис. 2, *а*). При положении груза http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image110.gif справа от разреза рассматриваем равновесие левой отсеченной части фермы (рис. 2,*в*) и составляем сумму моментов относительно моментной точки – узла 1:

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image138.gif

Откуда http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image140.gif, т. е. при грузе http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image110.gif, расположенном справа от разреза, усилие http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image057.gif равно нулю. Правая прямая линии влияния в этом случае сливается с осью линии влияния (рис. 3, *е*).

Для построения левой прямой линии влияния рассмотрим условие равновесия правой отсеченной части фермы (рис.2, *б*):

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image142.gif

Откуда http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image144.gif

Это означает, что усилие http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image057.gif равно опорной реакции *RB*, умноженной на (–3,125).

Для построения графика этой зависимости откладываем на правой опорной вертикали вниз отрезок 3,125 и соединяем его конец с нулевой точкой на левой опорной вертикали. В пределах разрезанной панели соединяем крайние точки левой и правой ветвей передаточной прямой. Построенная таким образом линия влияния http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image057.gif изображена на рис. 3, *е*. Отметим, что вновь правая и левая ветви линии влияния пересеклись под моментной точкой – узлом 1.

***2.5. Линия влияния усилия*** http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image079.gif

Вырежем узел 7(рис. 2, *е*) и спроектируем действующие на этот узел силы на горизонтальную ось:

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image146.gif

следовательно, http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image083.gif.

Спроектируем те же силы на вертикальную ось:

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image148.gif

откуда http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image150.gif.

Таким образом, линия влияния http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image079.gif может быть получена умножением всех ординат линии влияния http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image059.gif на коэффициент (-2∙sinα). Линия влияния http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image079.gif имеет вид треугольника (рис. 5, *ж*) с наибольшей ординатой (под узлом 7), равной 1,300(2∙0,3846)=1,000.

Если же груз http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image110.gif перемещается по верхнему поясу фермы («езда поверху»), то в тот момент, когда он окажется в узле 7, уравнение http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image152.gif примет вид

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image154.gif

Следовательно, в этом случае ордината на линии влияния http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image079.gif под узлом 7 меньше на единицу, чем ордината на этой же линии влияния при езде по нижнему поясу, и равна нулю (сплошная линия на рис. 3, *ж*).

**2.6. *Вычисление по линиям влияния усилия от заданной постоянной нагрузки***

При вычислении усилий в стержнях от сосредоточенных сил P=6 kH уравнение (1.1) принимает более простой вид

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image158.gif

Тогда http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image160.gif

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image162.gif

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image164.gif

http://www.stroitmeh.ru/lect13.files/image166.gif

Найденные с помощью линий влияния усилия в стержнях фермы совпадают с полученными аналитически значениями.

**Лекция №6 Расчет плоских статически определимых рам**

**6.1 Построение эпюр для плоских рам**

*Плоской рамой* называется стержневая система, элементы которой жестко или шарнирно соединены между собой, нагруженная в своей плоскости.Вертикально (или под наклоном) расположенные стержни рамы называются *стойками*, а горизонтальные - *ригелями*. Жесткость узлов устраняет возможность взаимного поворота скрепленных стержней, то есть в узловой точке углы между их осями остаются неизменными.Как и многие другие системы, рамы делятся на статически определимые и статически неопределимые (рис.6.1, б,в,д,е).Промежуточный шарнир снижает степень статической неопределимости рамы на величину m - 1, где m - число стержней, сходящихся в шарнире. Если m >2, то шарнир называется *кратным* (рис.6.1, д).Для определения *степени статической неопределимости* плоской рамы можно воспользоваться формулой:

n = 3К-Ш,

где n - степень статической неопределимости; К - число замкнутых контуров в предположении полного отсутствия шарниров; Ш - число шарниров в пересчете на одиночные.

Основание (земля) рассматривается как стержень.

Для рамы (рис.6.1, б) имеем:

К=1; Ш=0;

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image002.gif

Для рамы (рис.10,д):

К=3; Ш=3

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image004.gif

В более простых случаях, когда отсутствуют замкнутые контуры и промежуточные шарниры, то есть когда используются комбинации тех же опор, что и в балках (жесткая заделка, шарнирно-подвижная и шарнирно-неподвижная опоры), для определения степени статической неопределимости используется “балочная” формула:

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image083.gif,

где r - число неизвестных реакций; S - число уравнений статики ( для плоской рамы S=3).

В данной работе ограничимся рассмотрением простейших статически определимых рам трех видов:

1) с жесткой заделкой;

2) на двух шарнирных опорах (неподвижной и подвижной);

3) на двух шарнирно неподвижных опорах с простым промежуточным шарниром.

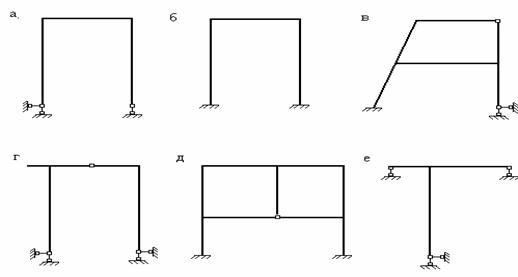


Рис. 6.1

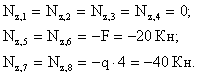
Из шести внутренних силовых факторов в сечениях плоской рамы в общем случае возникают три: продольная сила http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image085.gif; поперечная сила http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif; изгибающий момент http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif.*Правила знаков.* Для http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image085.gif и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif сохраняются ранее принятые правила знаков.http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image088.gif, если внешняя нагрузка, приложенная к рассматриваемой отсеченной части, вызывает в данном сечении растяжение и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image089.gif- в противном случае. http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image090.gif, если внешняя нагрузка, приложенная к рассматриваемой отсеченной части, стремится повернуть данное сечение по часовой стрелке и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image091.gif - в противном случае. Ординаты эпюр http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image085.gif и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif (как, впрочем и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif) откладывают, как и обычно, перпендикулярно к оси элементов рамы. Иногда положительные ординаты http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image085.gif и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif откладывают с внешней стороны рамы, а отрицательные – с внутренней, но рама часто имеет такую конфигурацию, при которой невозможно выделить внутреннюю и внешнюю стороны, поэтому *в дальнейшем условимся:* ординаты эпюр http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image085.gif и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif откладываются в произвольную сторону, но обязательно указывается знак.Для изгибающих моментов специального правила знаков нет, а при вычислении момента в любом сечении знак принимается произвольно. Но результат вычислений *всегда откладывается со стороны сжатого волокна* элемента рамы. При этом знак на эпюре http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif никогда не указывается. Такое условие полностью соответствует характеру построения эпюр http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif в балках, где в соответствии с принятым для изгибающих моментов правилом знаков (см. 1.7) ординаты эпюр http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif всегда оказывались расположенными со стороны сжатых волокон балки.

### 6.2. Рамы с жесткой заделкой

**Пример 1.** Рассмотрим жесткозащемленную плоскую раму (рис.6.2, а). В жесткой заделке рамы в общем случае нагружения возникают три опорные реакции: две силы (http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image092.gif и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image093.gif ) и опорный момент (http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image094.gif). Для построения эпюр определение этих реакций не является безусловной необходимостью: расчет, как и в случае жесткозащемленной балки, можно вести от свободного конца, то есть всякий раз так выбирать отсеченную часть для рассматриваемого сечения, чтобы в нее не попадала опора с неизвестными опорными реакциями. Тем не менее, иногда целесообразно вычислить опорные реакции. Это позволяет проверить построение эпюр или облегчить их построение. Для вычисления реакций в жесткозащемленной раме используются три условия равновесия:

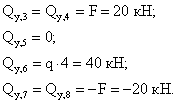


Построим эпюры http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image095.gif для рассматриваемой рамы, не вычисляя опорные реакции. Методика построения эпюр аналогична ранее рассмотренной для балок, т.е. сначала необходимо наметить характерные сечения. В дополнение к ранее указанным, *в рамах характерными являются также сечения,* расположенные бесконечно близко к жесткому узлу на всех элементах, сходящихся в этом узле.  *Построение эпюры http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image096.gif.* Следуя установленным правилам, в рассматриваемой раме можно выделить 8 характерных сечений. Продольная сила в любом из них численно равна алгебраической сумме проекций всех сил, приложенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, на продольную ось стержня. При этом следует учитывать, что положение продольной оси будет изменяться в зависимости от того, чему принадлежит рассматриваемое сечение - стойкам или ригелю.



*Построение эпюры http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif.*Поперечная сила в любом сечении численно равна алгебраической сумме проекций всех сил, приложенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, на поперечную ось рамы. Положение поперечной оси также будет изменяться в зависимости от принадлежности данного сечения стойкам или ригелю. С учетом правила знаков, двигаясь от свободного конца к жесткой заделке, получим для http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image086.gif:

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image097.gif (проекция пары М на любую ось равна нулю);



Необходимо обратить внимание на тот факт, что http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image098.gif, т.е. что поперечная сила в верхних сечениях противоположных стоек от действия силы, приложенной к правой стойке (при заделке, расположенной слева, и наоборот) имеет противоположные знаки. Отчасти это можно объяснить противоположными направлениями оси y для сечений 4 и 7, но более строгое обоснование указанного равенства будет дано ниже. *Построение эпюры http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif.* Изгибающий момент в любом сечении численно равен алгебраической сумме моментов всех нагрузок, приложенных по одну сторону от рассматриваемого сечения, относительно этого сечения (более строго: относительно оси x этого сечения). Обратим внимание на два важных замечания:

1) составляющая момента http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image087.gif от действия сосредоточенного момента М всегда одинакова и равна М;

2) под плечом силы всегда понимается длина перпендикуляра, опущенного из центра тяжести данного сечения *на линию действия силы.* Это означает, что, например, плечо силы F для сечений 4-7 одинаково и равно 3 м.

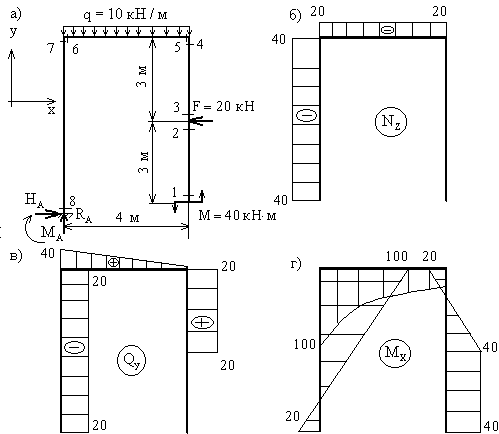


Рис. 6.2

Таким образом, для сечений 1-8 получим:

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image043.gif (сжатым является правое волокно в сечениях 1-3, поэтому ордината отложена вправо от оси стойки);

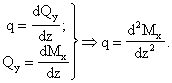
http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image045.gif(знаки "+" и "-" здесь имеют относительный характер; результирующий момент сжимает левые волокна в сечении 4 и нижние волокна в сечении 5, поэтому ордината "20" откладывается соответственно влево и вниз);

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image047.gif (сжаты нижние волокна);

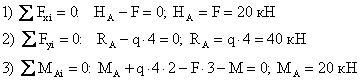
http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image049.gif(сжаты правые волокна);

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image051.gif(сжаты левые волокна).

