

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

З ДИСЦИПЛІНИ «МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ»

для студентів всіх форм навчання спеціальності

G19 Будівництво та цивільна інженерія

2025

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
Лекція 1. Металеві конструкції в будівництві: історія, властивості, застосування	6
1.1. Розвиток металевих конструкцій в Україні. Области застосування металевих конструкцій. Основні властивості металевих конструкцій. Сучасні вимоги до металевих конструкцій.	6
Лекція 2. Матеріали для будівельних металевих конструкцій.....	11
2.1 Механічні властивості сталей. Класифікація сталей, що застосовуються в будівництві хімічний склад і структура маловуглецевих сталей	11
2.2 Способи виробництва, групи та категорії постачання сталі. Структура та хімічний склад низьколегованої сталі. Термічне зміцнення сталі.....	16
2.3 Вибір марок сталі для будівництва конструкцій. Алюмінієві сплави, які використовуються в будівництві. Сортаменти сталевих та алюмінієвих профілів.....	18
Лекція 3. Робота сталі під навантаженням.....	24
3.1 Робота сталі при одноразовому статичному навантаженні. В'язке та крихке руйнування сталі. Фактори, які сприяють крихкому руйнуванню. Наклеп та втомність сталі	24
Лекція 4. Розрахунок металевих конструкцій за методом граничних станів.....	34
4.1 Поняття про граничні стани конструкцій. Основні положення методу розрахунку за граничними станам. Нормативний та розрахунковий опір	34
4.2 Класифікація навантажень. Нормативні та розрахункові навантаження, коефіцієнт надійності за навантаженням. Снігові та вітрові навантаження. Поєднання навантажень.....	40
Лекція 5. Зварні з'єднання.....	48
5.1 Загальна характеристика основних видів зварювання. Вибір матеріалів для зварювання. Типи зварних швів та з'єднань.....	48
5.2 Розрахунок з'єднань встик на різні види силових впливів. Розрахунковий опір стикових швів	52

5.3 Розрахунок з'єднань внапуск. Розрахункові перерізи швів. Розрахункові опори кутових швів. Конструктивні вимоги до з'єднань на кутових швах.	57
5.4 Розрахунок з'єднань втавр	66
Лекція 6. Болтові та заклепочні з'єднання.....	70
6.1 Загальна характеристика болтових з'єднань. Види болтів. Загальна характеристика заклепочних з'єднань.....	70
6.2 Робота та розрахунок болтових з'єднань на зсув. Робота і розрахунок болтових з'єднань на розтягування.....	72
6.3 Розрахунок з'єднань на високоміцних болтах. Правила розміщення болтів, граничні габарити болтових полів	78
Перелік джерел посилання	87

Вступ

Сучасне будівництво є складною інженерною галуззю, яка постійно розвивається під впливом новітніх технологій, матеріалів та підходів до проектування й зведення споруд. В умовах урбанізації, економічного зростання та потреби в ефективному використанні ресурсів особливого значення набуває якісна підготовка майбутніх інженерів-будівельників, які здатні проектувати та реалізовувати надійні та довговічні проекти.

Основним напрямом у підготовці фахівців з промислового та цивільного будівництва є вивчення конструктивних схем будівель, їх властивостей та принципів конструктивних розрахунків,

Металеві конструкції - одна з найбільш універсальних та поширених форм несучих елементів, що забезпечують необхідну міцність, гнучкість у проектуванні та індустріальність монтажу. Вони широко використовуються як у промисловому, так і в цивільному будівництві (від каркасів заводських цехів до багатоповерхових будинків і спортивних споруд).

Даний конспект лекцій покликаний ознайомити студентів із фундаментальними поняттями та сучасними тенденціями у сфері металевих конструкцій, їх класифікацією, властивостями, вимогами до якості матеріалів, способами захисту та принципами розрахунку.

Отримані знання стануть основою для подальшого оволодіння навичками проектування, технічного аналізу й інженерної оцінки конструктивних рішень у реальних умовах будівництва.

ЛЕКЦІЯ 1. МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ В БУДІВНИЦТВІ: ІСТОРІЯ, ВЛАСТИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ

1.1. Розвиток металевих конструкцій в Україні. Области застосування металевих конструкцій. Основні властивості металевих конструкцій. Сучасні вимоги до металевих конструкцій.

Застосування металу відоме людству з давніх часів. Так III та II тисячоліття до н.е. носять назву бронзового віку (бронза - сплав міді та олова), а з початку I тисячоліття до н.е. людство вступило у залізний вік. Проте основними будівельними матеріалами протягом багатьох століть служили людству камінь і дерево.

Застосування заліза у вітчизняному будівництві простежується з XII століття, коли з так званого «кричного» заліза (низьковуглецеве залізо, яке отримували за допомогою старих методів) стали виготовляти елементи у вигляді скріп і зтяжок для сприйняття розладу кам'яних склепінь.

У XVII столітті з кованих залізних брусків стали виконувати каркаси куполів церков («кошики») та покрівлі крокви, що згодом трансформувалися в кроквяні ферми.

На початку XVIII століття було освоєно процес лиття чавуну. У промисловому та цивільному будівництві, а також мостобудуванні стали широко застосовуватися несучі чавунні конструкції, які, порівняно із залізними, були більш міцними. Однак високий вміст вуглецю в чавуні робить цей матеріал дуже крихким і, як наслідок, малоперспективним для будівництва.

З середини XIX століття після освоєння конверторного і мартенівського виробництва в будівництві почали застосовувати сталі, що одержувалися відновленням чавуну. Вже наприкінці XIX століття сталеві конструкції широко застосовувалися під час зведення металургійних та машинобудівних заводів на Донбасі, у Маріуполі, у Дніпропетровському регіоні. Використовувалися конструкції зі сталі та у цивільному будівництві: при реконструкції Андріївського собору та

будівництві Бессарабського ринку, при зведенні міських театрів у Львові та Одесі тощо.

У конструкціях застосовувалася профільна сталь; для з'єднання елементів використовувалися заклепки.

Сучасний етап розвитку металевих конструкцій характеризується такими явищами:

- розширення номенклатури застосовуваних у будівництві маловуглецевих низьколегованих і високоміцних сталей, застосування алюмінієвих сплавів у будівництві;

- застосування зварювання для з'єднання металевих конструкцій замість заклепок, удосконалення способів зварювання, використання нових видів зварювання, застосування з'єднань на болтах;

- застосування більш обґрунтованих методів розрахунку металевих конструкцій, удосконалення розрахунків за методом граничних станів, застосування сучасної обчислювальної техніки та елементів САПР (систем автоматичного проектування);

- вдосконалення конструктивних форм металевих конструкцій, тобто створення конструкцій надійних, економічно і морально довговічних, поєднання в конструкціях несучих і захисних функцій, створення конструкцій, що трансформуються тощо;

- вдосконалення сортаменту прокатних профілів, застосування ефективних широкополочних двотаврів та таврів, гнутих, гнутозварних профілів, високоміцних канатів;

У будівництві застосовуються різні металеві конструкції, форма і конструктивні рішення яких у більшості випадків визначаються призначенням:

- елементи каркасів одноповерхових промислових будівель - ферми, балки покриття, прогони, колони, ригелі, підкранові балки, зв'язки. У порівнянні із залізобетонним сталевий каркас віддає перевагу при великих висотах і прольотах будівель, а також при кранах більшої вантажопідйомності важкого і дуже важкого режимів роботи. У низьких будинках великого прольоту можливий змішаний каркас, в якому ферми проектуються сталевими, а колони ж залізобетонними;

- листові конструкції, що являють собою ємності для зберігання рідин (резервуари), газів (газгольдери), сипучих матеріалів (силоси та бункери). До листових відносяться також конструкції металургійних, нафтопереробних і хімічних виробництв (оболонки домен, реакторів, трубопроводи великих діаметрів, повітрянагрівачі тощо);

- висотні споруди у вигляді веж, щогл, опор ліній електропередач, бурових вишок, димових та вентиляційних труб;

- великопрогонові конструкції покриттів громадських споруд (спортивних, видовищних) та деяких промислових будівель (цехів судно- та літакобудування, ангарів, гаражів). Сюди відносяться конструкції покриттів прольотом понад 36 м; вони можуть бути плоскими (балочними, рамними, арочними) або просторовими у вигляді структур, сітчастих оболонок (куполів, склепінь, складок), висячих конструкцій (вантових або мембранних);

- елементи каркасів багатоповерхових будівель колони, ригелі, зв'язки, стовпи жорсткості, стінові панелі, вітражі. Багатоповерхові будинки діляться на невисокі до 50 м, середньої висоти від 100 м, висотні від 100 до 300 м і надвисокі (хмарочоси) понад 300 м. Основна сфера застосування багатоповерхових будівель житлові будинки, громадські будівлі різного призначення і, рідше, виробничі будівлі (лабораторні та інженерні корпуси);

- конструкції мостових, баштових та порталних кранів, затвори гідротехнічних споруд, ворота шлюзів та ін.;

- конструкції спеціальних споруд, до яких належать атомні реактори, радіотелескопи, стаціонарні платформи для розвідки та видобутку газу та нафти в морі та ін.

Основні властивості металевих конструкцій характеризуються позитивними та негативними якостями. Позитивними якостями металевих конструкцій є:

- висока відносна легкість конструкцій, що визначається ефектом:

$$c = \frac{\rho}{R_y},$$

де ρ - щільність матеріалу;

R_y - розрахунковий опір, що характеризує міцність матеріалу. Чим менше значення цього коефіцієнта, тим легша конструкція з даного матеріалу.

Нижче наводяться значення коефіцієнта для основних будівельних матеріалів: для маловуглецевої сталі: $\rho = 7,85 \text{ т/м}^3$, $R_y = 2,1 \cdot 10^4 \text{ т/м}^2$, $c = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}$, для бетону класу C20/25 - $c = 1,87 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$, для дерева (сосни) $c = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}$, для алюмінієвого сплаву Д16Т

(дюралюмінію) $c = 1,1 \cdot 10^{-4}$ 1/м. З наведених даних випливає, що легше сталевих конструкцій можуть бути тільки конструкції з алюмінієвих сплавів;

- надійність - здатність матеріалу тривалий час безвідмовно сприймати розрахункові навантаження. Ця властивість обумовлена відповідністю дійсних властивостей металу основним передумовам, покладеним в основу розрахунку (гіпотези про однорідність, суцільність, ізотропність);

- індустріальність, обумовлена наявністю спеціалізованих заводів із виготовлення металевих конструкцій, монтаж конструкцій також ведеться спеціалізованими організаціями. Це дозволяє застосовувати високо продуктивне обладнання та монтажні механізми з високим ступенем контролю якості конструкцій;

- непроникність для рідин та газів, що дозволяє застосовувати металеві конструкції як ємності для зберігання рідкостей та газів;

- можливість повторного застосування металу шляхом переплавлення металевих конструкцій, що вийшли з ладу;

- зручність проведення ремонтних робіт та посилення за зміни умов експлуатації конструкцій або пошкодження їх.

Негативними властивостями металевих конструкцій є:

- мала корозійна стійкість будівельних сталей. Більшість будівельних металоконструкцій схильна до атмосферної корозії, яка за механізмом перебігу процесів відноситься до електрохімічної. Для захисту від корозії використовують металізацію (наприклад, цинкування), лакофарбові покриття. Комбінований захист передбачає нанесення лакофарбового покриття по металізованому шару;

- мала вогнестійкість. Стали при температурі 600°C , а алюмінієві сплави при температурі 300°C переходять у пластичний стан і втрачають несучу здатність. Підвищити ступінь вогнестійкості металевих конструкцій можна напиленням або оштукатурюванням цементно-піщаними або спеціальними розчинами, облицюванням плитами з бетону, гіпсу, вермикуліту, нанесенням обмазок, що спінуються.

Сучасні металеві конструкції повинні задовольняти наступним вимогам:

- експлуатаційним, тобто конструкції та споруди з них повинні відповідати умовам експлуатації та забезпечувати заданий технологічний процес;

- надійності та довговічності, тобто конструкції повинні виконувати свої несучі функції протягом усього заданого терміну експлуатації;

- економічним, тобто конструкції повинні забезпечувати мінімальний витрат матеріалів, мінімальні трудовитрати на виготовлення та монтаж конструкцій;

- естетичним, тобто конструкції повинні мати гармонійні форми, суттєва ця вимога для громадських будівель та споруд.

Контрольні запитання

1. Які основні етапи історичного розвитку застосування металевих конструкцій в Україні можна виділити?

2. Які види металевих конструкцій застосовуються в одноповерхових промислових будівлях? У чому їх перевага порівняно із залізобетонними конструкціями?

3. У чому полягають основні відмінності між сталевими і чавунними конструкціями в контексті будівельної практики XVIII-XIX ст.?

4. Назвіть основні позитивні властивості металевих конструкцій і коротко поясніть кожен з них.

5. Які є основні негативні властивості металевих конструкцій і якими способами можна їх усувати або зменшувати їхній вплив?

6. У яких сферах будівництва використовують листові металеві конструкції? Наведіть приклади споруд або об'єктів.

7. Які зміни відбулися в методах з'єднання елементів металевих конструкцій у сучасному будівництві порівняно з історичними підходами?

8. Які конструктивні вимоги висуваються до сучасних металевих конструкцій?

9. Яким конструктивні вимоги впливають на проектування сучасних металевих конструкцій?

ЛЕКЦІЯ 2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1 Механічні властивості сталей. Класифікація сталей, що застосовуються в будівництві хімічний склад і структура маловуглецевих сталей

Якість сталі визначається її механічними характеристиками. Таких показників п'ять. Три з них визначають випробуваннями на розтягнення стандартних круглих або плоских зразків (рис. 2.1, а) з побудуванням діаграми $\sigma = P / A_0$ та $\mathcal{E} = \Delta l / A_0$ (рис. 2.1, б).

За діаграмою розтягу визначають такі механічні характеристики:

- межа плинності σ_m ;
- межа міцності (тимчасового опору) σ_B ;
- відносне подовження $\mathcal{E} = (\Delta l / A_0) \cdot 100\%$ відповідає моменту розриву.

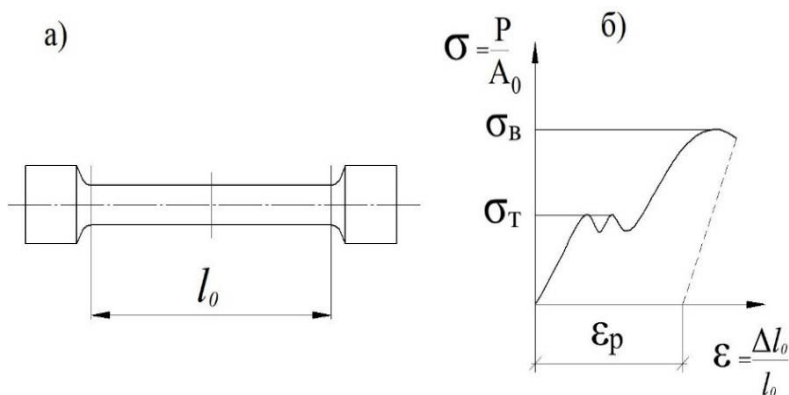


Рисунок 2.1 - Випробовування сталі на розтяг:
а - стандартний зразок; б - діаграма розтягу.

Перші два показники σ_B та σ_m характеризують міцність (чим вище їх значення, тим міцніша сталь), третій, \mathcal{E} - пластичні властивості.

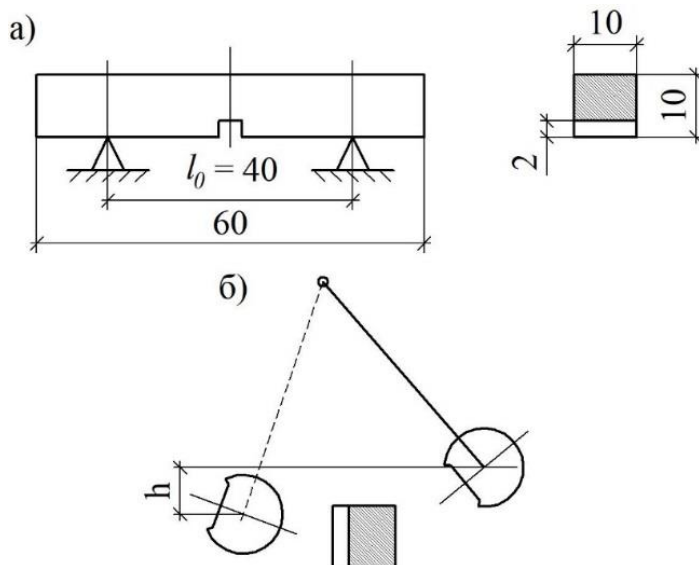


Рисунок 2.2 - Випробовування сталі на ударну в'язкість:
а - стандартний зразок; б - схема маятничого копра.

Наступною механічною характеристикою є ударна в'язкість a_k , яка характеризує схильність сталі до крихкого руйнування. Ударна в'язкість являє собою питому роботу (мДж/м²), витрачену на руйнування стандартного зразка з розрізом (рис. 2.2, а) на маятничому копрі системи Шарпі (рис. 2.2, б). Ударна в'язкість a_k визначається при температурах +20°C, -20°C та після штучного старіння (розтягу зразка до появи остаточного подовження $\mathcal{E} = 10\%$ і подальшого відпуску в печі при температурі 250°C протягом однієї години).

Роботу, яка була витрачена на руйнування зразка, визначають за різницею висот h підйому ножа копра до та після руйнування.

Технологічні властивості (опір тріщиноутворенню, розрашуванню) визначаються наступною механічною характеристикою - згином в холодному стані. Згин виконують навколо оправки діаметром d на визначений кут α , при цьому на випуклій стороні не повинні з'являтися тріщини (рис. 2.3).

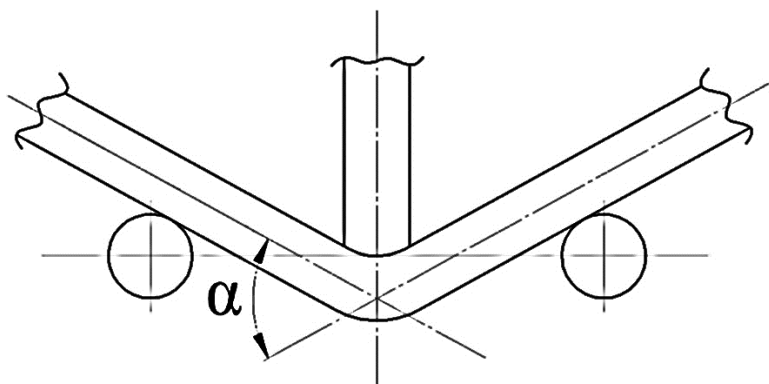


Рисунок 2.3 - Випробовування на згин сталі в холодному стані.

Механічні характеристики відображуються в спеціальному документі - сертифікаті, який видається металургійним заводом на кожен партію металу. Окрім механічних характеристик сертифікат містить відомості про хімічний склад сталі, отриманні за так званою ковшевою пробі при плавленні або по стружці, яка отримана зі зразків готового прокату. При цьому в будівельних сталях контролюється вміст вуглецю, марганцю, сірки, фосфору тощо. Сталь також може містити легуючі компоненти (кремній, нікель, хром, мідь тощо).

Якщо сталь не містить легуючих компонентів і основним ущільнюючим елементом є вуглець, то така сталь називається вуглецевою. У залежності від вмісту вуглецю вуглецеві сталі поділяються на:

- маловуглецеві, із вмістом вуглецю до 0,25%;
- середньовуглецеві, із вмістом вуглецю від 0,25% до 0,5 %;
- високовуглецеві, із вмістом вуглецю від 0,5% або 1,2 %.

З вуглецевих сталей в будівництві використовуються лише маловуглецеві.

В залежності від вмісту легуючих елементів легуючі сталі поділяються на:

- низьколеговані, із вмістом легуючих до 2,5 %;
- середньолеговані, із вмістом легуючих від 2,5% до 10%;
- високолеговані, із вмістом легуючих вище 10%.

З легованих сталей в будівництві використовуються лише низьколеговані.

За міцністю сталі, які використовують при будівництві, поділяються на три групи:

- маловуглецеві сталі звичайної міцності;
- сталі підвищеної міцності;
- сталі високої міцності (низьколеговані та термічно зміцнені).

Сталі поділяються за марками. Сучасне позначення (за ДСТУ 8539:2015) включає в себе літеру С, що означає сталь будівельну, цифри умовно позначають межу плинності прокату в Н/мм². Літери К та П в кінці марки позначають сталь підвищеної тривкості до корозії та з підвищеною вогнетривкістю. Групи міцності, марки сталі та відповідні їм основні механічні характеристики наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Класифікація будівельної сталі.

Групи міцності	Механічні характеристики			Марка
	σ_m , МПа	σ_b , МПа	ε , %	
Маловуглецеві сталі звичайної міцності	235...285	365...370	21...25	C235, C245, C255, C275, C285
Сталі підвищеної міцності (леговані)	375...390	430...540	16...21	C345, C345Т, C345К, C375, C375Т, C390, C390, C390Т, C390К
Сталі високої міцності (леговані та термічно зміцнені)	440...590	590...685	10...16	C440, C590, C590К

Основними компонентами маловуглецевої сталі є залізо та вуглець.

Залізо (відсотковий зміст більше 90%) є матеріалом пластичним, маломіцним. Вміст вуглецю в маловуглецевих сталях - до 0,25% (сталь Ст3 містить 0,22% вуглецю). Вуглець зміцнює залізо, знижує його пластичність, погіршує зварюваність. Низький вміст вуглецю в будівельних сталях забезпечує її достатньо високу пластичність та добру зварюваність.

Крім того, сталь містить добавки, домішки, гази у вільному та зв'язаному стані.

Добавки - компоненти, які вводяться спеціально для покращення якості сталі. Як розкислювач в маловуглецеву сталь при плавленні додають кремній, алюміній, марганець.

Домішки - компоненти, які містяться в руді і, в наслідок недосконалості виплавлення, потрапляють в сталь. Шкідливими домішками є фосфор та сірка.

Фосфор підвищує крихкість сталі, особливо при понижених температурах (холодноламкість). Допустимий вміст фосфору - 0,04%.

Сірка підвищує крихкість сталі при підвищеній температурі (червоноламкість). Допустимий вміст сірки - 0,05%.

Гази у вільному стані знижують якість сталі. Кисень у вільному стані діє подібно до сірки; азот у вільному стані діє подібно до фосфору.

Азот у зв'язаному стані робить сталь міцнішою, створюючи нітриди, подібні карбідам заліза (карбонітридне зміцнення).

Маловуглецеві сталі після остигання та кристалізації складаються з зерен *фериту* (майже чисте залізо), які оточені прошарками *перліту* (суміш карбіду заліза Fe_3C та пластинчатого фериту). Перліт, завдяки наявності в ньому карбіду заліза, є матеріалом дуже міцним. Огортаючи зерна пластинчатого та не міцного фериту, перліт, створюючи міцну та пружну сітку, зміцнює залізо (рис. 2.4). Чим більше вуглецю, тим більш міцніша та менш пластична сталь.

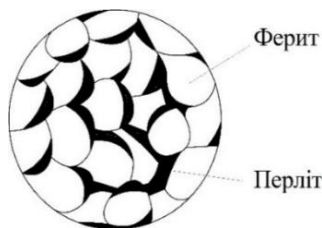


Рисунок 2.4 - Структура сталі.

Феритперлітова структура сталі визначає характер її роботи під навантаженням.

2.2 Способи виробництва, групи та категорії постачання сталі. Структура та хімічний склад низьколегованої сталі. Термічне зміцнення сталі

В сучасній металургії для отримання сталі з чавуну використовуються два способи: в конвертерах з кисневим дуттям та в мартенівських пічках.

Після плавки сталь виливають у ковші з подальшим переливом у виливниці, де відбувається остигання та кристалізація. У сталях, що виплавляються міститься велика кількість кисню та інших газів; кристалізація супроводжується бурхливим виділенням цих газів - кипінням. В результаті виходить сталь, засмічена газовими бульбашками, різними неметалевими включеннями.

Така сталь називається *кипляча*.

Якщо при переливанні у виливниці в сталь додати розкислювачі (порошки кремнію, марганцю, алюмінію), то можна отримати сталь *спокійну*. Розкислювачі зв'язують гази і концентрують раковини у верхній частині зливка, яка потім зрізається і відправляється в переплавку. Тому спокійні сталі на 10% ...12% дорожче киплячих.

Неповним розкисленням одержують сталь напівспокійну.

Кипляча сталь має більш низькі механічні характеристики, підвищену схильність до тендітного руйнування (низьку ударну в'язкість), не рекомендується до застосування у відповідальних спорудах і при температурі нижче - 30°C.

Промислове постачання стали здійснюватися за трьома групами:

А - з гарантією за механічними властивостями;

Б - із гарантією по хімічному складу;

В - з гарантією за механічними властивостями та хімічним складом.

У будівництві застосовуються сталі, що поставляються за групою В, тобто з гарантією за механічними характеристиками та хімічним складом. Причому для кожної марки стали гарантується в повному обсязі механічні характеристики, лише частина їх, залежно та умовами експлуатації конструкції. Відповідно до цього сталь групи В поставляється по шести категоріях (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 — Категорія поставляння сталі.

Характеристика	Категорія					
	1	2	3	4	5	6
Хімічний склад	+	+	+	+	+	+
Межа міцності, σ_b	+	+	+	+	+	+
Межа плинності, σ_m	+	+	+	+	+	+
Відносне подовження, \mathcal{E}	-	+	+	+	+	+
Згин у холодному стані	+	+	+	+	+	+
Ударна в'язкість:						
a_k при $t = + 20^{\circ}\text{C}$	-	-	+	-	-	-
$t = - 20^{\circ}\text{C}$	-	-	-	+	+	-
Після штучного старіння	-	-	-	-	+	+
Позначення: + гарантується - не гарантується						

Структура низьколегованих сталей аналогічна структурі маловуглецевих сталей. Вміст вуглецю до 0,18%. Міцність досягається легуванням додаванням легуючих компонентів, які, утворюючи міцні карбіди, входять до складу перлітового прошарку (див. рис. 2.4.). Чим більше легуючих компонентів, тим більше перліту, тим міцніше сталь.

У металургії вводяться такі позначення легуючих добавок: Г - марганець, С - кремній, Х - хром, Н - нікель, Д - мідь, Ю - алюміній, Т - титан, А - азот, П - фосфор, Р - бор, М - молібден, Ф - ванадій.

Під впливом температури, режиму нагрівання та охолодження змінюється структура, величина зерна, розчинність легуючих компонентів; це сприяє підвищенню характеристик міцності сталі.

Основними видами термічної обробки сталі є нормалізація, відпал, загартування та відпустка.

Нормалізація це повторне нагрівання прокату до температури утворення аустеніту ($t > 910^{\circ}\text{C}$) і подальше природне охолодження.

Відпал - це повторне нагрівання прокату до температури $t > 910^{\circ}\text{C}$ і подальше повільне охолодження.

При нормалізації та відпалу аустеніт поступово переходить у перліт і ферит.

Загартування - це повторне нагрівання до температури $t > 910^{\circ}\text{C}$ і наступне швидке охолодження (швидкість охолодження вище швидкості перетворення фаз). Решітка аустеніту змінюється ґратами фериту, а вуглець виділятиметься не встигає. Виходить структура

фериту, насичена вуглецем і звана мартенситом. Отримана структура відрізняється підвищеною міцністю, але вона нестійка вуглець прагне виділитися.

З метою отримання структур більш стійких застосовують відпуск нагрівання температури $t < 723^{\circ}\text{C}$ з подальшим охолодженням.

2.3 Вибір марок сталі для будівництва конструкцій. Алюмінієві сплави, які використовуються в будівництві. Сортаменти сталевих та алюмінієвих профілів

Вибір марок сталі для різноманітних конструкцій необхідно виконувати у відповідності до таблиць ДСТУ з врахуванням двох факторів:

- ступінь відповідальності конструкції;
- кліматичні умови району будівництва (температурний режим).