Между http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image053.gif в плоских рамах сохраняются те же зависимости, что и в балках, а именно:



Из этого следует, что правила контроля эпюр http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image012.gif и http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image014.gif остаются теми же, что и для балок Эпюры http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image033.gif в плоских рамах строятся наиболее просто и при отсутствии нагрузок, распределенных вдоль стержней, представляют собой графически отрезки прямых, параллельные осям стержней ( или совпадают с ними при http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image057.gifЕсли проанализировать процесс построения эпюр (рис.6.2,б-г), то очевидно, что наиболее "сложно" вычислять ординаты в сечениях стержня, примыкающего к заделке ( на рис.6.2,б-г это сечения 7 и 8). Как уже отмечалось, с этой целью иногда вычисляют реакции http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image059.gif и момент http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image028.gif.При принятом для всей рамы направлении осей http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image061.gif (рис.6.2,а) уравнения равновесия имеют вид:



Полученный для каждой из величин http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image064.gif знак "+" говорит, что направления их были выбраны правильно.После вычисления опорных реакций значения величин http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image066.gif в сечениях 7 и 8 (как, впрочем, и в любом другом) можно вычислять, двигаясь от жесткой заделки к свободному концу.

Например, для сечений 7 и 8:

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image068.gif (знак "-" указывает на сжатие в этих сечениях с силой http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image026.gif);

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image071.gif (т.к. реакция http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image024.gif стремится повернуть каждое из этих сечений против часовой стрелки.) При сравнении величины http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image074.gif с ранее полученной величиной http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image076.gif видно, что http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image040.gif , о чем уже говорилось выше.

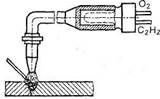
http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image079.gif (сжаты левые волокна стойки);

http://www.stroitmeh.ru/lect19.files/image081.gif (сжаты правые волокна стойки).

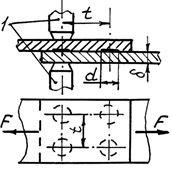
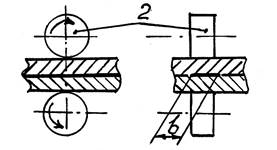
Разумеется, результаты получаемые для любого сечения при движении от свободного конца к жесткой заделке и при движении в обратном направлении одинаковы.

# *Лекция №7 Сварные соединения металлоконструкций*

С точки зрения общности расчетов все соединения делят на две большие группы: *неразъемные и разъемные* соединения.***Сварка* — *это технологический процесс получения неразъемного со­единения металлических или неметаллических деталей с применением нагрева (до пластического или расплавленного состояния),*** выполненного таким обра­зом, чтобы место соединения по механическим свойствам и своему составу по возможности не отличалось от основного материала детали.Известно около 70 способов сварки. В соответствии с традиционной классификацией они делятся на две большие группы: сварка плавлением и сварка давлением.При ***сварке плавлением*** металл нагревается в зоне сварки до жидкого состояния. К этому виду относятся дуговая, плазменная, лазерная, электрошлаковая, электронно-лучевая, ионно-лучевая, индукционная, газовая, термитная, литейная и др.При соединении деталей с помощью сварки плавлением к расплавляе­мой области подводят присадочный материал, который заполняет свари­ваемое место (рис. 1). Затвердевший после сварки металл, соединяющий сваренные детали, *называют* ***сварным швом.***В зависимости от вида источника энергии различают *термический*, *термомеханический и механический* классы сварки.Основные виды электросварки — ***дуговая, газовая* и *контактная.*** **Дуговая сварка** - наиболее распространенный вид. Применяется везде, где есть источники электроэнергии.Разновидности дуговой сварки:- *ручная сварка;* этот метод сварки отличается низкой производитель­ностью, но легко доступен для применения;- *полуавтоматическая сварка* под слоем флюса; применяется для кон­струкций с короткими прерывистыми швами;- *автоматическая сварка* под слоем флюса; этот метод сварки высоко­производителен и экономичен, дает хорошее качество шва, применя­ется в крупносерийном и массовом производстве. ***Газовая сварка*** применяется в основном там, где нет источников электроэнергии, например, при ремонте в полевых условиях.При газовой сварке свариваемый и присадочный металлы расплавляют в пламени, получающемся при сгорании какого-либо горючего газа (чаще всего – ацетилена) в смеси с кислородом.Газовую сварку осуществляют и без применения присадочного материала, где формирование шва проводят за счет расплавления кромок основного металла (соединения - стыковое с отбортовкой и угловое).Эту сварку применяют в основном при ремонтных работах, при заварке дефектов чугунного литья, при сварке тонколистовых конструкций из малоуглеродистых сталей (толщиной до 5 мм) и некоторых цветных металлов.По сравнению с электродуговой сваркой, газовая сварка - процесс малопроизводительный.*Недостатки:* прочностные качества сварных соединений на сталях и алюминии невысоки, и также возникают значительные деформации свариваемых деталей.***Контактная сварка***применяется в серийном и массовом производстве при нахлесточном соединении тонкого листового металла (точечная, роли­ковая) или при стыковом соединении круглого и полосового (стыковая сварка).Для образования соединения на специальных контактных машинах стык разогревают электрическим током или силами трения до пластичного состояния металла и сдавливают. Например, на долю стыковых соединений контактной сварки приходится более половины выпуска сварного режущего инструмента, где режущая (рабочая) часть из качественной быстрорежущей стали приварена силами трения и сжатия к хвостовой части из углеродистой или легированной стали меньшего качества (более дешевой).Контактную точечную и шовную сварку применяют для соединения деталей из тонкого (δ≤3мм) листового материала. При точечной сварке листы нагревают и сдавливают электродами 1 (рис.7.1), при шовной – роликами 2 (рис.1.2).При контактной сварке (сварка давлением) присадочный материал не применяют. Контактная сварка основана на использовании тепла, выде­ляющегося в месте соприкосновения сваривае­мых деталей (например, при прохождении че­рез них электрического тока). Сварка произво­дится с применением механического давления, под действием которого детали, предварительно нагретые в месте соединения (контакта) до пластического состояния или оплавления, образуют сварной шов.



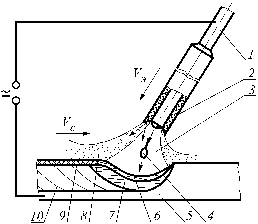
**Рис.7. 1. Получение сварного шва газовой сваркой**

**Рис.7.1 Рис.7.2**

***Сварным соединением*** *называют неразъемное соединение деталей с помощью сварных швов.* Если в заклепочном соединении соединяющим эле­ментом является заклепка, то в сварных - расплавленный металл, создаю­щий при остывании неразъемное соединение, то есть такое, которые не может быть разобрано без повреждения дета­лей. Сварные соединения лучше других приближают составные детали к целым и позволяют изготавливать детали неограниченных размеров. Прочность сварных соединений при статических и ударных нагрузках доведена до прочности деталей из целого металла. Освоена сварка всех конструкционных сталей, включая высоколегированные, цветных сплавов и пластмасс.Масса сварных конструкций при тех же габаритах значительно меньше клепаных (на 15%). Экономия металла достигается за счет использова­ния полной площади сечения, а также возможности более рационального конструирования (например, применения стыковых соединений в тех слу­чаях, когда при заклепочном соединении приходится применять накладки).

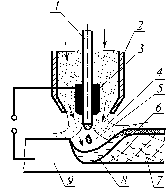
### Ручная дуговая сварка .Схема ручной дуговой сварки покрытым электродом приведена на рис.7.2. На ней обозначены: *1* – хвостовик электрода; *2* – электродное покрытие; *3* – дуга; *4* – капля, переходящая с конца электрода в сварочную ванну; *5* – свариваемый металл; *6* – жидкий шлак; *7* – сварочная ванна; *8* – газопаровая оболочка; *9* – затвердевший шлак; *10* – шов.



**Рис.7.2**

Для выполнения сварочной операции металл в зоне сварки нагревается и расплавляется под действием теплоты дуги, горящей между электродом и основным металлом. В результате развивается эмиссия электронов и ионизация газов и паров в промежутке между электродом и основным металлом, загорается дуга. Материал электрода, расплавленный дугой, заполняет стык соединяемых элементов. После остывания расплавленного металла образуется сварной шов. Для защиты плавящегося металла от попадания вредных веществ из воздуха на поверхность электрода наносится толстая защитная обмазка, выделяющая при плавлении электрода большое количество шлака и газов. Так как шлак имеет меньшую плотность, чем металл, он всплывает на поверхность сварочной ванны и изолирует металл от окружающей среды.Для выполнения сварочной операции возбуждают дугу прикасанием свободным от покрытия торцом электрода к основному металлу, а прерывают дугу – отрывом от него.При ручной дуговой сварке швы накладываются во всех пространственных положениях – нижнем, вертикальном, потолочном. Наиболее высокое качество швов получается в нижнем положении.Выбор режима сварки заключается в определении диаметра электрода и силы сварочного тока и зависит от толщины свариваемых элементов.***Сварочные электроды.*** Электрод для ручной дуговой сварки – это металлический стержень, на который нанесено покрытие. Как отмечалось ранее, при воздействии теплоты дуги компоненты покрытия электрода расплавляются, образуя жидкие шлаки и газы.Государственным стандартом электроды подразделяются на классы: У – для сварки углеродистых и низколегированных сталей; Л – для сварки легированных конструкционных сталей; Т – для сварки легированных теплоустойчивых сталей; В – для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами.***Применение.***Ручная дуговая сварка в основном применяется при монтажных и ремонтных работах, а также в единичном и мелкосерийном производствах половины всего объема сварочных работ. Этим способом заваривают трещины и другие дефекты, ***Преимущества.*** При ручной дуговой сварке можно накладывать швы в любом пространственном положении; выполняются сварные соединения всех типов; применяемое оборудование отличается простотой, надежностью и небольшими габаритами.***Недостатки.*** Низкая производительность; невысокое качество швов; автоматически не регулируется сила сварочного тока.

**Механизированная (или полуавтоматическая) сварка** – это дуговая сварка, при которой подача плавящегося электрода и перемещение дуги относительно изделия выполняются с использованием механизмов. С ее помощью выполняют любые сварные соединения: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные и др.**Автоматической** называют дуговую сварку, при которой возбуждение дуги, подача электрода и перемещение дуги относительно изделия выполняются механизмами без непосредственного участия человека, в том числе и по заданной программе.На рис.7.3 приведена схема образования сварного соединения при рассматриваемых видах сварки. На ней обозначены: *1* – электродная проволока; *2* – сопло (насадка); *3* – токоподводящий наконечник; *4* – газ (флюс); *5* – дуга; *6* – затвердевший шлак; *7* – шов; *8* – сварочная ванна; *9* – основной (свариваемый) металл.



**Рис.7.3**

При механизированной и автоматической сварке *образование сварного соединения* происходит следующим образом. Теплотой дуги электрод и основной металл расплавляются, капли расплавленного металла с конца электрода попадают в сварочную ванну, где перемешиваются с расплавленным основным металлом. Жидкий металл сварочной ванны подвергается металлургической обработке за счет использования газа или флюса (в этом состоит отличие от ручной дуговой сварки). То есть он раскисляется и легируется. При передвижении дуги вдоль свариваемых кромок перемещается и сварочная ванна. В ее хвостовой части металл охлаждается, кристаллизуется и образуется сварное соединение.Различают следующие виды механизированной (автоматической) сварки.