Залежно від ступеня відповідальності та характеру роботи всі сталеві конструкції поділяються на чотири групи.

Група 1. Зварні конструкції, що працюють в особливо важких умовах і піддаються впливу динамічних, вібраційних або рухомих навантажень (підкранові балки; елементи естакад, фасонки ферм, прилітні будови галерей та ін.).

Група 2. Зварні конструкції, що працюють при статичному навантаженні (ферми ригелі рам, балки перекриттів та покриттів, косоури драбин та ін.).

Група 3. Зварні конструкції, що працюють при статичному навантаженні (колони, стійки, прогони покриттів та ін.).

Група 4. Допоміжні конструкції будівель (зв'язки, елементи фахверка, сходи, трапи та ін.).

Залежно від середньої розрахункової температури найхолоднішої п'ятиденки в нормах розрізняють три інтервали температур (t , $^{\circ}\text{C}$):

I інтервал із температурою $t \geq -30^{\circ}\text{C}$ (кліматичні райони П₅ та П₄);

II інтервал з температурою $-40^{\circ} > t \geq -50^{\circ}\text{C}$ (кліматичні райони П₃, П₂, I₂);

III інтервал із температурою $50^{\circ} > t > -65^{\circ}\text{C}$ (кліматичний район I₁).

Для кожного з інтервалів температури Норми [4] рекомендують відповідні марки сталі. Територія України знаходиться в кліматичних районах з розрахунковою температурою вище -30°C .

Алюмінієві сплави мають ряд переваг у порівнянні зі сталлю, основними з яких є:

- легкість (алюмінієві конструкції приблизно в 3 рази легші за сталеві, щільність алюмінію $\rho = 2,7 \text{ т/м}^3$);
- корозієстійкість (на поверхні конструкцій з алюмінієвих сплавів утворюється окисна плівка, що перешкоджає розвитку корозії у всіх середовищах, крім сильноагресивної, де застосовувати алюмінієві сплави не рекомендується);
- антимагнітність;
- відсутність іскроутворення.

З недоліків алюмінієвих сплавів слід відзначити їхню дороговизну і малий модуль пружності ($E_{ал} = 2,7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$), який майже на порядок менше модуля пружності сталі ($E_{ст} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$). Отже, конструкції з алюмінієвих сплавів деформативніші і менш стійкі в порівнянні зі сталевими.

Через малу міцність алюміній в чистому вигляді не застосовується. Алюміній зміцнюють:

- присадкою інших металів;
- термічною обробкою (загартуванням);
- нагартовкою механічною обробкою типу наклепу.

Розрізняють такі стани алюмінієвих сплавів:

М - відтожене (м'яке);

Н - нагартоване;

Н2 - напівнагартоване;

ГП - гарячекатане;

Т - загартоване та природно зістарене;

Т1 - загартоване та штучно зістарене;

Т4 - не повністю загартоване та природно зістарене;

Т5 - не повністю загартоване та штучно зістарене.

Залежно від складу зміцнювальних компонентів сплави бувають подвійною та потрійною композицією. До сплавів подвійної композиції відносяться:

- сплави марки АМц, що містять композицію (алюміній + марганець);

- сплави марки АМг-магналії, що містять композицію (алюміній + магній);

Ці сплави не піддаються термічному зміцненню, застосовуються в відтоженому (м'якому) стані.

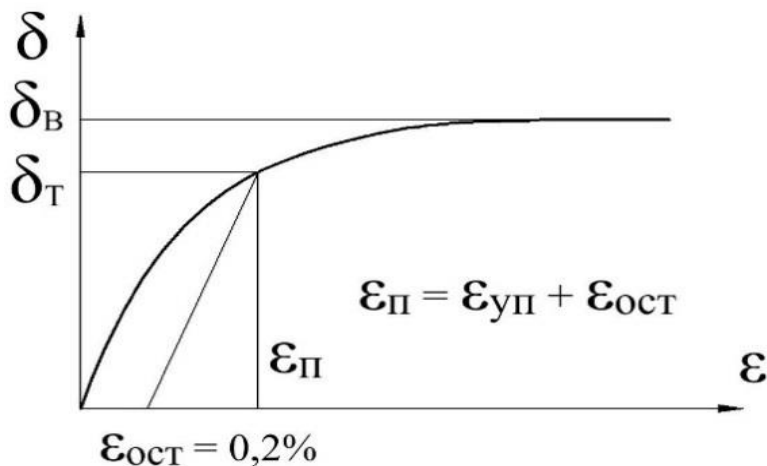


Рисунок 2.5 - Діаграма розтягнення алюмінієвих сплавів.

Сталь надходить до споживача як прокату, одержуваного на прокатних станах металургійних заводів. Перелік прокатних профілів із зазначенням їх форми, геометричних характеристик та маси називається - **сортаментом**.

Вся прокатна сталь ділиться на листову та профільну.

Листова сталь класифікується так:

- сталь товстолиста з товщиною листів від 4 до 160 мм і шириною від 600 до 3800 мм (ходова товщина 4...40 мм, ширина до 2400 мм);

- сталь тонколиста з товщиною листів до 4 мм, застосовуються, головним чином для виготовлення гнутих, профільованих, штампованих профілів а також для покрівельних покриттів;

- сталь широкополочна універсальна, що постачається у вигляді смуг з рівними краями з товщиною 6-60 мм, з шириною 200 - 1050 мм і довжиною 5-12 м і застосовується головним чином для складових перерізів.

Крім цього для будівництва поставляються спеціальні листи у вигляді рифленої та просіchnовитяжної сталі, що застосовується для покриттів майданчиків, сходів.

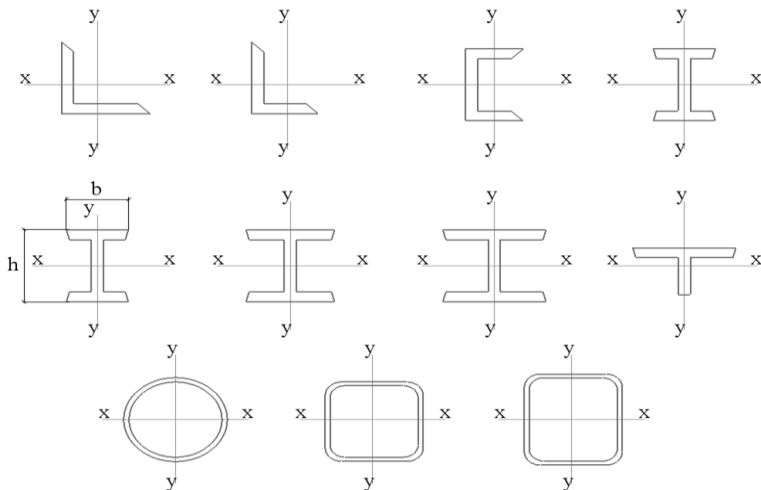


Рисунок 2.6 - Типи прокатних профілів.

Профільна сталь класифікується в такий спосіб (рис. 2.6.):

- куточки рівнополочні;
- куточки нерівнополочні;
- швелери від № 5 до № 40 (номер профілю відповідає висоті швелера);
- двотаври звичайні з ухилом верхніх граней полиць від №10 до №60 (номер профілю відповідає висоті двотавра);
- двотаври широкополочні з паралельними гранями полиць; вони бувають трьох типів: нормальні (Б) із ставленням $b/h = 1/1,65$;
- широкополочні (Ш) із ставленням $b/h = 1/1,25$; колонні (К) із ставленням $b/h = 1/1$;
- таври, одержувані розпуском (розрізанням стінки в подовжньому напрямку) широкополочних двотаврів;
- труби круглі (гарячекатані або електроварні) від 8 до 1620 мм з товщиною стінок від 1 до 16 мм;
- труби квадратного та прямокутного перерізу (електроварюванні) з товщиною профілю від 3 до 8 мм.

З тонколистової сталі $t = 1...8$ мм на профілегибочних станах виготовляють гнуті профілі різноманітної форми (рис. 2.7.). Основна сфера застосування таких профілів - легкі конструкції покриттів будівель. Вони можуть надати економію металу до 10%.

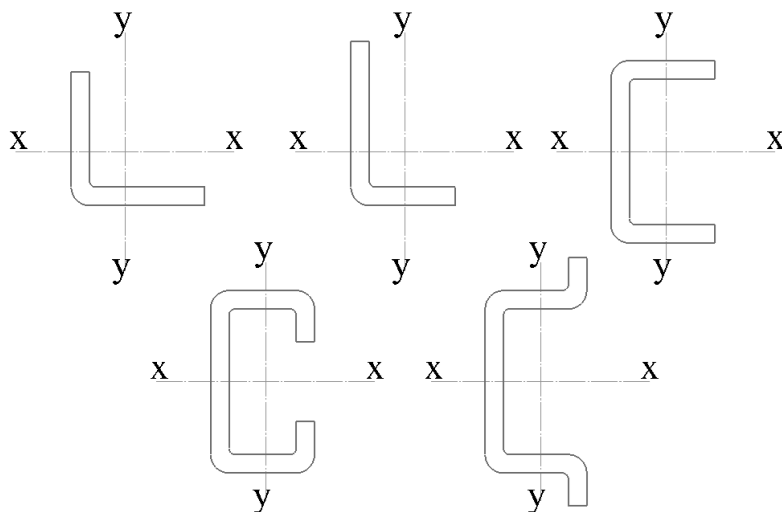


Рисунок 2.7 - Типи холодногнутих профілів.

Крім цього в будівництві в менших обсягах застосовуються такі профілі, як кранові рейки, двотаврові профілі підвісних шляхів, сталь квадратна і кругла, також сталеві канати та дріт, сталевий оцинкований настил та ін.

Будівельні профілі з алюмінієвих сплавів одержують прокаткою, пресуванням або литтям. Алюмінієві сплави, будучи більш м'яким у порівнянні зі сталлю, мають значні переваги у формоутворенні, тому сортамент алюмінієвих сплавів відрізняється великою різноманітністю (рис. 2.8.). Можливість отримати профілі практично будь-яких перерізів деякою мірою компенсують малу стійкість алюмінієвих стрижнів внаслідок низького модуля пружності матеріалу.

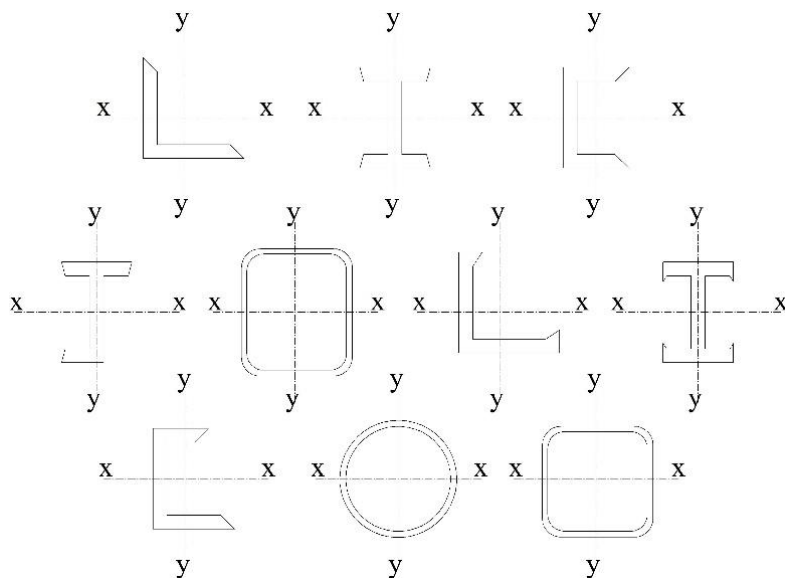


Рисунок 2.8 - Типи профілів з алюмінієвих сплавів.

Контрольні запитання

1. Які основні механічні характеристики визначаються при випробуванні сталі на розтяг? Що вони відображають?
2. Що таке ударна в'язкість сталі, яким способом вона визначається і чим характеризується?
3. У чому полягає суть випробування сталі на згин у холодному стані?
4. Як класифікуються вуглецеві сталі за вмістом вуглецю?
5. Які з них використовуються в будівництві та чому?
6. Які шкідливі домішки можуть міститися в сталі?
7. Які існують типи сталей за ступенем розкислення? Яка між ними різниця у властивостях та сфері застосування?
8. Які групи та категорії постачання сталі передбачає стандартизація?

ЛЕКЦІЯ 3. РОБОТА СТАЛІ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

3.1 Робота сталі при одноразовому статичному навантаженні. В'язке та крихке руйнування сталі. Фактори, які сприяють крихкому руйнуванню. Наклеп та втомність сталі

Робота сталі при одноразовому статичному навантаженні - це поведінка сталі при зростаючій дії навантаження аж до руйнування, що наочно представляється діаграмою $\sigma - \epsilon$ (рис. 3.1, а).

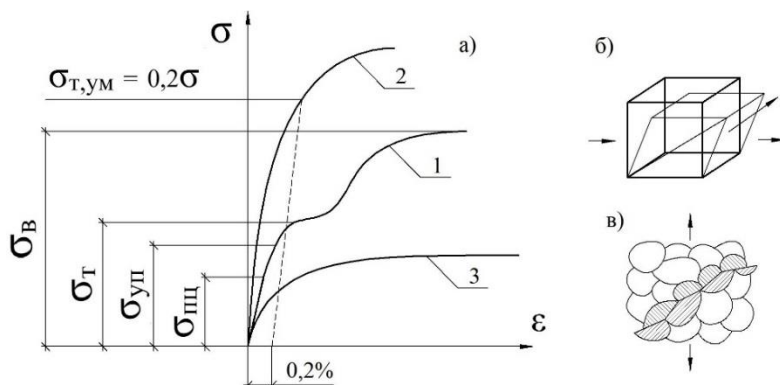


Рисунок 3.1 - Робота при однократному розтягуванні: а - діаграми розтягування; б - деформація кристалу фериту; в - зсув в зернах фериту; 1 - маловуглецева сталь, легована сталь, 3 - чисте залізо.

Механізм деформування різних матеріалів (чистого заліза, маловуглецевої або легованої сталі) визначається особливостями їх структури. На відміну від вуглецевої легована сталь містить значно більшу кількість перліту; чисте залізо, навпаки, взагалі не містить зміцнюючого перлітового прошарку.