1. *В* ***углекислом газе*** и его смесях с кислородом сваривают низко- и среднеуглеродистые, а также низколегированные стали. В углекислом газе сваривают стали толщиной до 40, а в смесях газов – до 80 мм. Защита смесью газов улучшает технологические и металлургические характеристики процесса сварки . Расход углекислого газа зависит от мощности дуги, вылета электрода, воздушных потоков в помещении, где выполняется сварка.

2. *В* ***инертных газах*** (аргоне или гелии) можно сваривать алюминий, магний, титан и их сплавы. Свариваются низко- и среднеуглеродистые, низко-, средне- и высоколегированные конструкционные стали. Использование названных газов целесообразно, так как аргон имеет плотность почти в 1,5 раза большую, чем воздух, а гелий – значительно меньшую, чем воздух и аргон. Кроме того аргон и гелий не образуют химических соединений с металлами, поэтому в этих газах можно сваривать любые металлы и сплавы.

3**. *Под флюсом*** свариваются низко- и среднеуглеродистые, низко-, средне- и высоколегированные стали, чугун, титан, медь, алюминий и их сплавы.

***Флюс*** – порошкообразный материал, который при сварке выполняет такие же функции, как покрытие электрода при ручной дуговой сварке. Основой флюса является силикат марганца SiO2∙MnO. Флюсы в зависимости от способа изготовления бывают двух видов: плавленые и неплавленые. Плавленые получают сплавлением исходных компонентов в печах. К неплавленым относятся керамические и спеченные флюсы. Керамические флюсы изготавливаются из порошкообразных материалов, соединяемых в зерна клеящими веществами, например жидким стеклом. Спеченные флюсы получают спеканием исходных порошкообразных материалов при высоких температурах с последующим дроблением частиц до заданных размеров.Во время сварки часть флюса расплавляется, а после затвердения образует шлаковую корку. Нерасплавленная часть флюса после просева используется повторно.4. ***Порошковыми проволоками*** сваривают низкоуглеродистые и низколегированные стали, а специальными порошковыми проволоками – некоторые высоколегированные, в частности, нержавеющие стали, сплавы меди. Ими можно сваривать стали толщиной до 40 мм. Порошковые проволоки представляют собой металлическую оболочку, заполненную ***шихтой*.** .

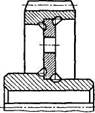
***Сварочное оборудование*.** Для механизированной и автоматической сварки применяются соответственно полуавтоматы и автоматы, комплектуемые источниками тока для питания дуги.Автоматы выполняют следующие функции: возбуждение дуги и автоматическое регулирование процесса сварки; механизированную подачу электродной проволоки со скоростью, равной скорости плавления; механизированное передвижение дуги относительно свариваемых кромок; подачу флюса или газа в зону дуги.Автомат состоит из двух основных устройств: трактора или самоходной головки и аппаратуры управления. Автоматы для сварки в защитных газах, кроме того, имеют газовую аппаратуру, которая включает газовый редуктор, баллон с углекислотой, подогреватель газа и осушитель, для очистки газа от влаги.К специальным условно отнесены следующие виды сварки:

*–* **термический класс:** лазерная, электронно-лучевая, плазменная, электрошлаковая, термитная, газовая;

– **термомеханический и механический классы:** диффузионная, дугопрессовая, газопрессовая, трением, ультразвуковая, взрывом, холодная;

*–* **контактная** сварка: точечная, рельефная, шовная стыковая.

Рассмотрим некоторые из них более подробно.***Лазерная сварка.*** Лазерный луч с помощью оптической системы фокусируется на поверхности материала в световое пятно диаметра 100 мкм. При этом реализуется очень высокая плотность световой мощности и начинается плавление металла. В результате поглощения электромагнитного лазерного излучения металлом в пятне поглощения (световом пятне) образуется сварочная ванна. Мощные лазеры позволяют накладывать непрерывные швы с глубиной проплавления до 20 мм. Ими сваривают не только металлы, но и неметаллические материалы, например стекло, кварц и др. Лазерную сварку можно выполнять на воздухе или в камере с контролируемой атмосферойС *применением* лазерной сварки приваривают наконечники к лопастям газовых турбин, закаленные режущие кромки к полотнам металлорежущих пил, соединительные планки к стволам охотничьих ружей, герметизируют корпусы приборов и др.*Преимущества* лазерной сварки: швы можно накладывать в труднодоступных местах; отсутствует контакт со свариваемым металлом и поэтому не загрязняются металл сварочной ванны и шов; мала зона термического влияния и поэтому незначительно коробление сварной конструкции.***Плазменная сварка.*** Металл в зоне сварки нагревается плазмой до расплавления с образованием сварочной ванны. После кристаллизации происходит образование сварного шва.*Плазма* – частично или полностью ионизированный газ с высокой концентрацией заряженных частиц, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Ионизированные частицы плазмы обладают запасом кинетической и потенциальной энергий. Для создания плазмы применяют различные источники энергии, например, электрический разряд в газах, лазерный луч, процессы горения и взрыва, ядерные реакции. С целью повышения степени ионизации плазма обжимается в канале сопла плазмотрона.Установка для автоматической плазменной сварки состоит из плазмотрона, самоходной головки, аппаратуры управления, системы газопитания и источника тока. Катоды плазменных горелок изготовляют из вольфрама с присадками лантана, а аноды (сопла) – из меди и латуни. Поскольку в плазме развиваются высокие температуры, электроды (катод и анод) интенсивно охлаждают проточной водой.*Применение.* Плазменной сваркой сваривают мембранные элементы, сифоны, термопары, тонкостенные трубы. Она применяется в производстве статоров электродвигателей, кузовов автомобилей, труб, вытяжных каналов двигателей внутреннего сгорания и др.*Преимущества.* Нагрев свариваемого металла можно достаточно точно регулировать в широком интервале температур, изменяя форму и размеры сопла, состав и расход газов и т. д. Поэтому весьма стабильны геометрические параметры швов, меньше склонность их к образованию трещин.***Точечная сварка*** относится к группе контактной сварки, при которой для образования соединения в свариваемый металл вводятся два вида энергии: тепловая и механическая. При точечной, а также рельефной, шовной сварке металл в зоне сварки нагревается до жидкого состояния с большой скоростью, достигающей десятков тысяч градусов в секунду. Затем заготовки прижимаются одна к другой, в результате чего поверхностные выступы сминаются, а зерна металла измельчаются. После выключения сварочного тока металл в зоне сварки охлаждается и кристаллизуется. В результате образуется соединение, называемое *сварной точкой*. Воздействие внешнего давления и пластическая деформация благоприятно влияют на уплотнение ядра при кристаллизации металла.Точечная сварка выполняется на машинах переменного, постоянного тока и конденсаторных машинах.***Ультразвуковая сварка.*** Соединение при этом способе сварки образуется в результате воздействия на свариваемый материал ультразвуком в сочетании с небольшими сдавливающими усилиями. При введении ультразвука окислы и загрязнения, имеющиеся на сопрягаемых поверхностях, разрушаются и удаляются к периферии, а в металле развивается пластическая деформация и нагрев на локальных участках, на которых происходит смятие микровыступов и измельчение зерен металла.Установка для сварки ультразвуком состоит из высокочастотного генератора электрических колебаний, магнитостриктора, преобразующего высокочастотные электрические колебания в механические, волновода, сварочного наконечника, привода сжатия.*Применение.* Ультразвуком в основном сваривают пластичные металлы: алюминий, медь, никель, а также некоторые неметаллические материалы – пластмассы., стекло, полупроводники. Ультразвуком выполняют точечные и шовные нахлесточные соединения. Ультразвуковая сварка применяется в производстве конструкций из тонкого металлического листа в приборостроении и радиотехнике, а также для приварки обшивок к несущим конструкциям летательных аппаратов.*Преимущества.* Из-за незначительного нагрева свариваемых деталей невелики деформации конструкции в зоне термического влияния. Возможна сварка разнородных трудносвариваемых металлов; сварка деталей из тонкого листа и фольги; можно приваривать детали малой толщины к толстым; электрическая мощность сварочного оборудования невелика.***Сварка взрывом.*** Для образования сварного соединения возбуждается взрыв, в результате которого подвижная заготовка перемещается с большой скоростью к неподвижной заготовке, лежащей на опорах. При высокочастотном косом их соударении создается давление, большее предела текучести материала, и поэтому развивается пластическая деформация поверхностных слоев металла. Соударяющиеся заготовки сближаются до межатомных расстояний, и между их хорошо очищенными поверхностями возникают связи, образуется сварное соединение. Сварка выполняется на полигонах, в шахтных выработках, в бетонных и стальных взрывных камерах, а также в специальных вакуумных камерах. Этим способом сваривают углеродистые стали с нержавеющими сталями и никелевыми сплавами, стали с титаном, алюминий, медь, бронзы и другие металлы и сплавы.*Применение.* С применением сварки взрывом изготовляют многослойные плиты больших размеров из разнородных металлов, крупногабаритные тавровые и двутавровые балки, биметаллические трубы и др. Взрывом сваривают контактные провода электрифицированных железных дорог, приваривают к рельсам соединительные проводники автоблокировки. Получает распространение сварка микровзрывом миниатюрных конструкций в радио- и электронной промышленности, точечная сварка слоев фольги.*Преимущества и недостатки.* Сварка взрывом характеризуется высокими технико-экономическими показателями, надежностью сварных конструкций. Однако при этом способе возникает сильный шумовой эффект и образование ударной волны.***Холодная сварка.*** Сварное соединение можно получить не только при нагреве металла, но и при комнатных и отрицательных температурах.*Применение.* Холодной сваркой соединяют пластичные материалы, в основном, цветные металлы и их сплавы. С ее помощью можно выполнять нахлесточные и стыковые сварные соединения. Этим способом сваривают различные элементы электро- и радиотехнических устройств. Выполняют сварку электроприводов из цветных металлов, корпусов полупроводников и других приборов, а также армируют медью сопрягаемые элементы алюминиевых токоведущих шин. *Преимущества.* При холодной сварке в околошовной зоне отсутствуют структурные превращения, которые изменяют электропроводность металла.Пластмассы сваривают в струе горячего воздуха или горячим металлическим лезвием, токами высокой частоты, ультразвуком.***Достоинства:****-* простота конструкции сварного шва и меньшая трудоемкость в изго­товлении, обусловленной сравнительной простотой технологического процесса сварки.- значительное снижение массы конструкции при тех же габаритах: по сравнению с литыми — на 30-50%, посравнению с заклепочными и болтовыми — до 20%. При замене заклепочных соединении сварными экономия в весе получается за счет отказа от применения различных накладок, необходимых в заклепочных соединениях, а также части веса са­мих заклепок; при замене литых деталей сварными конструкциями вес их уменьшается за счет более высоких механических свойств прокатного металла.- возможность соединения деталей любых форм;- герметичность и плотность соединения;- бесшумность технологического процесса сварки;- возможность автоматизации сварочного процесса;- сварное соединение дешевле заклепочного: соединение деталей может выполняться встык без накладок, возможность сварки толстых профилей.***Недостатки:****-* возникновение остаточных напряжений в свариваемых элементах;- коробление деталей из-за неравномерного нагрева в процессе сварки; - зависимость качества шва от исполнителя и труд­ность контроля; применение автоматической сварки устраняет этот недостаток.***Область применения.***В настоящее время сварные соединения поч­ти полностью вытеснили заклепочные соединения. Сварка применяется для соединения элементов сосудов, испытывающих дав­ление (резервуары, котлы); для изготовления турбин, до­менных печей, мостов, химической аппаратуры; с помо­щью сварки изготовляют станины, рамы и основания машин, корпуса редукторов, зубчатые колеса (рис.7.4), шкивы, звездочки, маховики, барабаны и т. д. Сварку широко применяют как способ получения заготовок деталей из проката в мелкосерийном и единичном производстве, а также в ремонтном деле.