Розрізняють декілька стадій деформування матеріалів.

I стадія - напруження змінюються від нуля до межі пропорційності $\sigma_{пц}$. Пружні деформації пропорційні діючому напруженню, доречний закон Гука $\epsilon = \sigma/E$. Деформації подовження є наслідком пружно-повернутого спотворення атомних ґрат кристалів фериту (рис.

2.1, б). Після зняття навантаження кристал приймає початкову форму, а зразок - первісну довжину.

II стадія - напруження змінюються від межі пропорційності $\sigma_{пр}$ до межі пружності $\sigma_{пл}$. Деформації як і пружні, але не пропорційні діючому напруженню.

III стадія - напруження змінюються від межі пружності $\sigma_{пр}$ до межі плинності $\sigma_{пл}$. Для цієї стадії характерна поява пластичних (залишкових) деформацій, пов'язаних зі зсувами зсуву однієї частини кристала фериту щодо іншої за напрямом найбільшої діагоналі (рис. 3.1, б).

Фізиками встановлено, що зрушення в кристалах з ідеальною структурою неможливе, тому що для цього необхідно величезне зусилля, що перевищує силу взаємодії всіх атомів. Зрушення відбувається у кристалах, що мають порушення у структурі, дефекти. Через дефекти відбувається послідовне переміщення, переміщення атомів усередині кристала, що і призводить до зсуву. Зрушення в кристалах фериту внаслідок дефектів атомних ґрат називається *дислокацією*.

Нагромадження зрушень (дислокацій) у кристалах фериту призводить до появи масових зрушень у зернах фериту (рис. 3.1, в). У цей час на зразку з'являються так звані лінії Чернова-Людерса, спрямовані приблизно під кутом 45° , на діаграмі розтягування з'являється майданчик плинності. Подальший розвиток деформацій утрудняється більш міцними і жорсткими зернами перліту, що обволікають зерна фериту. Щоб утворилися загальні площини зсуву в зразку необхідно, щоб зрушення або обтікали зерна перліту, або розколювали їх. Для цього необхідне додаткове навантаження, що характеризує наступну стадію деформування.

IV стадія - напруження змінюються від межі плинності $\sigma_{пл}$ до межі міцності $\sigma_{то}$ (тимчасового опору) - стадія самозміцнення. Зі зростанням напруг зрушення розколюють зерна перліту, деформації починають накопичуватися в одному найслабшому місці, на зразку утворюється вузьке місце шийка. Перетин у шийці зменшується і виходить розрив.

Побудова майданчика плинності характерно лише мало-вуглецевої сталі із вмістом вуглецю від 0.1 до 0.3%. При меншому вмісті вуглецю і, отже, при меншій кількості зерен перліту їх

виявляється недостатньо для стримування зсувів зернами фериту. Зрушення безперервно зростають і призводять до руйнування.

Аналогічно деформується чисте залізо (рис. 3.1 а). У легованих сталях перліту виходить так багато, що його зерна повністю блокують зерна фериту і не дають можливості для розвитку всередині них зрушень. Після пружної стадії відразу починається стадія самозміцнення. У цьому випадку використовується умовна межа плинності, рівний напрузі, при якому залишкова відносна деформація досягає величини 0,2% (рис. 3.1, а).

При розрахунку конструкцій в пружно-пластичній стадії використовують ідеалізовану діаграму Прандтля (рис. 3.2).

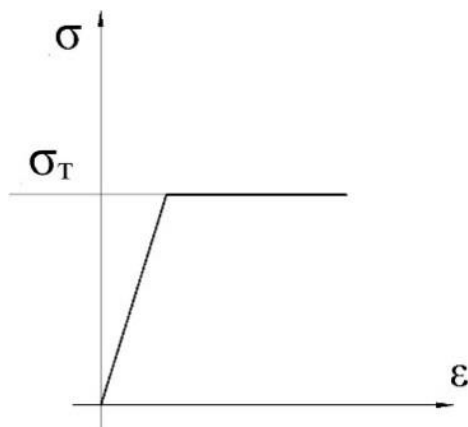


Рисунок 3.2 - Ідеалізована діаграма розтягнення сталі (діаграма Прандтля).

Розрізняють в'язке (пластичне) та крихке руйнування сталі. В'язке руйнування відбувається при високому рівні напруги, як правило, при значних пластичних деформаціях і наочно ілюструється діаграмами розтягування (рис 3.1, а).

Крихке руйнування характеризується невисоким рівнем напружень (нижче межі пружності) і настає завжди раптово (рис. 3.3).

У техніці переважно в'язке руйнування, тому для уникнення крихкого руйнування необхідно знати фактори, що сприяють його наступу. Основні їх такі:

- хімічний склад;

- спосіб виробництво та розкислення;
- старіння;
- концентрація напруги;
- зниження температури;
- ударні динамічні та повторні навантаження.

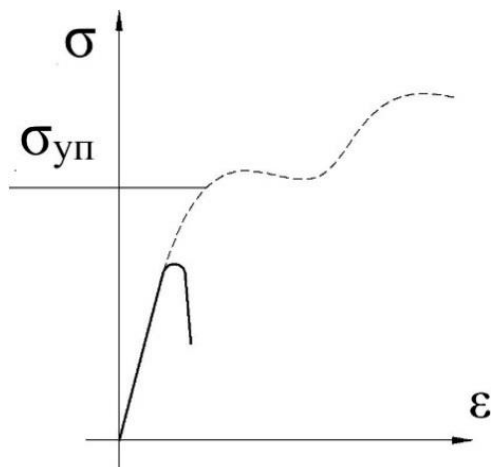


Рисунок 3.3 - Крихке руйнування сталі.

Сталі, що застосовуються у будівництві мають гарантії по хімічному складу, що обмежують вміст вуглецю, сірки, фосфору. Крихкого руйнування схильні сталі киплячі, нерозкислені у процесі виробництва. Такі сталі містять гази у вільному стані, які при охолодженні утворюють бульбашки, раковини, тріщини.

Старіння сталі пов'язане з процесом виділення із зерен фериту вуглецю, що завжди міститься там у невеликій кількості. Вуглець, що виділився, накопичується в перлітовій прошарку, збільшуючи її; згодом сталь стає міцнішою і водночас менш пластичною, тобто більш схильною до крихкого руйнування. Щоб відразу стабілізувати властивості сталі застосовують штучне старіння - розтягнення зразка до появи залишкових деформацій $\epsilon = 10\%$ і подальша відпустка при температурі 250°C протягом 1 години.

Істотний вплив на роботу металевих конструкцій надає таке явище як концентрація напруги, тобто поява нерівномірного розподілу нормальних і дотичної напруги у отворів, витоків, в зонах зварних швів

(рис. 3.4). Рівень концентрації напруги прийнято оцінювати коефіцієнтом концентрації напруги, що визначається за формулою:

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

де σ_{max} та σ_{nom} максимальне та номінальне значення напруги (рис. 3.4).

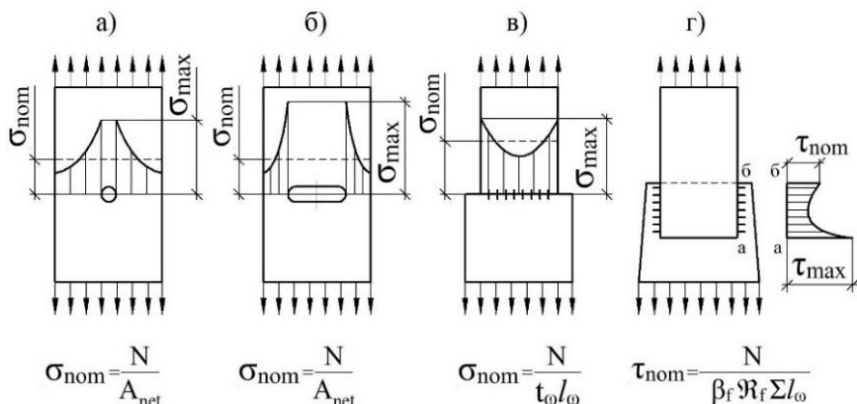


Рисунок 3.4 - Концентрація напружень в елементах конструкцій:

- а, б - пластина з отвором; в - зварний стиковий шов;
г - кутові флангові шви.

У круглих отворів і напівкруглих витків $K = 2...3$, у місцях гострих надрізів, де силовий потік згущується сильніше, $K = 6...9$. Чим вище коефіцієнт концентрації, тим більше ймовірність появи тріщини і отже, настання крихкого руйнування. При статичному навантаженні та нормальній температурі концентрація напруги значного впливу на несучу здатність не надає і в розрахунках не враховується. Однак при динамічних і ударних впливах, при низьких температурах (нижче -30°C) концентрація напруги може призвести до утворення тріщини крихкого руйнування.

При знижених (негативних) температурах межі міцності та плинності підвищуються та зближуються між собою; при цьому різко знижуються пластичні властивості, тобто сталь стає більш крихкою (рис. 3.5).

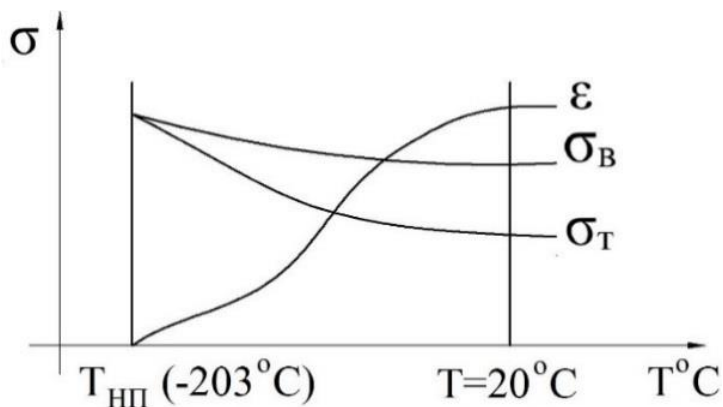


Рисунок 3.5 - Залежність параметрів міцності та пластичності сталі від температури.

При температурі -203°C в розтягнутих сталевих зразках спостерігається практично чисто крихке руйнування, без помітних пластичних деформацій. Ця температура називається температурою нульової пластичності $T_{\text{нп}}$ (рис. 3.5).

Особливо великий вплив низьких температур на характер руйнування сталі при дії динамічних та ударних навантажень. Для кількісної оцінки впливу концентрації напруги, ударного навантаження і температури на характер руйнування сталі застосовують стандартні випробування на ударну в'язкість. Стандартні зразки (рис. 2.2) зазнають ударного вигину з оцінкою роботи, витраченої з його руйнування. Величину ударної в'язкості визначають за формулою:

$$a_k = W_{\beta} / A_0,$$

де W_{β} - робота, витрачена на руйнування в мДж;

A_0 - площа зразка в ослабленому надрізаному перетині в m^2 .

Залежність ударної в'язкості температури представлена на рис.

3.6.

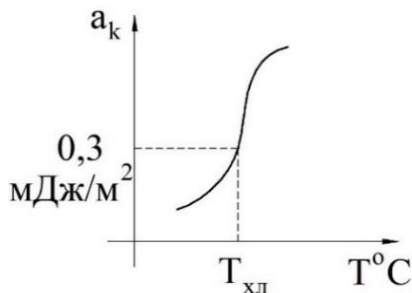


Рисунок 3.6 - Залежність ударної в'язкості від температури.

Температуру, при якій ударна в'язкість знижується до $0,3 \text{ МДж/м}^2$, називають температурним порогом холодноламкості. Поріг холодноламкості спокійної сталі ВСт3сп близький до температури -20°C . Крихкому руйнуванню сталі сприяють наклеп і втома, що виникають при повторних навантаженнях.

Повторні завантаження зразка в межах пружних деформацій не змінюють вигляду діаграми розтягування: навантаження та розвантаження відбуватимуться за однієї лінії. Однак якщо сталь піддати розтягуванню вище межі пружності, а потім розвантажити, то розвантаження відбуватиметься по лінії паралельній лінії пружної роботи, з'являться залишкові пластичні деформації ϵ_n . При повторному розтягуванні зразка після відпочинку спочатку сталь буде працювати пружно по лінії розвантаження, а потім слідувати по нормальному шляху діаграми одноразового розтягування (рис. 3.7).

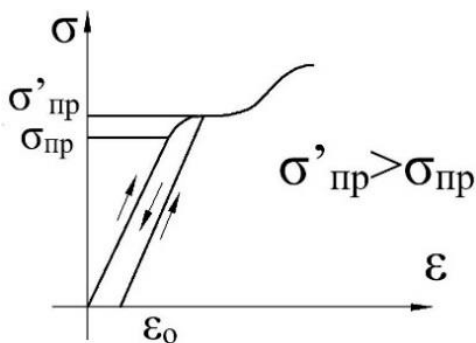


Рисунок 3.7 - Наклеп сталі.

Підвищення пружної роботи матеріалу в результаті попередньої пластичної деформації називається *наклепом*. Наклеп знижує пластичність сталі, збільшує її крихкість.

У деяких випадках це явище використовується для зміцнення сталі (наприклад, арматури).

При багаторазовому безперервному навантаженні виникає явище *втоми* матеріалу та його крихке руйнування при напруженні менше межі плинності. Напруження, при якому відбувається таке руйнування сталі, називається *вібраційною* або *втомною* міцністю $\sigma_{втом}$. Здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при багаторазово повторюваних навантаженнях називається *витривалістю*.

Втомна (вібраційна) міцність залежить:

- від числа циклів навантаження;
- від характеру циклів.

Залежність $\sigma_{втом}$ від числа циклів представлена графіком 3.8.

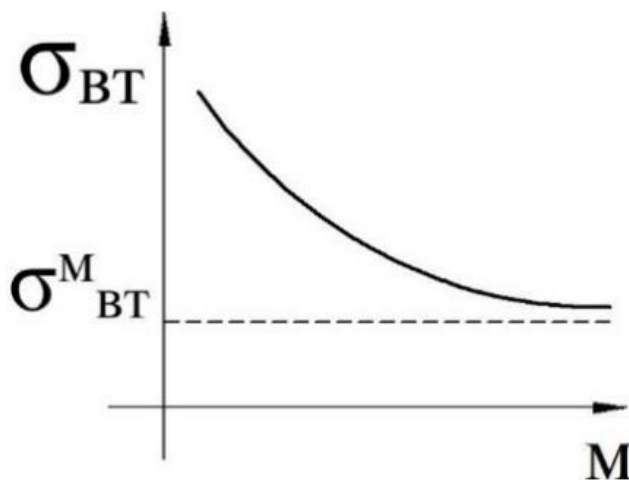


Рисунок 3.8 - Залежність втоми міцності від кількості циклів.