**Рис. 7.4**

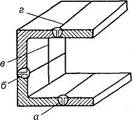
### Классификация и разновидности сварных соединений (швов)

Сварные швы классифицируют по следующим признакам:

- по протяженности - на непрерывные и прерывистые;

- по назначению - прочные (обеспечивают передачу нагрузки с одно­го элемента на другой); прочно-плотные (обеспечивают передачу на­грузки герметичность соединения — непроницаемость для жидкостей и газов);

- по расположению сварного шва в пространстве (рис.7.4) — нижнее *(а);* вертикальное *(в),* горизонтальное *(б);* потолочное (г). При всех прочих равных условиях нижний шов самый прочный, потолоч­ный — наименее прочный (значения прочности указанных выше швов относятся как 1:0,85; 0,9:0,8).

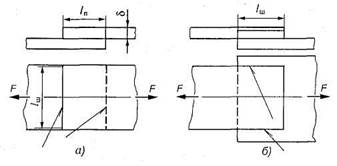


**Рис. 7.5**

По взаимному расположению свариваемых элементов различают сле­дующие виды соединений - стыковые (рис 7..8); *-* нахлесточные, ло­бовые (рис. 7.9, *а*);фланговые (рис.7.9, *б*); - с накладками (рис. 7.10); - тав­ровые (рис. 7.11, *а, б*). Свариваемые элементы располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Соединение может быть выполнено угловыми (рис.11, *а*) или стыковыми (рис.7. 11, *б*) швами.*-* угловые (рис.7. 11 *в, г*). Применяются для изготовления тары из листовой стали, ограждений и др. Выполняются угловыми швами. Эти соединения передают малые нагрузки и поэтому не рассчитываются на прочность.

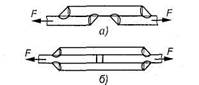
http://www.detalmach.ru/lect1.files/image016.jpg

**Рис.7.8. Стыковое соединение**

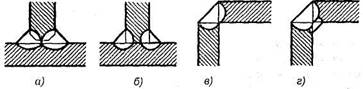


**Рис.7. 9. Нахлесточное соединение: *а —* соединение лобовыми швами;**

***б —* соединение фланговыми швами**



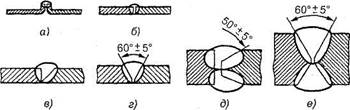
**Рис.7. 10. Соединения с накладками**



**Рис.7. 11. Соединения тавровые и угловые**

*Стыковые* соединения выполняют так называемыми стыковыми шва­ми, а остальные — угловыми. Наиболее просты и прочны стыковые швы.Стыковые швы имеют преимущественное распространение вследствие простоты конструкции. В зависимости от толщины свариваемых деталей и обработки кромок стыковые швы делят на следующие типы:- шов с отбортовкой кромок (рис. 12, *а)* — рекомендуется для тонко­листовых материалов (δ < 2 мм); одна или две кромки деталей отбортовываются;- односторонний без скоса кромок (рис. 7.12, *б)* — шов сваривается без обработки кромок листов при их толщине δ < 8 мм;

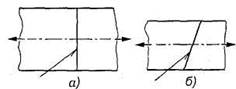
- односторонний со скосом одной кромки (рис.7. 12, *в) —* обрабатыва­ется только одна кромка деталей толщиной δ < 12 мм;- односторонний со скосом двух кромок (рис. 7.12, *г)* — применяется при толщине деталей δ < 25 мм;- двусторонний с двумя симметричными скосами одной кромки (рис. 12, *д)* — кромки обрабатываются у одной детали с двух сто­рон, толщиной 8 до 40 мм;- двусторонний с двумя симметричными скосами двух кромок (рис. 12, *е)* — толщина свариваемых деталей δ >> 60 мм.



**Рис.7. 12. Соединения стыковые: *а* — с отбортовкой;**

***б* — без скоса кромок; *в, г, д, е* — швы со скосом кромок**

Стыковые швы, показанные на рис.7.13, *а,* называют прямыми, на рис.13, *б —* косыми. Косые стыковые швы применяют для увеличения рабочей длины шва.

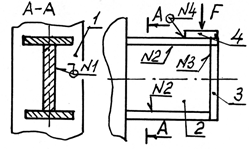


**Рис.7.13. Стыковые швы: *а* — прямой; *б —* косой**

Детали под сварку могут быть без подготовки и с подготовкой кромок. Конструкция подготовки кромок по ГОСТ 5264-80 отражается в цифрах после заглавных букв: **С1**, **С2**… (стыковые соединения), **Н1**, **Н2**… (нахлесточные соединения), **Т1**, **Т2**… (тавровые соединения), **У1**, **У2**… (угловые соединения).При назначении сварочных материалов необходимо учитывать их технико-экономические характеристики: марку свариваемого материала, обеспечение требуемой формы и размеров швов, обеспечение необходимых механических свойств сварных соединений и коррозионной стойкости, возможность сварки в различных пространственных положениях, предупреждение появления трещин в металле шва и зоне термического влияния, способ сварки, стоимость, коэффициент полезного действия.Для обеспечения эксплуатационной надежности сварных соединений необходимо обеспечивать не только равнопрочность шва с основным металлом, но и высокую пластичность металла шва. Практически это сравнительно легко достигается при сварке малоуглеродистых сталей. При сварке высокопрочных и легированных сталей, когда не представляется возможным подобрать электроды, обеспечивающие сочетание этих условий, следует предпочитать электроды с несколько меньшей прочностью наплавленного металла, но с более высокой пластичностью.При сварке алюминия и его сплавов допускается применение сварки в среде инертных газов, контактной, газовой, ручной электродуговой, под флюсом.

### Расчет сварных соединений на прочность

Прочность сварного соединения зависит от качества основного материала, определяющего его способность к свариванию, от совершенства технологического процесса сварки и от характера действующих нагрузок (постоянные и переменные). Сварные швы разделяют на **рабочие** и **связующие**. **На** **прочность рассчитывают** только **рабочие швы**, которые воспринимают и передают рабочую нагрузку между соединяемыми деталями. Связующие швы служат только для связи элементов в неразъемную конструкцию. Они мало нагружены и их не рассчитывают. Например, на рис.7.14 рабочими являются швы (№1) крепления консоли 2 к колонне 1; связующими – швы (№2) соединения полок и стойки консоли, швы (№3) соединения стенки 3 и консоли, швы (№4) сварки площадки 4 с полкой консоли.



**Рис.7.14**

Допускаемые напряжения в сварных швах при статической нагрузке определяют в зависимости от допускаемых напряжений на растяжение σp для основного металла:- при растяжении

σ*p*=σт/*k*,

где *k* - коэффициент запаса прочности, принимаемый обычно равным 1,4-1,6 к допускаемым напряжениям на основной металл;- при сжатии

σcp=σp - при срезе τp=(0,5-0,6)σp

В зависимости от вида сварного соединения и сварки принятые допускаемые напряжения для сварных швов понижаются путем умножения их на коэффициент φ (таблица 7.1).

**Таблица 7.1** Значения коэффициента φ в зависимости от вида сварного соединения и сварки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вид сварного соединения | Вид дуговой сварки | φ |
| Стыковое с двусторонним проваром | Автоматическая под флюсом | 1,00 |
| Ручная, выполненная качественным электродом | 0,95 |
| Ручная с повышенными требованиями контроля | 1,00 |
| Стыковое на подкладке | Ручная | 0,90 |
| Стыковое при одностороннем шве | Автоматическая под флюсом | 0,80 |
| Ручная | 0,70 |
| Тавровое со сплошным проваром | Автоматическая под флюсом | 1,00 |
| Ручная | 0,70 |
| Тавровое с угловыми швами без сплошного провара  Внахлестку с двумя швами | Автоматическая под флюсом или ручная | 0,80 |

**Таблица 7.2.** Значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений для сварных швов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Сварной шов | | Коэффициент *k*σ(*k*τ) для стали | |
| углеродистой | низколегированной |
| Стыковой с полным  проваром корня шва | при автоматической и ручной сварке и контроле швов | 1 | 1 |
| при ручной сварке без контроля качества шва | 42 | 1,4 |
| при автоматической сварке без контроля качества шва | 1,1 | 1,2 |
| Угловой лобовой | при ручной сварке | 2,3 | 3,2 |
| при автоматической сварке | 1,7 | 2,4 |
| Угловой фланговый шов, работающий на срез | 3,4 | 4,4 |

Допускаемые напряжения при периодическом нагружении σ*Rp*=γσ*p*, τ*Rp*=γτ*p*,

где γ - коэффициент понижения допускаемых напряжений,

γ=1/[(*ak*σ+*b*)-(*ak*σ-*b*)*R*]≤1,

где *k*σ(*k*τ) - эффективный коэффициент концентрации нормальных (касательных) напряжений (см. таблицу 4);

*а*, *b* - коэффициенты (для углеродистых сталей *а*=0,58, *b*=0,26; для низколегированных *а*=0,65, *b*=0,3).Коэффициент асимметрии цикла R определяют как отношение наименьшего и наибольшего по абсолютному значению напряжений и сил, взятых со своими знаками:

*R*=*R*σ=σmin/σmax=*F*min/*F*max,

*R*=*R*τ=τmin/τmax=*F*min/*F*max.

### Расчет сварных стыковых соединений

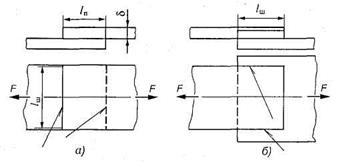
Швы этих соединений работают на растяжение или сжатие в зависи­мости от направления действующей нагрузки (рис.7.15, *а* и *б). Основ­ным критерием работоспособности* стыковых швов является их *прочность.* Сварные соединения встык являются наиболее рациональными, приближающими по форме и прочности составные детали к целому изделию.При действии на соединение нескольких силовых факторов применяют метод независимости действия сил (метод суперпозиции), т.е. определяют напряжение от каждого силового фактора отдельно, а затем расчет ведут по эквивалентным напряжениям: обычно — по четвертой теории прочности:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image042.gif

где σΣ - наибольшее суммарное нормальное напряжение в шве

τΣ - наибольшее суммарное касательное напряжение в шве

[σ]p - допускаемое напряжение для сварного шва.



**Рис. 7.15. К расчету стыковых соединений**

***Проверочный расчет***прочности шва на растяжение. Условие прочности:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image045.gif

где http://www.detalmach.ru/lect1.files/image047.gif *—* расчетноеи допускаемое напряжения на растяжение для шва (табл.5); *F —* нагрузка, действующая на шов; δ — толщина детали (толщину шва принимают равной толщине детали); *l*ш — длина шва.