Втомне розвантаження відбувається внаслідок накопичення числа дислокацій при кожному завантаженні і концентрації їх біля стиків зерен, що сприяє розпушенню матеріалу і призводить до утворення тріщин. Крива міцності втоми асимптотично наближається до деякої межі, званої межею втоми $\sigma_{втом}$.

Для сталі межа втоми становить приблизно 10 млн. циклів навантаження. Але вже при 2 млн. циклів втомна міцність мало відрізняється від її межі, тому випробування на витривалість сталі зазвичай виробляють на базі 2 млн. циклів навантажень.

Цикли навантажень характеризуються коефіцієнтом асиметрії $\rho = \sigma_{min} / \sigma_{max}$. Розрізняють такі види циклів навантажень (рис. 3.9):

- однозначний асиметричний цикл;
- повний однозначний асиметричний цикл;
- повний різнозначний симетричний цикл.

Для конструкцій найбільш сприятливі однозначні цикли.

Розрахунок конструкцій на витривалість виконують за формулою:

$$\sigma_{max} < R_v \cdot \alpha \cdot \gamma_v,$$

де R_v - розрахунковий опір втоми;

α - коефіцієнт, який залежить від кількості циклів навантажень n ;

γ_v - коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта асиметрії ρ .

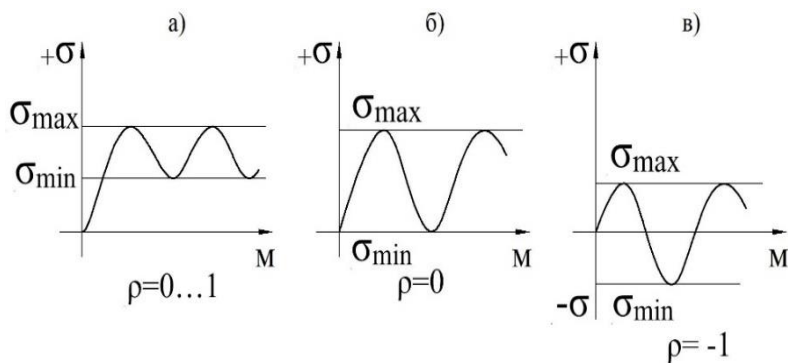


Рис. 3.9 - Цикли навантаження конструкцій:

а - однозначний; б - повний однозначний; в - повний різнозначний.

Існує поняття *малоциклової втоми*, що виникає при незначній кількості навантажень (не більше 10 тис.), але за досить великих

напруг. Прикладом таких навантажень може служити часте наповнення та випорожнення резервуарів.

Контрольні запитання

1. Які стадії проходить сталь під дією одноразового статичного навантаження, і які механізми деформування характерні для кожної з них?

2. У чому полягає різниця між в'язким і крихким руйнуванням сталі?

3. Що таке дислокація в структурі сталі і яку роль вона відіграє у процесі пластичної деформації?

4. Що таке майданчик плинності на діаграмі розтягу? Для яких сталей він характерний і чому?

5. Яким чином концентрація напружень у конструкціях впливає на їхню міцність і як визначається коефіцієнт концентрації?

6. Що таке температура нульової пластичності? Як вона впливає на характер руйнування сталі?

7. У чому полягає суть старіння сталі? Яким чином воно впливає на її властивості?

8. Що таке наклеп сталі і як він впливає на міцність та пластичність матеріалу?

9. Що таке втома матеріалу і в чому її відмінність від одноразового руйнування?

10. Які фактори впливають на втомну міцність сталі та як класифікуються цикли навантаження?

ЛЕКЦІЯ 4. РОЗРАХУНОК МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ

4.1 Поняття про граничні стани конструкцій. Основні положення методу розрахунку за граничними станам. Нормативний та розрахунковий опір

Усі будівельні конструкції, зокрема і металеві, розраховуються нині методом граничних станів. В основі методу лежить поняття про граничні стани конструкцій. Під граничними маються на увазі такі стани, при яких конструкції перестають задовольняти пропонованим до них у процесі експлуатації або при зведенні вимогам, заданим відповідно до призначення та відповідальності споруд.

У металевих конструкціях розрізняють дві групи граничних станів.

Граничні стани першої групи характеризуються втратою несучої здатності та повною непридатністю конструкцій до експлуатації. До граничних станів першої групи належать:

- руйнування будь-якого характеру (в'язке, тендітне, втомне);
- загальна втрата стійкості форми;
- втрата стійкого становища;
- перехід конструкції в змінну систему;
- якісна зміна конфігурації;
- розвиток пластичних деформацій, надмірних зрушень у з'єднаннях та інше;

Особливість всіх граничних станів першої групи - їх незворотність.

Граничні стани другої групи характеризуються непридатністю до нормальної експлуатації, внаслідок появи недопустимих переміщень (прогинів, кутів повороту, коливань тощо).

Розрахунок конструкцій за методом граничних станів спрямований на запобігання настанню будь-якого з граничних станів при зведенні будівлі та протягом всього терміну його служби.

Розрахунок конструкцій, спрямований на запобігання граничним станам першої групи, виражається рівністю:

$$N \leq \Phi,$$

де N - загальне зусилля в елементі, що розглядається (нормальна сила, момент, поперечна сила тощо);

Φ - несуча спроможність елемента, тобто граничне зусилля, яке може сприйматися цим елементом без втрат експлуатаційних якостей.

Зусилля N є найбільш можливе під час експлуатації споруди зусилля, що є функцією найбільш можливих цей час розрахункових навантажень, тобто $N = f(F_i)$. У загальному випадку ліву частину нерівності можна подати у вигляді:

$$N \leq \gamma_n \cdot \Sigma F_i \cdot \bar{N}_i,$$

де γ_n - коефіцієнт надійності за призначенням, який залежить від ступеню відповідальності споруди (за попередніми нормативами);

F_i - розрахункове навантаження i - того навантаження;

\bar{N}_i - зусилля в елементі $F_i = 1$.

Розрахункове значення навантаження визначається за формулою:

$$F = F^n \cdot \gamma_f,$$

де F^n - нормативне навантаження, тобто навантаження, що відповідає умовам нормальної експлуатації;

γ_f - коефіцієнт надійності за навантаженням (коефіцієнт перевантаження), враховуючий можливе відхилення навантажень в несприятливу сторону.

Праву частину нерівності можна представити у вигляді:

$$\Phi = R \cdot \gamma_c \cdot S,$$

де R - розрахунковий опір сталі;

γ_c - коефіцієнт умов роботи за ДБН В.2.6-198:2014 (табл. 4.1);

S - геометрична характеристика перерізу (при розтягненні та стисканні - площа перетину A , при вигині - момент супротиву W тощо).

Таблиця 4.1 — Коефіцієнт умов роботи γ_c .

Елементи конструкцій	γ_c
1. Балки суцільного перерізу і стиснуті елементи ферм перекриттів під залами театрів, клубів, кінотеатрів, під трибунами, під приміщеннями магазинів, книгосховищ і архівів тощо при тимчасовому навантаженні, що не перевищує ваги перекриття	0,9
2. Колони громадських споруд і опор водонапірних башт	0,95
3. Колони одноповерхових виробничих споруд із мостовими кранами	1,05
4. Стиснуті основні елементи (крім опорних) решітки складеного таврового перерізу з двох кутиків у зварних фермах покриттів і перекриттів при розрахунку на стійкість зазначених елементів із гнучкістю $\lambda \geq 60$	0,80
5. Затяжки, тяги, відтяжки, підвіски при розрахунку на міцність у перерізі без послаблень	0,90
6. Перерізи елементів конструкцій зі сталі з границею текучості до 440 Н/мм^2 , що несуть статичне навантаження, при розрахунку на міцність у перерізі послабленому отворами для болтів (окрім фрикційних з'єднань): - суцільних балок і колон; - стрижневих конструкцій покриттів та перекриттів	1,1 1,050
7. Стиснуті елементи решітки просторових решітчастих конструкцій, виконані з одиночних рівнополичкових кутиків, які прикріплюються однією полицею (для нерівнополичкових кутиків - більшою полицею): а) безпосередньо до поясів за допомогою зварних швів або двох болтів і більше, які встановлені вздовж кутика: - розкоси (рисунок 13.3, а); - розпірки (рисунок 13.3, б, в, е); - розкоси (рисунок 13.3, в, г, д, е); б) безпосередньо до поясів за допомогою одного болта або через фасонку незалежно від виду з'єднання	0,90 0,90 0,80 0,75

Кінець таблиці 4.1.

8. Елементи плоских ферм з одиночних кутиків, стиснуті елементи, виконані з одиночних кутиків, які прикріплюються однією полицею (для нерівнополичкових кутиків - меншою полицею), за винятком елементів, наведених у позиції 7 цієї таблиці	0,75
9. Опорні плити, виконані зі сталі з границею текучості до 390 Н/мм ² , що несуть статичне навантаження, товщиною, мм: а) до 40 включно; 1,20 б) понад 40 до 60 включно; 1,15 в) понад 60 до 80 включно	1,20 1,15 1,10

В металевих конструкціях розрізняють два види розрахункового опору R :

R_y - розрахунковий опір, який встановлюється за межею плинності та використовується в розрахунках, які передбачають пружну роботу матеріалу;

R_{un} - розрахунковий опір, який встановлюється за межею міцності та використовується в розрахунках конструкцій, де допускається значні пластичні деформації.

З урахуванням цієї нерівності для визначення несучої спроможності елементів конструкції, які працюють у пружній стадії, отримаємо:

$$\Phi = R_y \cdot \gamma_c \cdot S.$$

Несуча спроможність елементів конструкції, які працюють в умовах значних пластичних деформацій, визначається за формулою:

$$\Phi = R_u \frac{1}{\gamma_u} \gamma_c \cdot S,$$

де γ_u - коефіцієнт надійності для елементів конструкції, які розраховуються на міцність за тимчасовим опором.

В усіх випадках $\gamma_u = 1,3$. З урахуванням наведених формул, нерівність матиме вигляд:

$$N \leq R_y \cdot \gamma_c \cdot S.$$

Для розтягнутих (при $S = A$) та вигнутих (при $S = W$) елементів:

$$N \leq R_y \cdot \gamma_c \cdot A; \quad M \leq R_y \cdot \gamma_c \cdot W.$$

З останніх виразів легко отримати умови міцності розтягнутих та вигнутих елементів:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq R_y \cdot \gamma_c; \quad \sigma = \frac{M}{W} \leq R_y \cdot \gamma_c.$$

Розрахунок конструкцій, спрямований на запобігання граничному стану другої групи, виражається нерівністю:

$$\delta = [\delta],$$

де δ - деформації або переміщення конструкцій, що виникають від зовнішніх нормативних впливів на неї; для визначення δ можна використовувати методи будівельної механіки (наприклад, метод Мора, початкових параметрів);

$[\delta]$ - граничні деформації чи переміщення.

Для балок нормується відносний прогин $f/1$ (де f - прогин, l проліт балки). Граничне значення відносного прогину для основних балок робочих майданчиків $[f/1]=1/400$, для балок настилу $[f/1]=1/250$.

У промислових будівлях і естакадах нормується відносне горизонтальне відхилення колони Δ/h (h - висота колони від низу бази до головки рейки підкранової балки).

Граничне відносне відхилення колон для відкритих естакад $[\Delta/h] = 1/4000$.

Розрахункові опори R_y та R_u визначаються за формулами:

$$R_y = R_{yn} / \gamma_m; \quad R_u = R_{un} / \gamma_m,$$

в яких R_{yn} та R_{un} - нормативні опори, які відповідно дорівнюють:

$$R_{yn} = \sigma_m;$$

$$R_{un} = \sigma_B,$$

де σ_m - межа плинності;

σ_B - межа міцності (тимчасового опору) матеріалу;

γ_m - коефіцієнт надійності за матеріалом, що враховує мінливість властивостей матеріалу і вибіркового характеру випробувань зразків за визначенням σ_m та σ_B а також масштабний фактор механічні характеристики визначаються на малих зразках при короткочасному одновісному розтягуванні, в той час як метал працює тривалий час у більшорозмірних конструкціях.

Значення нормативних опорів $R_{yn} = \sigma_m$ та $R_{un} = \sigma_B$, а також значення коефіцієнта γ_m встановлюють статистично. Нормативні опори мають статистичну забезпеченість щонайменше 0,95 тобто у 95 випадках зі 100 σ_m та σ_B будуть не менше значень, зазначених у сертифікаті. Коефіцієнт надійності за матеріалом встановлений на підставі аналізу кривих розподілу результатів випробувань сталі. Значення цього коефіцієнта змінюються від 1,025 до 1,15.

Нормативні та розрахункові опори для деяких найбільш застосовуваних марок сталей наведені в ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування».

Таким чином, у методі граничних станів усі вихідні величини, випадкові за своєю природою, видаються в нормах деякими нормативними значеннями, а вплив їхньої мінливості на конструкцію враховується відповідними коефіцієнтами надійності. Кожен із введених коефіцієнтів враховує мінливість лише однієї вихідної величини (навантаження, умов роботи, властивостей матеріалів, ступеня відповідальності споруди). Ці коефіцієнти часто називають приватними, а сам метод розрахунку за граничними станами там називають методом приватних коефіцієнтів.

4.2 Класифікація навантажень. Нормативні та розрахункові навантаження, коефіцієнт надійності за навантаженням. Снігові та вітрові навантаження. Посадження навантажень.

При визначенні навантажень на будівлі та споруди слід керуватися ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування».

Залежно від тривалості дії навантаження поділяються на постійні та тимчасові.

До постійних навантажень відносяться: вага частин будівлі (несучих і огорожувальних), вага і тиск ґрунтів, попереднє напруження конструкцій.

Тимчасові навантаження діляться на тривалі, короточасні та спеціальні.

До тимчасових тривалих навантажень відносяться: вага стаціонарного обладнання, єдностей та їх заповнення, навантаження на перекриття житлових та громадських будівель, навантаження на перекриття складів, холодильників, бібліотек, архівів, вага виробничого пилю.

До короточасних навантажень відносяться: навантаження від підвісних і мостових кранів, атмосферні (снігові, вітрові, ожеледиці).

До особливих навантажень відносяться: сейсмічні, вибухові, аварійні (від поломки обладнання), впливу нерівномірних деформацій основ (при гірничих виробках, при замочуванні просадкових ґрунтів).

Розрізняють нормативні та розрахункові значення навантажень. Нормативні навантаження відповідають умовам нормальної експлуатації. Розрахункові навантаження, що відповідають граничним станам конструкції, отримують множенням нормативних значень на відповідні коефіцієнти за надійністю.

Значення постійного розрахункового навантаження визначають за формулою:

$$p = p^n \cdot \gamma_f,$$

де ρ^n - нормативне постійне навантаження - вага конструкцій, що визначається за каталогами заводів-виробників або за розмірами конструкції з урахуванням густини матеріалу ρ ;

γ_{fn} - коефіцієнт надійності по навантаженню для ваги будівельних конструкцій, ґрунтів, що приймається за табл. 4.4.

Таблиця 4.3 — Щільність найбільш використовуваних будівельних матеріалів.

Матеріал	ρ , кг/м ³
Залізобетон:	
- монолітний	2400
- збірний	2500
Сталь	7850
Алюмінієві сплави	2700
Дерево	500
Цементно-пісочний розчин	2000...22000
Асфальтобетон:	
- пісочний	2000
- середньозернистий	2300
Утеплювачі:	
- з ніздрюватих бетонів (пінобетон, газобетон, піносілікат тощо)	400...600
- мінераловатні плити	300...500
- перлітові та вермікулітні плити на цементному в'язучому	300...500
- піноскло, газоскло	200...300
- шлаки гранульовані, пемза, керамзит	300...7000
- плити з пористих пластмас (пінопласт, сотопласт тощо)	20...150

Таблиця 4.4 — Коефіцієнт надійності за навантаженням від ваги будівельних конструкцій, ґрунтів та статичних навантажень від обладнання.

Конструкції	γ_m
металеві, у яких зусилля від власної ваги:	
- менші 50 %	1,05 (0,95)
- дорівнюють або перевищують 50 %	1,10 (0,90)
бетонні (з середньою густиною понад 1600 кг/м ³), залізобетонні, кам'яні, армокам'яні, дерев'яні	1,10 (0,90)
бетонні (з середньою густиною 1600 кг/м ³ і менше), ізоляційні, вирівнювальні та опоряджувальні шари	
(плити, матеріали у рулонах, засипки, стяжки тощо), виконані:	
- у заводських умовах	1,20 (0,90)
- на будівельному майданчику	1,30 (0,90)
Ґрунти:	
- у природному заляганні	1,10 (0,90)
- насипні	1,15 (0,90)

Щільність ρ найбільш уживаних будівельних матеріалів наводиться в табл. 4.3. Нормативне навантаження від ваги елементів покриттів і перекриттів визначається множенням щільності відповідного шару на його товщину.

Розрахункове тимчасове довготривале (корисне) навантаження на перекриття житлових та суспільних будівель визначається за формулою:

$$q = q^n \cdot \gamma_f,$$

де q^n та γ_f - відповідно корисне нормативне навантаження на перекриття та коефіцієнт надійності за навантаженням для нього.

Снігове навантаження на покриття залежить від кліматичного району будівництва та ухилу даху. Нормативне снігове навантаження на 1 м² покриття визначають за формулою:

$$s^n = s_0 \cdot \mu,$$

де s_0 - нормативна вага снігового покриву на 1 м² поверхні землі, який приймається за таблицею 4.5 в залежності від району будівництва;
 μ - коефіцієнт переходу від ваги снігу на землі до снігового навантаження на покритті, якій залежить від ухилу даху.

Таблиця 4.5 — Нормативні значення ваги снігового покриву на 1 м² поверхні землі.

Сніговий район	I	II	III	IV	V	VI
$S_0, \text{кН/м}^2$	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5

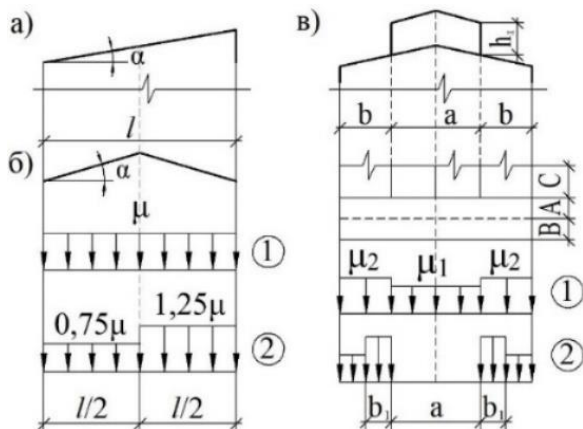


Рисунок 4.1 - Схема снігового навантаження:

а - для односхильної покрівлі; б - для двосхильної покрівлі; в - для будівель із ліхтарями.

При нахилі покрівлі $a \leq 25^\circ$ (рис. 4.1) $\mu = 1$, при $a \geq 60^\circ = 0$. Проміжні значення μ визначаються лінійною інтерполяцією.

Розрахункове значення снігового навантаження на 1 м^2 покриття визначають за формулою:

$$s = s^n \cdot \gamma_f = s_0 \cdot \mu \cdot \gamma_f,$$

де γ_f - коефіцієнт надійності для снігового навантаження, визначається за таблицею 4.6 в залежності від відношення q^n/s^n (q^n - нормативне навантаження від власної ваги покриття).

Таблиця 4.6 — Коефіцієнт γ_f для снігового навантаження

q^n/s^n	≥ 1	0,8	0,6	0,4
γ_f	1,4	1,5	1,55	1,6

Нормативне значення вітрового навантаження на 1 м^2 поверхні будівлі (рис. 4.2) визначається за формулою:

$$w^n = w_0^n \cdot c_e \cdot k,$$

де w_0^n - нормативне значення вітрового тиску на висоті до 5 м, приймається за таблицею 4.7 в залежності від району будівництва;
 c_e - аеродинамічний коефіцієнт, який дорівнює: для активного вітру $c_e = 0,8$; для пасивного тиску значення c_e приймається за таблицею 4.8;

k - коефіцієнт, який враховує зміну вітрового напору за висотою, приймається за таблицею 4.9.

Таблиця 4.7 — Нормативні значення вітрового тиску на 1 м^2 поверхні будівлі.

Вітровий район	I,a	I	II	III	IV	V	VI	VII
$w_0^n, \text{кН/м}^2$	0,17	0,23	0,3	0,38	0,48	0,6	0,73	0,85

Таблиця 4.8 — Значення аеродинамічного коефіцієнта c_e .

b/l	h/l		
	$\leq 0,5$	1	≥ 2
≤ 1	-0,4	-0,5	-0,6
-0,5	-0,5	-0,6	-0,6

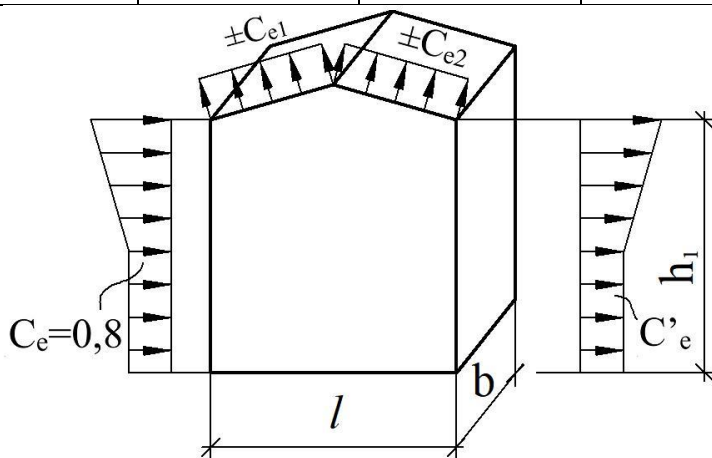


Рисунок 4.2 - Схема вітрового навантаження на поверхню будівлі.

Значення коефіцієнта k до, що враховує збільшення вітрового натиску на висоті, залежить від типу місцевості. Розрізняють три типи території:

- А - відкриті узбережжя морів, озер, степу, лісостепу, тундра;
- Б - міські території із забудовою висотою понад 10м;
- В - міської території із забудовою висотою понад 25м.

Значення коефіцієнта k приймають по табл. 4.9.

Таблиця 4.9 — Значення коефіцієнта k .

Тип місцевості	Висота над поверхнею землі, м						
	5	10	20	40	60	80	100
А	0,75	1,0	1,25	1,5	1,7	1,85	2,0
В	0,5	0,65	0,85	1,1	1,3	1,45	1,6
С	0,4	0,4	0,56	0,8	1,0	1,15	1,25

Розрахункове значення вітрового навантаження на 1 м^2 поверхні будівлі визначається за формулою:

$$w = w^n \cdot \gamma_f,$$

де $\gamma_f = 1,4$ - коефіцієнт надійності за навантаженням.

Багатоповерхові будівлі висотою більше 40м, одноповерхові виробничі будівлі висотою більше 36м при відношенні $H/L > 1,5$ (H - висота, L - проліт будівлі) і висотні споруди типу щогл, веж, опор ЛЕП розраховують на вітер з урахуванням динамічної складової вітряного навантаження - пульсацій вітряного напору.

Будівлі та споруди розраховують на поєднання різних навантажень. Зазвичай враховують два основних та одне особливе поєднання навантажень.

Перше основне поєднання включає в себе постійне навантаження, тимчасову тривалу і одну короткочасну з коефіцієнтом поєднання $n_c = 1$.

Друге основне поєднання включає в себе постійне навантаження, тимчасову тривалу і всі короткочасні (довантажують) з коефіцієнтом поєднання $n_c = 0,9$.

Особливе поєднання включає в себе постійне навантаження з коефіцієнтом поєднання $n_c = 0,9$, тимчасову тривалу з коефіцієнтом $n_c = 0,8$, короткочасні навантаження з коефіцієнтом поєднання $n_c = 0,5$ і одну особливу (наприклад, сейсмічну) з коефіцієнтом поєднання $n_c = 1$.

Контрольні запитання

1. Що таке граничні стани конструкцій і які їх основні групи?
2. У чому полягає різниця між граничними станами першої та другої груп?
3. Яка умова виражає розрахунок конструкції на міцність за методом граничних станів?
4. Як визначається розрахункове значення навантаження?
5. Що таке нормативне і розрахункове навантаження?
6. Як між собою пов'язані ці поняття?
7. Які коефіцієнти надійності використовуються у розрахунках та що вони враховують?
8. Як визначають несучу здатність елемента при розтягуванні та вигині?
9. Які є основні типи навантажень згідно з ДБН В.1.2-2:2006?

ЛЕКЦІЯ 5. ЗВАРНІ З'ЄДНАННЯ

5.1 Загальна характеристика основних видів зварювання. Вибір матеріалів для зварювання. Типи зварних швів та з'єднань

Зварюванням називається процес нероз'ємного з'єднання металевих конструкцій за допомогою теплового або механічного впливу.

В будівництві використовується переважно електродугове зварювання, засноване на явищі появи електричної дуги між сталевим стрижнем (електродом) та деталями що зварюються при підведенні їх до різних полюсів джерел струму (рис. 5.1).

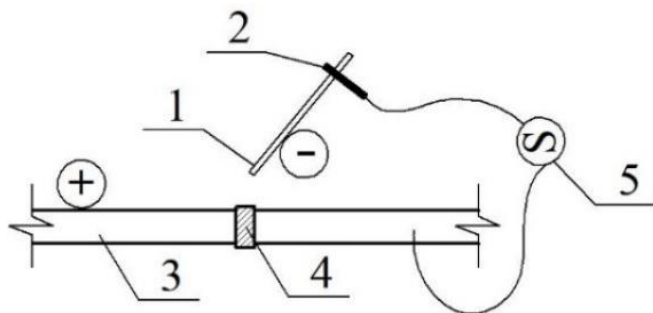


Рисунок 5.1 - Схема електродугового зварювання:

1 - електрод; 2 - електротримач; 3 - деталі що зварюються; 4 - зварний шов; 5 - джерело струму.

Класифікація видів електродугового зварювання представлена на рис. 5.2. Матеріали для зварювання в табл. 5.1.

Розплавлений метал зварного шву повинен бути захищеним від шкідливої дії кисню та азоту повітря. Тому ручне зварювання виконують електродами, які покриті спеціальними обмазками, які під час плавлення, створюють на шві захисний шар. Якщо зварювання виконують голим дротом, то для захисту використовують спеціальні флюси або захисні гази (для сталі вуглекислий газ). Іноді для зварювання використовують порошковий дріт.

У позначенні типів електродів для ручного зварювання число, що стоїть після букви *E*, являє собою тимчасове опір металу шва розриву (міцність шва на розрив) в кг/мм².



Рисунок 5.2 - Види електродугового зварювання.

Таблиця 5.1 — Матеріали для зварювання.

Матеріал	
Тип електроду	Марка дроту
Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А	Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ, ПП-АН6, ПП-АП3
Э60	Св-08Г2С*, Св-08Г2СЦ* Св-10НМА, Св-10Г2
Э70	Св-10ХГ2СМА, Св-08ХН2ГМЮ

Буква *A* після числа говорить про те, що метал зварних швів, отриманих цими електродами, має підвищену пластичність. Електроди з індексами *A* застосовуються в конструкціях групи 1, що працюють в особливо важких умовах, і в конструкціях групи 2 і 3, експлуатованих, в інтервалах температур $-40 > t > -65$. Підвищена пластичність швів забезпечує опірність конструкції крихкому руйнуванню.

За конструктивною ознакою зварні шви діляться на стикові та куткові (рис. 5.3.а).