***Проектировочный расчет.***Целью этого расчета является определение длины шва.Исходя из основного условия прочности (2), длину стыкового шва при действии растягивающей силы определяют по формуле

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image049.gif

**Таблица7.3.**Допускаемые напряжения для сварных соединений деталей из низко- и среднеуглеродистых сталей при статической нагрузке

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вид деформации, напряжение | Автоматическая и полуавтоматиче­ская сварка под флюсом | Ручная дуговая электродами | |
| Э50А, Э42А | Э50, Э42 |
| Растяжение [σ’]р | [σ’]р | [σ’]р | 0,9[σ’]р |
| Сжатие [σ’]сж | [σ’]р | [σ’]р | [σ’]р |
| Срез [τ’]ср | 0,65[σ’]р | 0,65[σ’]р | 0,6[σ’]р |

### Расчет сварных соединений внахлестку

Сварные соединения внахлестку выполняют угловым (валиковым) швом. Угловые швы соединения внахлестку могут воспринимать произвольно направленные силы и моменты.Соединения обычно воспринимают нагрузку в плоскости стыка.Угловые швы соединений внахлестку могут иметь сечения: нормальные (треугольные), выпуклые и вогнутые. Наиболее целесообразный с точки зрения снижения концентрации напряжений и в условиях работы при переменных во времени нагрузках шов — вогнутый, но — и наиболее сложный в изготовлении. Применяется в специальных случаях, когда дополнительные расходы, связанные с его выполнением, целесообразны. Выпуклый шов также сложен в изготовлении, имеет повышенную концентрацию напряжений и применяется в специальных случаях. Наиболее распространенное сечение шва – нормальное (треугольное). Опасное сечение шва — сечение АА по высоте прямоугольного равнобедренного треугольника h=0,7k. Редко применяется шов в виде неравнобедренного треугольника. Общие рекомендации по выбору катета (калибра) шва k в пределах 3 мм ≤k≤10 мм при выполнении шва в один проход; k≈δmin, где δmin - меньшая толщина соединяемых деталей. При конструировании соединений следует, если можно, избегать разных толщин соединяемых деталей. Угловые швы условно делят на лобовые (расположенные перпендикулярно) и фланговые (расположенные вдоль растягивающей или сжимающей внешней силы).При разработке конструкции соединения внахлестку фланговыми швами из условия равнопрочности шва и основного металла рекомендуется применять величину нахлестки не более Lн=1,2b, а при соединении комбинированным швом — не более Lн=0,7b , где b - расстояние между фланговыми швами.При нагружении соединения внахлестку сдвигающим силами и крутящим моментом применяют метод суперпозиции.Если действует Fx, то

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image051.gif

Если действует сила Fy, то

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image053.gif

Если действует крутящий момент Т, то

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image055.gif

где http://www.detalmach.ru/lect1.files/image057.gif - площадь шва,

JρШ - полярный момент инерции площади шва шириной 0,7k относительно центра тяжести сварного стыка О,

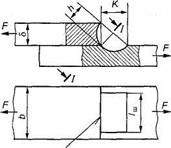
ρmax - расстояние от центра тяжести стыка до наиболее удаленной точки сварного шва.

[τ]’ - допускаемое напряжение на срез для шва.

В случае действия одновременно трёх силовых факторов расчет ведут по суммарному τmax

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image059.gif

При действии **осевой растягивающей (или сжимающей) силы** считают, что срез угловых швов происходит по сечению *I-I* (рис. 7.16), проходя­щему через биссектрису прямого угла.



**Рис.7.16. К расчету соединения внахлестку. Лобовой шов**

***Проверочный расчет.***Условие прочности одностороннего лобового шва на срез:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image063.gif

где http://www.detalmach.ru/lect1.files/image065.gif — расчетное и допускаемое напряжения среза для шва (см. табл.5); *l*ш — длина шва; *F —* нагрузка, действующая на шов.

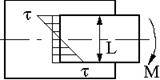
***Проектировочный расчет.***Длину одностороннего лобового углового шва (см. рис. 7.16) при осевом нагружении определяют по формуле

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image067.gif

длина двустороннего лобового углового шва

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image069.gif

Рассмотрим случай, когда **лобовой шов нагружен моментом** (рис. 7.16).



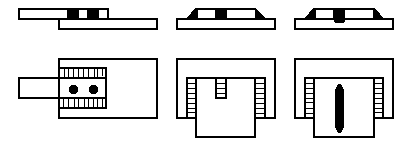
**Рис.7.17**

Касательные напряжения в сечении m-m определяются как τ=M/W,

где http://www.detalmach.ru/lect1.files/image073.gif - момент сопротивления сечения изгибу.

Тогда http://www.detalmach.ru/lect1.files/image075.gif

Фланговые угловые швы рассчитывают по уравнению (6), т.е. аналогично рассмотренному случаю расчета двустороннего ло­бового шва. Во фланговых швах нагрузка по длине шва распределяется не­равномерно (по концам шва увеличивается), поэтому длину фланговых швов стараются ограничить *l*ш < (50÷60*)К.*

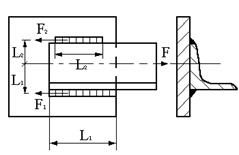
**

**а) б) в)**

**Рис.7.18**

Рассмотрим соединение деталей фланговыми швами различной длины.

В случае несимметричных угловых фланговых швов, посредством которых приваривают деталь несимметричного профиля, например уголок, каждый из этих швов рассчитывают по своей нагрузке (рис.7.19).



**Рис.7.19**

Сила *F* проходит через центр тяжести сечения уголка. Силы *F1* и *F2* , действующие на швы, определяют так:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image080.gif

Очевидно, что длины швов в этом соединении при одинаковых сечениях должны быть пропорциональны нагрузкам

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image082.gif

### Расчет сварных тавровых швов

**1. Сварные соединения втавр, нагруженнные отрывающими и сдвигающими нагрузками, выполненные стыковым швом.**Конструирование шва заключается в подготовке кромок к сварке стыковым швом. Шов обычно делают непрерывным по всему периметру соединяемых деталей. Толщина шва обычно равна толщине деталей.Подобные соединения могут воспринимать произвольно направленные нагрузки.При сочетании нескольких силовых факторов применяют метод суперпозиции (независимости действия сил). Условие прочности шва

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image094.gif.

При действии на соединение изгибающих моментов Мх и Мy, возникают дополнительно напряжения, рассчитываемые так:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image096.gif

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image098.gif

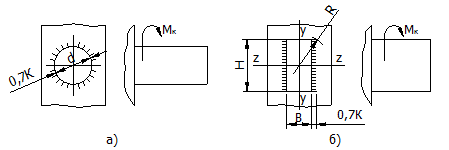
где Wх и Wy - осевые моменты сопротивления сечения шва относительно соответствующих осей.Если на соединение действуют несколько силовых факторов, приведенных к центру тяжести стыка, то, применяя метод суперпозиции, определяют последовательно τFx, τFy, τFz, τMx, τMy, τT, и суммируют для наиболее нагруженной зоны сварного стыка

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image100.gif

где τΣ - суммарное наибольшее напряжение сечения шва,

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image102.gif

Пользоваться упрощенной методикой расчета тавровых соединений угловыми швами не рекомендуется.Обратите внимание, что в формуле для τΣ некоторые члены суммируются алгебраически, другие — геометрически.Рассмотрим наиболее характерные случаи нагружения тавровых швов, которые могут встречаться также и в комбинациях.



**Рис. 20**

а) нагрузка моментом в плоскости шваЕсли привариваемая деталь круглая (рис.20, *а*) (шов круг­лый кольцевой), то расчет шва проводится на кручение в коль­цевом сечении, расположенном под углом 45° к основанию шва.

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image106.gif

где Jρ - полярный момент инерции расчетного сечения;

Jρ=0,1(D4-d4); D=d+2∙0,7K;

*R* - расстояние до наиболее удаленного от центра волокна, сечения шва.Если сечение шва не круглое (рис.20, *б*), то оно всё же условно рассчитывается по уравнение кручения для круглых стержней. В этом случае принято пренебрегать возникающим при такой расчетной схеме короблением сечения и нелинейный характером эпюр напряжений:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image106.gif

где Jρ - условный полярный момент инерции сечения;

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image108.gif - допускаемое напряжение кручения для наплавлен­ного металла шва.

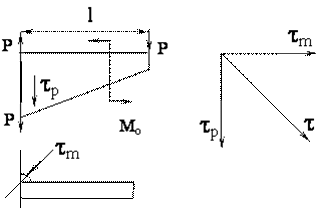
Для указанного на рис. 20, *б* примера:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image110.gif

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image112.gif

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image114.gif

б) внецентренно приложенная нагрузка или нагрузка моментом (рис.7.21)



**Рис.7.21**

Нагрузка состоит из изгибающего момента *M = M0* или *M = Pl* и перерезывающей силы *Р* (при нагрузке только моментом *M0* перерезывающая сила отсутствует).Шов рассчитывается на изгиб и срез, но не по нормальным, а по касательным напряжениям в наклонных сечениях под углом 45° к основанию шва. Полное касательное напряжение равно векторной сумме напряжений от момента τm и перерезывающей силы τp

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image118.gif

В данном примере

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image120.gif

В любом случае для расчёта самых сложных сварных швов сначала необходимо привести силу и момент к шву и распределить их пропорционально несущей способности (длине) всех простых участков. Таким образом, любой сложный шов сводится к сумме простейших расчётных схем. Существует множество других нагружений силами, изгибающими и крутящими моментами. Для каждого из случаев составляется свое условие прочности, которые здесь охватить невозможно.

### Сварные соединения при переменных нагрузках

Размеры швов выбирают из условия равнопрочности основного металла и шва при статическом нагружении. Однако при действии переменных нагрузок (обозначим их *F* − var) прочность сварных соединений снижается.Эффективными средствами повышения прочности сварных соединений при *F*– var являются:

1) наклеп поверхности дробью, ультразвуковым ударом специальных головок, чеканка;

2) предварительная подготовка кромок шва (например, в тавровых соединениях со скосами кромок прочность в 1,5 раза выше, чем без разделки кромок);

3) выполнение лобовых швов с отношением катетов 1:3 с плавной формой перехода к основному металлу;

4) отжиг швов для снятия остаточных напряжений и др.

**Расчет на сопротивление усталости при *F*- var** проводят путем определения коэффициента безопасности *S*σ (или *S*τ) в околошовной зоне основного металла и сравнения его с допускаемым [*S*σ] (или [*S*τ]):

*S*σ= σ*RKN*/σmax ≥ [*S*σ], (7)

где σ*R* − предел выносливости сварного соединения при асимметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии *R=F*min*/F*max;

*KN* – коэффициент долговечности; *KN* = (*NG* / *N*)1/ *m* ≥1,

где *N* − заданное число циклов нагружения;

*m* = 12/*K*σ − показатель степени в уравнении кривой усталости;

σmax = (σ*m* + σ*a*) – максимальное напряжение цикла:

σ*m*= σmax (1 + *R*) / 2 − среднее напряжение,

σ*a*= σmax (1 – *R*) / 2 − амплитуда напряжений;

[*S*σ] = 1,4…2,5 – для машиностроительных конструкций.

То же в формуле (7) и для напряжений τ с заменой символов σ на τ.

Для сварных деталей предел выносливости σ*R* − максимальное по модулю напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостного разрушения до базового числа циклов *NG* = 2,7∙106.

Из диаграммы предельных напряжений («Сопротивление материалов»)

σ*R* = 2σ-1св/[1 + ψσ – *R* (1 – ψσ)], (8)

где ψσ - коэффициент чувствительности сварного соединения к асимметрии цикла: ψσ = 0,2 при *K*σ < 2; ψσ = 0,05 при *K*σ ≥2, где *K*σ - эффективный коэффициент концентрации напряжений (отношение предела выносливости целого образца к пределу выносливости сварного):

1) для стыковых соединений *K*σ = 1,2…1,6 (меньшие значения при автоматической сварке, большие при ручной);

2) для угловых швов нахлесточных соединений:

а) лобовой шов *K*σ = 1,6…3,2;

б) фланговый шов *K*σ= 3,4…4,4;

3) для тавровых соединений *K*σ = 2,5…4;

4) для контактной сварки:

а) точечной *K*σ = 7,5…12;

б) шовной *K*σ = 5…7,5.

Предел выносливости сварных деталей

σ-1св = σ-1 / *K*св, (9)

где σ-1 - предел выносливости основного металла при симметричном цикле. Для стали ориентировочно можно принять σ-1 = 0,43σВ;

*K*св - коэффициент снижения σ-1 с учетом основных факторов, влияющих на усталость сварного соединения.

В настоящее время наибольший опыт расчетов и нормативов имеется в локомотиво- и краностроении. По их данным

*K*св = *K*σ∙*K*1∙*K*2/(*Kd∙KF*), (10)

где *K*1 - коэффициент, учитывающий влияние неоднородности металла свариваемых деталей:

- для проката, поковок, штамповок *К*1 = 1,1;

- для литья *К*1 = 1,2…1,3;

*К*2 - коэффициент, учитывающий влияние габаритных размеров деталей:

− при размерах до 250 мм *K*2= 1;

− при размерах 250…1000 мм *K*2= 1,0…1,2;

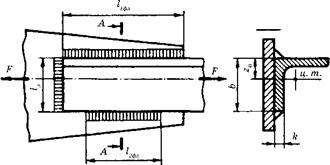
*Кd* - коэффициент, учитывающий влияние длины *l* сварного шва: для фланговых швов нахлесточного соединения при *l* = 40…200 мм *Кd* = 0,91…0,59; для других швов *Кd* = 1;

*КF* - коэффициент, учитывающий качество поверхности сварного соединения:

- для стальных литых деталей после пескоструйной обработки *КF*  = 0,8

- после грубой механической обработки  *КF* = 0,8…0,85;

- после чистовой обработки *КF* = 0,9.



**Рис.722**

Сварные швы располагают так, чтобы они в соединении были нагружены равномерно. При проектировании соединения уголков с косынками (рис.7.22) длины фланговых швов принимают обратно пропорциональными расстояниям до центра тяжести уголка:

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image138.gif

Суммарная длина фланговых швов

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image140.gif

Следовательно, длина флангового шва у примыкающей полки уголка

http://www.detalmach.ru/lect1.files/image142.gif

В конструкциях, подверженных действию вибрационных знакопеременных нагрузок, соединения внахлест не рекомендуются, так как они создают значительную концентрацию напряжений.

# *Лекция №8 Разъемные соединения (резьбовые соединения) металлоконструкций*

Каждая машина состоит из деталей, число которых зависит от сложности и размеров машины. Так автокран содержит более 16 000 деталей (включая двигатель), крупный станок имеет более 20 000 деталей и т.д.Чтобы выполнять свои функции в машине детали соединяются между собой определенным образом, образуя *подвижные и неподвижные соединения.* Подвижные соединения определяют кинематику машины, а неподвижные – позволяют расчленить машину на отдельные блоки, элементы, детали .С точки зрения общности расчетов все соединения делят на две большие группы: *неразъемные и разъемные* соединения ***Разъемными*** называют соединения, которые можно многократно собирать и разбирать без повреждения деталей. К разъемным относятся резьбовые, шпоночные и шлицевые соединения, штифтовые и клиновые соединения. Проектирование соединений является очень ответственной задачей, поскольку большинство разрушений в машинах происходит именно в местах соединений. К соединениям в зависимости от их назначения предъявляются требования *прочности, плотности (герметичности) и жесткости*. При оценке *прочности* соединения стремятся приблизить его прочность к прочности соединяемых элементов, т.е. стремятся *обеспечить равнопрочность конструкции.* Экспериментальные исследования показали, что *жесткость* соединения во много раз меньше жесткости соединяемых элементов, а поскольку жесткость системы всегда меньше жесткости наименее жесткого элемента, то именно *жесткость соединения* определяет жесткость системы. Выбор типа соединения определяет инженер. Всего на крепёжные изделия имеется около 350 государственных стандартов. Из них в машиностроении используют 210 – 220. Международная система стандартов ИСО постепенно становится единой для большинства государств, национальные стандарты приводятся в полное соответствие с международными.

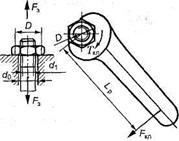
 Резьбовые соединения являются наиболее совершенным, а потому массовым видом разъёмных соединений. Применяются в огромном количестве во всех машинах, механизмах, агрегатах и узлах.Резьбовое изделие цилиндрической формы, снабженное на одном конце го­ловкой, а на другом резьбой (гайкой слу­жит деталь), называется ***винтом.*** Болтами скрепляют де­тали не очень большой толщины. Отвер­стия в соединяемых деталях выполняют несколько большего диаметра, чтобы можно было легко вставить болт, не повредив резьбы. С торца го­ловку болта обтачивают на конус (снимают фаску), чтобы срезать вершины углов призмы, которые могут создавать затруднения при захватывании ключом. Болт требует для размещения гайки много места что увеличивает габариты и вес конструкции. Зато, при обрыве он легко заменяется.Винт может иметь головку разной формы, в частности и шестигранную. Винт ввертывается в корпус и поэтому требует мало места для размещения, что сокращает размеры и вес конструкции. Однако, при сборке, резьба в корпусе (в особенности чугунном или алюминиевом) может быть повреждена. При обрыве трудно извлечь оставшуюся в резьбе часть винта. Болты и винты находят широкое применение во всех отраслях маши­ностроения для получения разъемных соединений. Они стандартизованы.

### Зависимость между моментом, приложенным к гайке, и осевой силой

При завинчивании гайки (рис.8.1) к ключу прикладывают вращающий момент

Tкл=Fкл∙Lр, (1)

где *Fкл* — усилие на конце ключа; *Lp —* расчетная длина ручки ключа.



**Рис.8.1. К расчету момента на ключе**

Момент движущих сил равен сумме моментов сил сопротивления, т. е.

Tкл=T+TT, (2)

где *Т* — момент в резьбе; *ТT* — момент сил трения на опорном торце гайки. Момент в резьбе определяют по формуле

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image382.gif

где *F*3 — сила затяжки болта (осевая сила, растягивающая болт); Ψ— угол подъема винтовой линии; *d2* — средний диаметр резьбы; φ’ — приведенный угол трения.

Момент сил трения на опорной поверхности

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image384.gif

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image386.gif

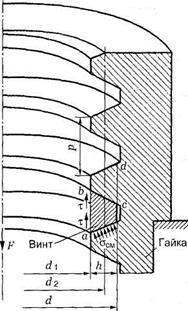
Здесь f≈0,15- коэффициент трения между поверхностью гайки (головки) и детали; *D* — диаметр захвата гаечного ключа (опорного торца гайки); d0=d1+(1÷1,5) мм — диаметр отверстия в детали под болт. Подставляя полученные выражения *Т* и *ТT* в формулы (1) и (2) для момента завинчивания, получим момент на ключе

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image388.gif

Длина стандартных ключей: *L* = 15*d* при f≈0,15; Fз/Fк=70÷80.

### Расчет резьбы на прочность

*При расчете резьбы на прочность принимают следующее допущение:* все витки резьбы нагружаются равномерно (хотя теоретическими и экспери­ментальными исследованиями установлено, что для гайки с шестью витка­ми первый виток резьбы воспринимает 52% всей осевой нагрузки, вто­рой — 25%, третий — 12%, шестой — только 2%). Действительный характер распределения нагрузки по виткам зависит от ошибок изготовления и степени износа резьбы, что затрудняет определение истинных напряжений. В практике расчет резьбы на прочность производится не по истинным, а по условным напряжениям, которые сравнивают с допускаемыми напряжениями, установленными на основании опыта. Полагая нагружение витков равномерным, резьбу принято рассчитывать по напряжениям смятия и среза.



**Рис. 8.2. К расчету резьбы на срез**

***Расчет резьбы по напряжению смятия***. Условие прочности витка резьбы по смятию:

а) для гайки

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image410.gif

б) для винта

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image412.gif

где *F -* осевая сила, действующая на болт, *d2 -* среднийдиаметр резьбы, h - высота витка, *z* - число витков резьбы в гайке, [σ]смв - допускаемое напряжение смятия материала винта, [σ]смг - допускаемое напряжение смятия материала гайки.

***Расчет резьбы по напряжению среза*** (рис.8.2) Проверочный расчет. Условие прочности

τср≤[τ]ср,

где τср — расчетное напряжение среза в резьбе; [τ]ср — допускаемое напря­жение среза в резьбе.

Для винта:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image414.gif

для гайки

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image416.gif

здесь *F* — осевое усилие, действующее на болт; *d1 —* внутренний диаметр резьбы; *d —* наружный диаметр резьбы; *Н —* высота гайки; K=cd/P — коэф­фициент, учитывающий тип резьбы (*K*=0,8 — для треугольной резьбы; *К=* 0,5 — для прямоугольной и *К=* 0,65 — для трапецеидальной резьбы).Проектировочный расчет (рассматривается случай, когда материал гай­ки и винта одинаков). Задавшись типом резьбы и определив диаметр при проектном расчете, можно определить высоту гайки:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image418.gif

Стандартные крепежные изделия на прочность резьбы не рассчитывают.Из условия равнопрочности резьбы и стержня винта определяются высота гайки, нормы на глубину завинчивания винтов и шпилек в деталь и прочие размеры. Учитывая сложность напряженного состояния резьбы, а, также предусматривая ослабление резьбы от истирания и возможных повреждений при завинчивании, высоту стандартных гаек крепежных изделий принимают *H≈*0,8*d1*. По тем же соображениям устанавливают нормы завинчивания винтов и шпилек в детали *H*=*d1* – в стальные детали, *H*=1,5*d1* – в чугунные и силуминовые детали.

### Расчет незатянутого болта, нагруженного внешней растягивающей силой

Этот случай встречается редко. Примером служит нарезанный участок крюка для подвешивания груза. Опасным бывает сечение, ослабленное резьбой. На рис. 8.3 показан пример такого резьбового соединения. Стержень крюка работает только на растяжение. Резь­бовое соединение, рассматриваемое в данном случае, называют ненапряженным. Такие соединения способны воспринимать только статическую нагрузку. Опасным будет сечение, ослабленное резьбой. Статическая прочность стержня с резьбой выше (в среднем на 10%), чем гладкого стержня с диаметром, равным внутреннему диаметру *d*1.