За місцем накладання розрізняють шви заводські та монтажні (рис. 5.3.б).

По протяжності шви бувають суцільні та уривчасті шпонкові (рис. 5.3.в).

За становищем у просторі розрізняють шви нижні (палубні), верхні (стельові), горизонтальні (рис. 5.3.г). Часто варяться шви в човник (рис. 5.3.д).

Зварні з'єднання бувають:

- встик;
- внапуск;
- втавр (впритул).

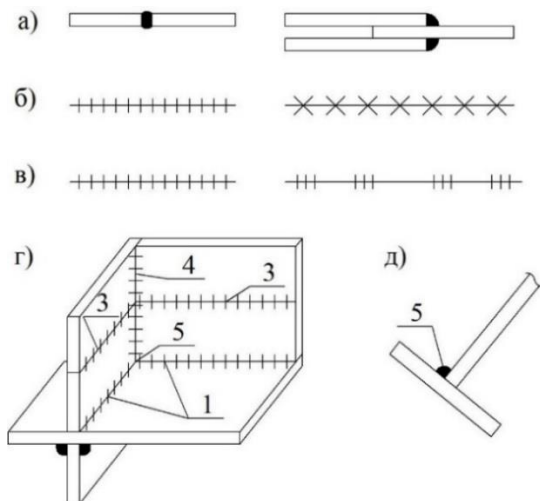


Рисунок 5.3 - Класифікація зварних швів:

а - за конструктивною ознакою; б - за місцем накладання; в - за протяжністю; г, д - за положенням у просторі; 1 - нижні (палубні); 2 - верхні (стельові); 3 - горизонтальні; 4 - вертикальні; 5 - в «човник».

З'єднання встик виконується стиковими швами. При товщині з'єднувальних елементів більше 10 мм необхідне розділення кромки. В залежності від форми кромки стикові шви бувають V, U, X та К-образні (рис. 5.4).

З'єднання встик може здійснюватися прямим швом (рис. 5.5. а) або косим швом (рис. 5.5. б).

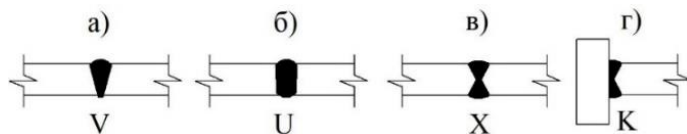


Рисунок 5.4 - Види фасок:

а - V-образна; б - U-образна; в - X-образна; г - К-образна.

З'єднання внапуск здійснюються кутовими лобовими швами (рис. 5.5. в) або фланговими (рис. 5.5. г). Застосовувати в одному з'єднанні лобові та флангові шви не рекомендується через сильну концентрацію напруг у кутовій зоні, де ці шви з'єднуються. У з'єднаннях внапуск часто застосовують накладки зі скошеними кутами (рис. 5.5. д).

З'єднання в тавр також здійснюють кутовими швами (рис 5.5. е).

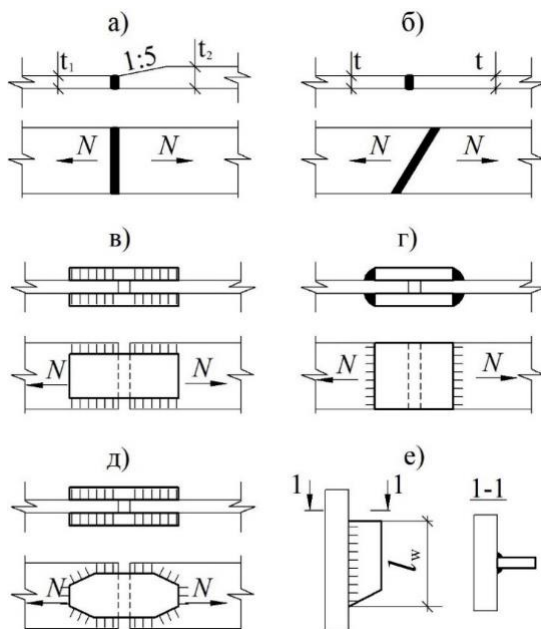


Рисунок 5.5 - Види з'єднань:

а - стикове прямим швом; б - стикове косим швом; в - внапуск фланговими швами; г - внапуск лобовими швами; д - внапуск з комбінованими швами; е - втавр.

5.2 Розрахунок з'єднань встик на різні види силових впливів. Розрахунковий опір стикових швів

З'єднання встик є найпростішим та надійним способом з'єднання металевих конструкцій.

Розрахунок стикових швів на дію осьових розтягувальних або стискаючих сил N (рис. 5.6.а) виконується за формулою:

$$\sigma_w = \frac{N}{t_w \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c,$$

де $t_w = t_{min}$ - товщина шву, яка дорівнює найменшій товщині деталей що з'єднуються;

l_w - довжина шву:

$l_w = b$ - при виводі кінців шву за межі стику;

$l_w = b - 2 t_w$ - при зварюванні без виводу кінців шва;

R_{wy} - розрахунковий опір стикового шва.

В швах, які працюють на стиснення, розрахунковий опір шву дорівнює розрахунковому опору $R_{wy} = R_y$. У швах, які працюють на розтягнення, $R_{wy} = R_y$ тільки при наявності фізичних методів контролю якості шва (ультразвук, рентген, γ - проміні). При візуальному контролі $R_{wy} = 0,85R_y$.

При дії згинального моменту M (рис. 5.6., а) міцність зварного шву перевіряється за формулою:

$$\sigma_w = \frac{M}{W_w} = \frac{6M}{t_w \cdot l_w^2} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c,$$

де $W_w = t_w \cdot l_w^2/6$ - момент опору зварного шву;

R_{wy} - розрахунковий опір шву при згинанні, $R_{wy} = R_y$ при фізичному контролі шва, при візуальному контролі якості $R_{wy} = 0,85R_y$.

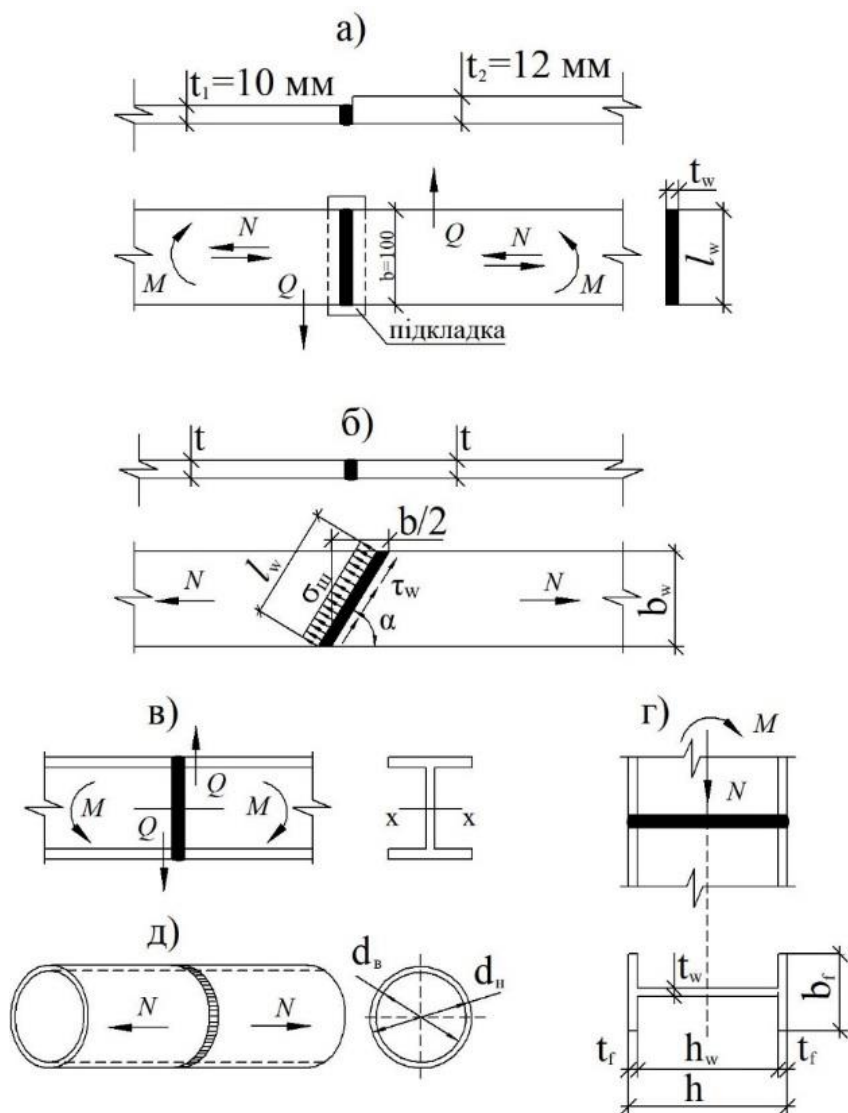


Рисунок 5.6 - З'єднання встик.

При дії поперечної сили Q (рис. 5.6.а) перевірку міцності шву виконують за формулою:

$$\sigma_w = \frac{Q \cdot S_w}{I_w \cdot t_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c,$$

де S_w - статичний момент половини повздовжнього перерізу шва відносно нейтральної вісі;

I_w - момент інерції перерізу шва;

R_{ws} - розрахунковий опір шва зрізу, що приймається рівним розрахунковому опору сталі на зріз, тобто $R_{ws} = R_s = 0,85R_s$.

$$S_w = \frac{t_w \cdot l_w^2}{8}, \quad I_w = \frac{t_w \cdot l_w^2}{12}.$$

Враховуючи, що для прямокутного перерізу шва умова міцності зварного шва при роботі на зріз можна записати у вигляді:

$$\tau_w = \frac{3}{2} \frac{Q}{t_w \cdot l_w} \leq R_{ws} \cdot \gamma_c.$$

При одночасній дії в зварному шві осьового зусилля N і згинаючого моменту M (рис. 5.6. а) нормальні напруження від обох чинників підсумовується з урахуванням їх знаків:

$$\sigma_w = \pm \frac{N}{t_w \cdot l_w} \pm \frac{6M}{t_w \cdot l_w^2} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c.$$

При одночасній дії згинаючого моменту M та поперечної сили Q (рис. 5.6. а) окрім перевірок за формулами необхідна додаткова перевірка на одночасну дію нормальних та дотичних напружень:

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\sigma_w^2 + 3\tau_{w,cp}^2} \leq 1,15R_{wy} \cdot \gamma_c; \quad \tau_{w,cp} = \frac{Q}{t_w \cdot l_w}.$$

де σ_w - нормальні напруження від дій моменту M ;

$\tau_{w,cp}$ - середнє значення дотичних напружень.

Для збільшення несучої спроможності шва використовують з'єднання встик косим швом (рис.5.6, б). Перевірку міцності шва в цьому випадку виконують за формулою:

$$\sigma_w = \frac{N \sin \alpha}{t_w \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c; \quad \tau_w = \frac{N \cos \alpha}{t_w \cdot l_w} \leq R_{ws} \cdot \gamma_c,$$

де l_w - розрахункова довжина косоного шва;

$l_w = (b/\sin \alpha) - 2t_w$ - при зварюванні без виводу кінців шва за межі стику;

$l_w = b/\sin \alpha$ - при зварюванні з виводом кінців шва.

На практиці косий стик часто влаштовують із закладенням 2:1 (рис. 5.6. б), що відповідає $\alpha = 63^\circ 26'$.

При з'єднанні встик листів різної товщини (або ширини) необхідно, щоб розміри листів у зоні стику щоб уникнути різкої зміни перерізу були однакові. Для цього в товстшому (або широкому) листі влаштовують скоси з ухилом не більше 1:5 (рис 5.5.а). Стики без скосів за товщиною допустимі за різниці товщин $t_2 - t_1$ не більше 4мм і не більше 1/8 товщини найтоншого листа. Розрахункові опори зварних швів R_{wy} приймають з розрахункового опору сталі R_y найбільш товстого елемента. Для найпоширеніших марок стали значення R_y наведено у табл. 5.3.

Наведені формули призначені для перевірки міцності зварних стиків швів. З умов міцності можливо знайти необхідні параметри шва (довжину l_w або товщину t_w) або визначити несучу спроможність з'єднання. Так, з умов міцності легко визначити:

- довжину шва:

$$l_w = \frac{N}{t_w \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c};$$

- товщину шва:

$$t_w = \frac{N}{l_w \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c};$$

- несучу спроможність шва:

$$N = t_w \cdot l_w \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c.$$

Якщо встик з'єднуються не листи, а вироби з прокату (двутаври, труби, тощо), то геометричні характеристики зварного шва (A_w , W_w , I_w , S_w) можна взяти з сортаменту прокату, припускаючи, що переріз зварних швів еквівалентно перерізу профіля. Так для балки, яка наведена на рис. 5.6. в, яка виконана з прокатного двутавра, умова міцності зварного шва на згинання та зріз будуть мати вигляд:

$$\sigma_w = \frac{M}{W_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c; \quad \tau_w = \frac{Q \cdot S_w}{I_w \cdot t_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c,$$

де $W_w = W_x$, $S_w = S_x$, $I_w = I_x$, $t_w = d$ - параметри вказаного прокату, який приймається за сортаментом.

Для труби, яка представлена на рис. 5.6. д, умова міцності зварного шва при роботі на розтягнення матиме вид:

$$\sigma_w = \frac{N}{A_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c,$$

де $A_w = \pi(d_3^2 - d_6^2)/4$ - площа зварного шва, дорівнює площі труб (d_3 та d_6 - відповідно зовнішній та внутрішній діаметр).

Умова міцності стикового шва колони з складового двутавра при роботі її на стиск та згинання (рис. 5.6.г) матиме вигляд:

$$\sigma_w = \frac{N}{A_w} + \frac{M}{W_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c,$$

де R_{wy} - розрахунковий опір зварного шва вигину.

Для складового двутавру (рис. 5.6. г) геометричні характеристики зварного шва визначають за розмірами поперечного перерізу:

$$A_w = t_w \cdot h_w + 2b_f \cdot t_f;$$

$$I_w = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} + 2 \frac{b_f^3 \cdot t_f}{12} + 2b_f \cdot t_f \left(\frac{I_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right)^2;$$

$$W_w = 2l_w/h.$$

5.3 Розрахунок з'єднань внапуск. Розрахункові перерізи швів. Розрахункові опори кутових швів. Конструктивні вимоги до з'єднань на кутових швах.