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image424.jpg

**Рис.8.3. Грузовой крюк с обоймой**

Проверочный расчет ненапряженного болтового соединения. Условие прочности на растяжение:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image426.gif

где σp и [σ]p — соответственно расчетное и допускаемое напряжения растя­жения в поперечном сечении нарезанной части болта; *F* — растягивающая сила; *d1—* внутренний диаметр резьбы болта. Проектировочный расчет ненапряженного болтового соединения сво­дится к определению внутреннего диаметра резьбы *d1*, из условия прочно­сти (9):

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image428.gif

где [σ]p=σT/[s]T *—* допускаемое напряжение на растяжение; σT — предел те­кучести материала болта; [s]T — допускаемый коэффициент за­паса прочности. Для болтов из углеродистой стали принимают [s]T =1,5÷3,0. Большие значения коэффициента запаса [s]T принимают при невысокой точности определения величины нагрузки *F* или для конструкций повышенной ответственности.

***Условие прочности*** σэ≤[σ]p. (11)

Эквивалентное напряжение определяем по гипотезе энергии формоиз­менения:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image432.gif

Для резьбы

σэ≈1,3σp, (13)

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image434.gif

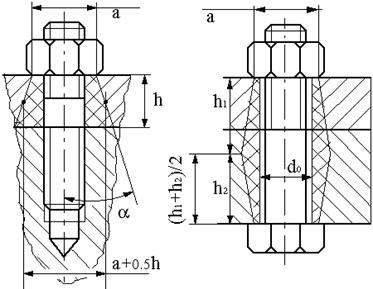
где σp — напряжение растяжения в опасном сечении болта; τкр — наиболь­шее напряжение кручения; *d1* — внутренний диаметр резьбы; Kз≈1,3 — ко­эффициент затяжки, учитывающий скручивание стержня болта.

***Проектировочный расчет .*** С учетом формул (13) и (14) внутренний диаметр резьбы болта

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image436.gif

[σ]p— допускаемое напряжение для болта. Практикой установлено, что болты с резьбой, меньше М10, можно повредить при недостаточно затяжке. Поэтому в силовых соединениях не рекомендуют применять болты малых диаметров (меньше М8). На некоторых производствах для затяжки болтов используют специальные ключи предельного момента. Эти ключи не позволяют приложить при затяжке момент, больше установленного.

### Расчет затянутого и дополнительно нагруженного внешней осевой силой болта

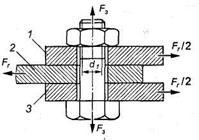
Этот случай является весьма распространенным (фланцевые, фунда­ментные и тому подобные болтовые соединения). Для большинства резь­бовых изделий требуется предварительная затяжка болтов, обеспечиваю­щая плотность и герметичность соединения и отсутствие взаимных смещений деталей сты­ка. После предварительной затяжки под действием силы предварительной затяжки болт растягивается, а детали стыка сжимаются. Помимо силы предварительной затяжки на болт может действовать внешняя осевая сила. 

**а) б)**

**Рис.8.4**

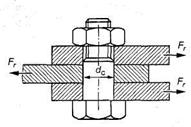
***Расчет болта, нагруженного поперечной силой Fr при установке его с зазором* (рис. 8.5).**

В этом случае болт ставится с зазором в отверстие деталей. Для обеспечения неподвижности соединяемых листов *1, 2, 3* болт за­тягивают силой затяжки *F3.* Во избежание работы болта на изгиб его следует затянуть так сильно, чтобы силы трения на стыках деталей были больше сдвигающих сил *Fr.*Основным критерием расчета является условие неподвижности стыка.



**Рис. 8.5. К расчету болтов соедине­ния, несущего поперечную нагрузку.**

**Болт установлен с зазором**



**Рис. 8.6. К расчету болтов соединения, несущего поперечную нагрузку.**

**Болт установлен без зазора**

Обычно силу трения принимают с запасом: *Ff= KFr.* (*К* –коэффициент запаса по сдвигу деталей, *К* = 1,3 – 1,5 при статической нагрузке, *К =* 1,8 – 2 при переменной нагрузке).

Найдем требуемую затяжку болта. Учтем, что сила затяжки бол­та может создавать нормальное давление на *i* трущихся поверхностях (на рис. 52) http://www.detalmach.ru/lect2.files/image470.gif или в общем случае

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image472.gif

где *i* – число плоскостей стыка деталей (на рис.52 – *i =* 2; при соединении только двух деталей *i* = 1); *f* – коэффициент трения в стыке (*f* = 0,15 – 0,2 для сухих чугунных и стальных поверхностей);

Как известно при затяжке болт работает на растяжение и кручение поэтому прочность болта оценивают по эквивалентному напряжению. Так как внешняя нагрузка не передается на болт, его рассчитывают только на статическую прочность по силе затяжки даже при переменной внешней нагрузке. Влияние переменной нагрузки учитывают путем выбора повышенных значений коэффициента запаса.

***Проектировочный расчет болта:***

внутренний диаметр резьбы

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image474.gif

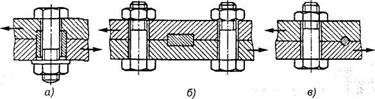
***Расчет болта, нагруженного поперечной силой, с установкой его без зазора* (рис. 8.7).**

В этом случае отверстие калибруют разверткой, а диаметр стержня болта выполняют с допуском, обеспечивающим беззазорную посадку. При расчете прочности данного соединения не учитывают силы трения в стыке, так как затяжка болта не контролируется. В общем случае болт можно заменить штифтом. Стержень болта рассчитывают по напряжениям среза и смятия.

Условие прочности

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image476.gif

где http://www.detalmach.ru/lect2.files/image478.gif - расчетное напряжение среза болта; *Fr* — поперечная сила; *dc* — диаметр стержня в опасном сечении; [τ]ср — допускаемое напря­жение среза для болта; *i* — число плоскостей среза (на рис. 8.6 *i* = 2); [τ]ср=(0,2÷0,3)σT.



**Рис. 8.7. Варианты конструкций, разгружающие болты от поперечной нагрузки**

***Проектировочный расчет.*** Диаметр стержня из условия среза

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image482.gif

Закон распределения напряжений смятия по цилиндрической поверхности контакта болта и детали трудно установить точно. Это зависит от точности размеров и форм деталей соединения. Поэтому расчет на смятие производят по условным напряжениям. Эпюру действительного распределения напряжений заменяют условной с равномерным распределением напряжений  Запас статической прочности по текучести материалов проверяют по формуле

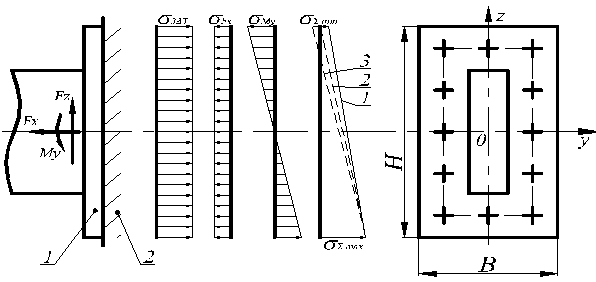
http://www.detalmach.ru/lect2.files/image520.gif

где [*S*]≥ 1,25 - допускаемый коэффициент запаса прочности по максимальному напряжению.

Опыт эксплуатации резьбовых соединений, подверженных действию переменных нагрузок, а также испытания соединений на усталость показывают целесообразность значительной начальной затяжки соединений для болтов из углеродистых сталей равной (0,6 – 0,7)σT, а из легированных сталей – (0,4 – 0,6)σT.Затяжка увеличивает усталостную прочность болтов (так как уменьшает переменную составляющую напряжений в болтах) и соединяемых деталей (так как уменьшает микросдвиги). Следует учитывать, что напряжения затяжки при эксплуатации могут несколько снизиться вследствие обмятия микронеровностей на стыках и релаксации напряжений в болтах.

***Расчет силы затяжки фундаментных болтов.***

К этой группе болтов относятся болты, крепящие оборудование и металлоконструкции к металлическим рамам или к неметаллическим стенам, колоннам, фундаментам.



а) б) в) г) д) е)

**Рис. 8.8. Схема к расчету силы затяжки фундаментных болтов:**

**1 – основание, 2 – фундамент;а) схема нагружения; б) эпюра напряжений в стыке от силы затяжки; в) эпюра напряжений от отрывающей силы *Fx*; г) эпюра напряжений в стыке от отрывающего момента *Му*; д) суммарная эпюра напряжений в стыке; е) план стыка.**

Эти болтовые соединения относятся к соединениям, нагруженным отрывающими и сдвигающими силовыми факторами одновременно. Обычно расчет ведут по условию нераскрытия стыка, а по условию неподвижности стыка делают проверку. На рис. 60,а показан пример такого соединения. Размеры опорной пластины (стыка) *B×H* см. рис. 60,е. До приложения внешней нагрузки *Fx*, *Fz*, *My*производят затяжку болтов усилием *Fзат*. Все болты затягивают одинаково. Тогда давление основания на фундамент (напряжение смятия):

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image556.gif

где *А=В∙Н* – площадь стыка.

Внешние силовые факторы вызывают в стыке дополнительные напряжения.

а) Усилие *Fx* вызывает уменьшение напряжения от затяжки на величину:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image558.gif

где (1–𝜒)– доля внешней нагрузки, которая идет на нагружение стыка внешней силой. В фундаменте принимают χ≈0, что идет в запас прочности.

б) Предполагаем, что под действием внешнего момента *Му* стык будет поворачиваться относительно оси симметрии стыка. Если затяжка отсутствует, то осью поворота будет нижняя кромка основания (см. рис. 8.8,а). Пока давление между основанием и фундаментом обеспечено, то есть в стыке — напряжения сжатия, то стык затянут, и основание и фундамент можно считать единым целым. Испытания подтверждают это предположение.

в) Из предыдущего пункта понятно, почему основным критерием расчета таких соединений является условие нераскрытия стыка.

г) Пренебрегая величиной χ при расчете фундаментных болтов, найдём напряжение в стыке от изгиба:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image560.gif

где Wcmy – осевой момент сопротивления стыка; зависит от формы стыка.

д) Эпюра напряжений в стыке от изгиба приведена на рис. 8.8,г.

Для выполнения условия нераскрытия стыка напряжения в нем должны быть сжимающими. На рис. 8.8,д приведены варианты эпюры суммарных напряжений в стыке.

а) *2, 3* – стык раскрыт σΣ≥0;

б) *1*– стык не раскрыт σΣ<0, то есть сжимающее;

Из условия нераскрытия стыка напряжение в нем может быть определено:

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image562.gif

где *S*=1,3÷2 – коэффициент запаса по нераскрытию стыка. Знак «–» берется при сжимающей силе *Fx*.

Требуемая сила затяжки болтов из условия нераскрытия стыка.

http://www.detalmach.ru/lect2.files/image564.gif

а) Из формулы для определения *Fзат* видно, что уменьшение площади стыка *A* уменьшает требуемую силу затяжки.

б) Целесообразно делать стыки не сплошными, а — как показано на рис. 8.7, 8.8.

в) Целесообразность делать стыки несплошными подтверждается следующим: если уменьшить площадь *А* до *А1* вдвое *А1=0,5∙А*, то σ*мy* возрастет на 12%, а усилие затяжки уменьшится на 38%.

Проверяем и максимальное напряжение смятия фундамента:

σсм = σΣmax ≤ [σ]см.

Величина допускаемого напряжения для разных материалов приведена в справочных данных.

**Лекция №9 основы динамики металлоконструкций птм и сдм**

*Динамика металлоконструкций*− это один из специальных разде­лов строительной механики, посвященный методам расчета соору­жений на динамические нагрузки. *Динамические нагрузки* по своей природе весьма разнообразны. К такого рода воздействиям относятся природные явления, т.е. *сейсмические толчки, ветровые порывы,* а также различные *динамические воз­действия технологического* или *аварийного происхож­дения*: движение неуравновешенных частей машин и механизмов; падение летящего тела при соударение его с элементами конструк­ций; работа копров, молотов и других ударных механизмов; дви­жение поездов, кранов и т.д.

Особенностью динамических нагрузок является то, что при их действии сооружение переходит в состояние движения, причем при периодическом повторении динамических воздействий в опреде­ленных условиях происходит накопление энергии системы, выра­жающееся в постепенном увеличении *амплитуды колебаний*.

Это явление, называемое *резонансом*, особенно опасно для сооружения тем, что разрушение может произойти и при воздейст­виях с малой интенсивностью.

Существенным отличием динамических методов расчета от ста­тических является введение в уравнениях состояния нового пере­менного − времени и, ввиду их значительности, инерционных сил. При этом, если при решении аналогичных задач при статическом нагружении, уравнения состояния выражались при помощи алгеб­раических или трансцендентных уравнений, то соответствующая динамическая задача требует уже решения дифференциальных уравнений с производными по времени.

В динамике металлоконструкций следует различать два типа движения или колебания системы. Колебания системы при отсутствии дей­ствия внешних сил называются *свободными.* Если колебания си­стемы сопровождаются действием внешних динамических нагру­зок, то колебания называются *вынужденными.*

Для описания динамических колебаний необходимо ввести в рассмотрение следующие понятия: круговая частота ω и пе­риод колебаний http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image002.gif. Круговая частота определяет число циклов колебания в течении http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image004.gif секунд, а период определяет интер­вал времени, в течении которого совершается полный цикл коле­баний.

Системы в динамике сооружений различаются по числу степе­ней свободы. *Числом степеней свободы системы* называет­ся число независимых геометрических параметров (обобщенных координат), определяющих положение системы (материальных то­чек) в любой момент времени при ее (их) движении. Число сте­пеней свободы системы складывается из числа степеней свободы материальных точек, принадлежащих системе. Число степеней сво­боды является основной характеристикой системы при динамиче­ских воздействиях.

В динамике различают два основных подхода: *ки­нетостатический* и *энергетический*.

*Кинетостатический* подход состоит в том, что сооружение в произвольный момент времени предполагается находящимся в равновесном состоянии под действием заданных динамических и вызванных ими инерционных нагрузок. Далее для составления уравнений состояния применяются классические методы строи­тельной механики (метод сил, перемещений или *смешанный*).

*Энергетический* подход основан в определении в равновес­ном состоянии через закон сохранения энергии с учетом инерци­онных сил. В частности, когда силы сопротивления движению не учитываются, энергетический принцип в общем случае записы­вается в виде:

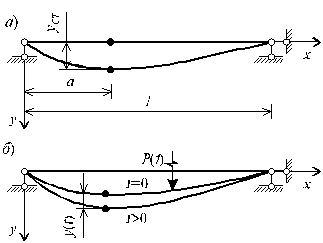
*http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image006.gif*,

где *K* − кинетическая энергия системы; *V* − потенциальная энергии системы или работа внешних или внутренних сил, так как система в процессе колебания находится в равновесном состоянии.

При решении конкретных задач ограничим­ся применением кинетостатического подхода, а для вывода уравне­ния − метода сил.

**Системы с одной степенью свободы**

Рассмотрим систему в виде невесомой балки с сосредоточенной массой *m*, горизонтальным перемещением и поворотом которого будем пренебрегать. При таких предпосылках единственная матери­альная точка, т.е. сосредоточенная масса величиной *m* может со­вершать перемещения только в вертикальном направлении, следо­вательно, система имеет одну степень свободы.



**Рис.9.1**

Будем исследовать дви­жение системы из ее ис­ходного положения равно­весия при *t*=0 (рис.9.1, *а*), считая перемещение вниз положительным.

Пусть на балку дейст­вует динамическая сила ве­личиной: http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image010.gif, где http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image012.gif − частота вынуждающей силы. Обозначая дополни­тельное перемещение мас­сы *m* от динамических на­грузок через *y*(*t*), вводим следующие начальные условия:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image014.gif; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image016.gif. (9.1)

В процессе движения на массу действует *сила инерции http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image018.gif* и *сила сопротивления по Фойхту http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image020.gif.* Сила сопротивления движению возникает от различных внешних и внутренних причин: сопротивление движению внешней среды, тре­ние в местах соединения элементов и опорных частях, внутреннее неупругое сопротивление материалов конструкций и т.д. Заметим, что система, обладающая свойствами внутреннего со­противления называется *консервативной*, а система, лишенная данного свойства − *неконсервативной.*Вводим следующие обозначения: http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image022.gif− вертикальное перемеще­ние балки в точке закрепления массы *m* от действия вертикальной единичной силы *Р* = 1, приложенной в той же точке; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image024.gif − вер­тикальное перемещение балки в точке закрепления массы *m* от динамической силы http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image026.gif, при этом: http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image028.gif; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image030.gif − верти­кальное перемещение балки в точке закрепления массы от дей­ствия вертикальной единичной силы *Р* = 1, приложенной в точке приложения внешней силы http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image026.gif при ее отсутствии. Применяя *метод суперпозиции,* очевидно, что, в произ­вольный момент времени полное перемещение сосредоточенной массы *m* принимает значение:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image032.gif, (9.2)

откуда и определяется дифференциальное уравнение движения рассматриваемой системы:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image034.gif. (9.3)

Принимаем обозначения: http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image036.gif− круговая частота соб­ственных колебаний системы; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image038.gif− коэффициент затухания.

С учетом введенных обозначений, уравнение движения системы (14.3) принимает вид:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image040.gif. (9.4)

Решение дифференциального уравнения (14.4), с учетом началь­ных условий (14.1) и, учитывая, что для реальных конструкций всегда выполняется http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image042.gif, записывается в виде:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image044.gif. (9.5)

Здесь приняты следующие обозначения:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image046.gif; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image048.gif; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image050.gif. (9.6)

Круговая частота http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image052.gif называется *круговой частотой соб­ственных колебаний системы с учетом сил затухания.*

Коэффициент затухания колебания определяется по *коррек­тированной гипотезе Фойхта,* позволяющей получить наи­более обоснованные результаты для учета диссипации энергии в системе в процессе колебаний, т.е.:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image054.gif, (9.7)

где http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image056.gif − называется *логарифмическим декрементом зату­хания* и определяется через отношения соседних амплитуд коле­бания, возникающих через промежуток времени http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image058.gif:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image060.gif. (9.8)

Для различных конструкций средние значения http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image056.gif приводятся в таблице 9.1.

Таблица 9.1

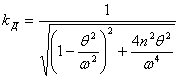
|  |  |
| --- | --- |
| Наименование конструкции | http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image056.gif |
| Стальные мосты  Железобетонные мосты  Железобетонные балки  Железобетонные рамы  Железобетонные ребристые перекрытия | 0,17  0,63  0,56  0,25  0,57 |

Выражение (9.5) определяет перемещение сосредоточенной массы при действии силы http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image026.gif, изменяющейся во времени по произвольному закону. Первый член выражения характеризует соб­ственные колебания системы, а второй, интегральный член − вы­нужденные колебания.

Так как http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image065.gif, то решение (14.5) преобразуется и при­нимает вид:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image067.gif. (9.9)

Здесь приняты следующие обозначения:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image069.gif; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image071.gif; . (9.10)

Если в момент времени *t* = 0 система находится в состоянии покоя, т.е. http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image075.gif, то решение (9.9) с учетом (9.10) преобра­зуется в виде:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image077.gif.

Величина *kД* называется *коэффициентом динамичности* и характеризует эффект от динамической нагрузки по отношению к аналогичной статической нагрузке величиной *P(t) = P0 = const.*

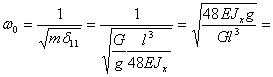
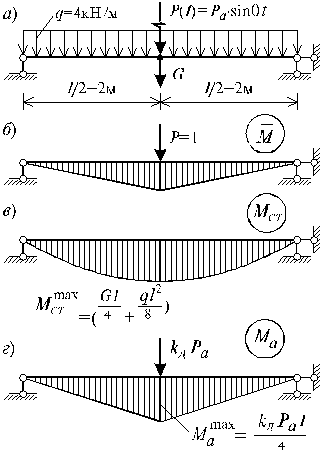
Коэффициент динамичности существенно зависит от отноше­ния http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image079.gif. При http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image081.gif коэффициент динамичности стремится принять максимальное значение и колебания системы при http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image083.gif называются *резонансными,* а амплитуда колебаний принимает опасное значение:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image085.gif.

**Пример расчета балки в виде системы с одной степенью свободы**

Проверить прочность бал­ки в рабочем режиме вибрато­ра, расположенного по середи­не пролета балки (рис.9.2, *а*), учитывая только вертикальную составляющую вертикальной силы:http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image065.gif, прини­мая: *G* = 15 кН − вес вибрато­ра; *Р*0= *Pa* = 3 кН − вес не­уравновешенных частей вибра­тора; *e*= 0,01 м − эксцентриси­тет относительно оси враще­ния неуравновешенных частей; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image012.gif = 30с−1 − круговая частота внешней силы; *l* = 4 м − про­лет балки. Поперечное сечение балки выполнено из двутавра №20, материал Ст3. Следо­вательно, *Е*=2,1⋅108 кН/м2 − мо­дуль деформации материалов; *Jx*=1,84⋅10−5м4 −момент инер­ции; *Wx*= 1,84⋅10−4м3− момент сопротивления поперечного сече­ния; *R* = 25⋅104кН/м2− расчетное сопротивление; http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image056.gif = 0,1 − лога­рифмический декремент. Интенсивность распределенных нагрузок принимается равной: *q* = 4 кН/м.На первом этапе для выполнения расчетов необходимо определить величину коэффициента динамичности. Для этого сначала определим величину коэффициента затухания http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image089.gif.Воспользуемся эпюрой моментов, изображенной на рис.14.2, *б* и по формуле Мора определим http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image022.gif:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image092.gif.

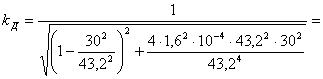
Круговая частота собственных колебаний без учета затуханий:http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image096.gif c−1.

**Рис.9.2**

Собственная частота системы с учетом затухания колебания принимает значения:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image100.gif c−1.

Коэффициент динамичности определяется из (14.10) по фор­муле:



http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image104.gif.

Последовательно определим максимальное значение момента в опасном сечении (рис.14.2, *в*, *г*) от статических и динамических сил:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image106.gif кН⋅м;

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image108.gif кН⋅м.

Максимальное напряжение в опасном сечении принимает зна­чение:

http://www.stroitmeh.ru/lect51.files/image110.gif кН/м2,

т.е. прочность конструкций обеспечена.