З'єднання внапуск здійснюються фланговими (рис. 5.8. а), лобовими (5.8. б) та комбінованими (5.8. в) кутовими швами.

У з'єднаннях внапуск передача зусилля з одного елемента на інший відбувається нерівномірно як за довжиною шва, так і поперечним перерізом. Тому розрахунок кутових швів незалежно від їх розташування носить характер умовний і походить з можливості зрізу швів по двох площинах (рис. 5.7): по металу шва (по бісектрисі кута розплавлення) переріз $f-f$ і по металу границі сплаву переріз $z-z$.

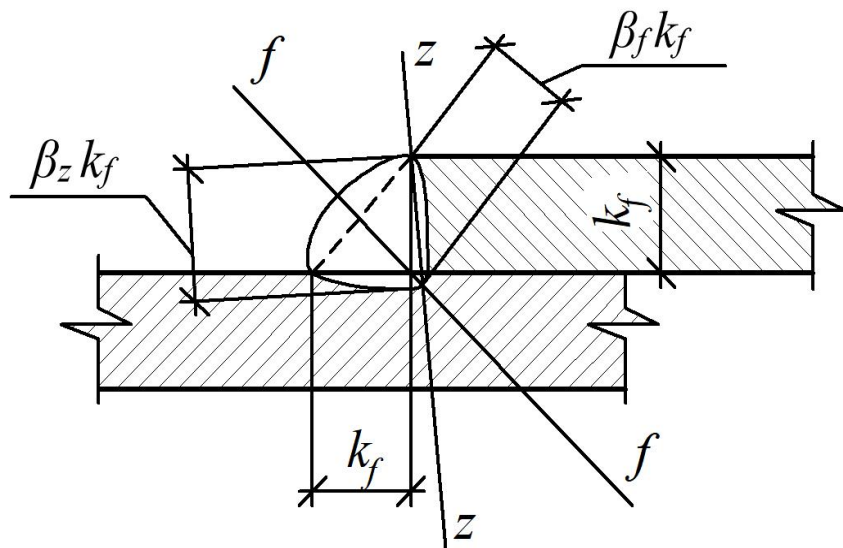


Рисунок 5.7 - Розрахункові перетини кутових швів:
($f-f$)- перетин по металу шва; ($z-z$) - перетин по металу межі
сплавлення.

При дії повздовжньої (або поперечної) сили перевірку міцності кутових швів з'єднань внапуск, які виконані лобовим, фланговим або комбінованими швами (рис. 5.8, а, б, в), виконують за формулою:

- зріз по металу шва (переріз $f-f$):

$$\tau_{wf} = \frac{N}{\beta_f k_f \Sigma l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c,$$

- зріз по металу межі сплаву (переріз $z-z$):

$$\tau_{wf} = \frac{N}{\beta_z k_f \Sigma l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c,$$

де k_f - катет кутового шва;

β_f та β_z - коефіцієнти глибини проварювання, приймаються за таблицею 5.2 в залежності від виду зварювання та положення шва (для ручного зварювання завжди $\beta_f = 0,7$ та $\beta_z = 1$);

Σl_w - розрахункова сума довжини кутових швів, розташованих по один бік від стику, при цьому довжина окремих швів приймається менше їх повної довжини на 10 мм (за рахунок непроварення на кінцях шва). Так для з'єднань внапуск, які представлені на рис. 5.7 сумарні довжини швів дорівнюють:

- рис. 5.7, а - $l_w = 4(a - 2 \cdot 10 \text{ мм})$;

- рис. 5.7, б - $l_w = 2(b - 2 \cdot 10 \text{ мм})$;

- рис. 5.7, в - $l_w = 2(2a + 2c + b - 2 \cdot 10 \text{ мм})$.

У формулі R_{wf} - розрахунковий опір металу шва, який визначається за формулою:

$$R_{wf} = 0,55 R_{wun} / \gamma_{un}$$

де R_{wun} - нормативний опір металу шва, приймається за таблицею 5.3;

γ_{un} - коефіцієнт надійності за матеріалом, приймається:

$\gamma_{un} = 1,25$ - якщо $R_{wun} \leq 490$ МПа;

$\gamma_{un} = 1,35$ - якщо $R_{wun} \geq 490$ МПа.

Таблиця 5.2 — Значення коефіцієнтів β_f та β_z .

Вид зварювання при діаметрі зварювального дроту d , мм	Положення шва	Коефіцієнт	Значення β_f та β_z при катетах швів, мм			
			3-8	9-12	14-16	>18
Автоматичне при $d = 3-5$	В човник	β_f	1,1	1,1	1,1	0,7
		β_z	1,15	1,15	1,15	1
	Нижнє	β_f	1,1	0,9	0,9	0,7
		β_z	1,15	1,05	1,05	1
Автоматичне та напівавтоматичне при $d = 1,4-2$	В човник	β_f	0,9	0,9	0,8	0,7
		β_z	1,05	1,05	1	1
	Нижнє	β_f	0,9	0,8	0,7	0,7
		β_z	1,05	1	1	1
Ручне: напівавтоматичне дротом суцільного перерізу при $d < 1,4$ або порошковим дротом	В човник, нижнє, горизонтальне, вертикальне, стельове	β_f	0,7	0,7	0,7	0,7
		β_z	1	1	1	1

Значення R_{wf} не обов'язково розраховувати, готові значення розрахункового опору в залежності від типу електрода та марки зварного дроту наведені у таблиці 5.3.

R_{wz} - розрахунковий опір металу межі сплавлення, визначається за формулою:

$$R_{wz} = 0,45R_{un},$$

де R_{un} - нормативний опір основного металу за межею міцності; для найпоширеніших марок сталі значення R_{un} наведені у табл. 4.3.

Коефіцієнти γ_{wf} та γ_{wz} враховують умови роботи зварних швів.

Для конструкцій, що експлуатуються в кліматичних районах з розрахунковою температурою вище -40°C , $\gamma_{wf} = 1$ та $\gamma_{wz} = 1$. Якщо розрахункова температура нижче -40°C , коефіцієнт умови роботи мають значення:

- $\gamma_{wz} = 0,85$ всім сталей;
- $\gamma_{wz} = 0,85$ для металу швів з $R_{wun} = 410$ МПа;
- $\gamma_{wz} = 1$ для металу швів з $R_{wun} > 410$ МПа.

Таблиця 5.3 — Нормативні та розрахункові опори металу швів з'єднань з кутовими швами

Зварювальні матеріали		R_{wun}	R_{wf}
Тип електроду	Марка дроту	МПа	
Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А	СВ-08, СВ-08А,	410	180
	СВ-08ГА,	450	200
	СВ-10ГА, СВ-08Г2С, СВ-08Г2СЦ, ПП-АН6, ПП-АПЗ	490	215
Э60	СВ-08Г2С*, СВ-08Г2СЦ* СВ-10НМА, СВ-10Г2	590	240
Э70	СВ-10ХГ2СМА, СВ-08ХН2ГМЮ	685	280
*Застосовувати для швів з катетом $k_f \leq 8$ мм в конструкціях зі сталі з $R_{un} \geq 440$ МПа.			

При розрахунку з'єднань на кутових швах необов'язково двічі виконувати перевірки. Достатньо виконати розрахунок по небезпечній площині, для визначення якої необхідно порівняти твори $R_{wf}\beta_f$ і $R_{wz}\beta_z$. Якщо $R_{wf}\beta_f < R_{wz}\beta_z$, то небезпечною є площина $f-f$. Якщо $R_{wf}\beta_f > R_{wz}\beta_z$, зварні шви слід розраховувати за іншою формулою по площині $z-z$.

При конструюванні з'єднань із застосуванням кутових швів необхідно враховувати наступні конструктивні вимоги:

- катети кутових швів слід приймати за розрахунком, але не менше мінімальних значень, наведених у табл. 5.4, і не більше максимальних значень, вказаних на рис. 5.9:

якщо шов накладається на більш тонкий елемент, то $k_f^{max} = 1,2t_{min}$ (рис. 5.9. а), якщо шов накладається на більш товстий елемент, то катет шва не повинен перебільшувати товщину верхнього листа, тобто $k_f^{max} = t_{min}$ (рис. 5.9.б), якщо до листа приварюється прокатний куточок або швелер, то катет шва у обухка $k_f^{max}_{об} = 1,2t_{min}$, а катет шва у пера

рекомендується приймати на 2мм менше товщини полиці кута t_{yr} , тобто $k_f^{max}_{об} = t_{yr} - 2\text{мм}$ (рис. 5.9.в);

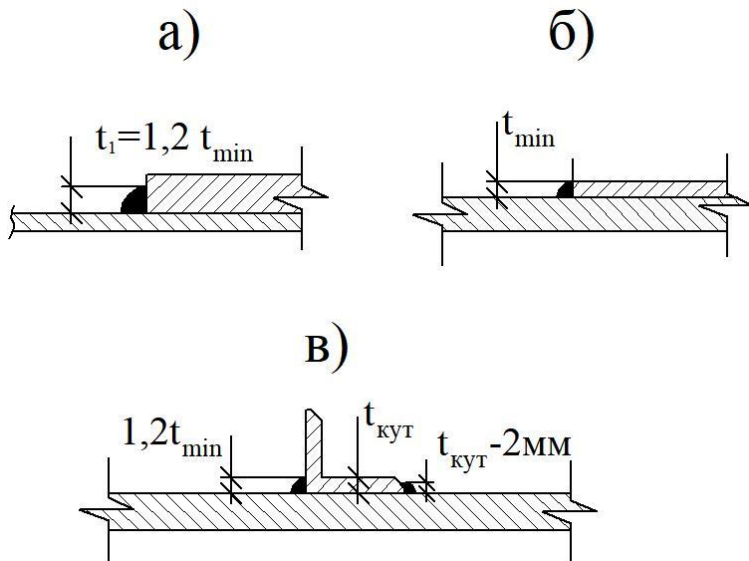


Рисунок 5.9 - Максимальні катети швів.

- розрахункові довжини кутових швів слід приймати за розрахунком, але не менше $4\mathfrak{R}$ і 40мм; розрахункові довжини флангових швів повинні бути не більше ніж $\beta_f \cdot \mathfrak{R}_f$ крім швів, у яких зусилля діє протягом шва;

- розмір впауски повинен бути не менше $5t$, де t товщина тоншого елемента. З формул перевірки міцності кутових швів можна знайти необхідні параметри швів - катет k_f або довжину швів з'єднання. Якщо $R_{wf}\beta_f > R_{wz}\beta_z$, то з умови міцності по металу шва можна визначити катет шва:

$$k_f = \frac{N}{\beta_f \cdot \Sigma l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c'}$$

а потім з умов $k_f = t_H$ - товщину накладки.

За визначеним значенням катета шва k_f з умов міцності можна знайти необхідну довжину швів:

$$\Sigma l_w = \frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c},$$

а потім використовуючи співвідношення $\Sigma l_w = 4(a-2 \cdot 10)$, знайти необхідну довжину накладок (рис. 5.7. а) $l_H = 2a + 20\text{мм} = 2(l_w + 80)/4 + 20\text{мм}$, або використовує співвідношення $\Sigma l_w = 2(b-2 \cdot 10)$, знайти необхідну ширину накладок (рис. 5.7.6) $b = (\Sigma l_w + 40)/2$.

З умови міцності можна визначити несучу здатність з'єднання:

$$N = \beta_f \cdot \mathfrak{R}_f \cdot \Sigma l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c.$$

Зварні шви, що з'єднують куточки з листом (рис 5.7. д) навантажені нерівномірно: два шви у обушка сприймають зусилля $N^{o\sigma} = a \cdot N$, два шва у пера - зусилля $N^n = (1-a) \cdot N$ - зусилля в з'єднанні, a - коефіцієнт, що показує яка частина загального зусилля; він залежить від типу куточків і від того який полицю (більшою чи меншою) приварюються вони до листів. Перевірку міцності зварних швів виконують за формулами (небезпечна площина $f-f$):

$$\tau_{wf}^{o\sigma} = \frac{\alpha N}{2\beta_f \cdot k_f^{o\sigma} \cdot l_w^{o\sigma}} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c,$$

$$\tau_{wf}^n = \frac{(1-\alpha)N}{2\beta_f \cdot k_f^n \cdot l_w^n} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c.$$

Таблиця 5.4 - Мінімальні катети швів.

Вид з'єднання	Вид зварювання	Межа плинності σ_m , МПа	Максимальні катети k_f , мм, при товщині більш товстого з елементів, що зварюються, мм						
			4-5	6-10	11-16	17-22	23-32	33-40	41-80
Таврове з двосторонніми кутовими швами, внапуск та кутове	Ручне	<430	4	5	6	7	8	9	10
		>430	5	6	7	8	9	10	12
	Автоматичне та напівавтоматичне	<430	3	4	5	6	7	8	9
		>430	4	5	6	7	8	9	10
Таврове з односторонніми кутовими швами	Ручне	<430	5	6	7	8	9	10	12
	Автоматичне та напівавтоматичне	>430	4	5	6	7	8	9	10

З умов міцності можна визначити катети швів біля обушка та пера:

$$k_f^{об} = \frac{\alpha N}{2\beta_f \cdot l_w^{об} \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c},$$

$$k_f^n = \frac{(1 - \alpha)N}{2\beta_f \cdot l_w^n \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c},$$

або відповідні довжини швів:

$$l_f^{об} = \frac{\alpha N}{2\beta_f \cdot l_w^{об} \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c},$$

$$l_f^n = \frac{(1 - \alpha)N}{2\beta_f \cdot l_w^n \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c}.$$

Зварні шви, які з'єднують планки з гілками колони (рис. 5.7. г), розраховуються на одночасну дію сили Q та моменту M . Якщо у з'єднанні небезпечною є площа $f-f$, то перевірку міцності за металом шва виконують за формулами:

$$\tau_{wf} = \sqrt{(\tau_{wf}^Q)^2 + (\tau_{wf}^M)^2} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c,$$

де

$$\tau_{wf}^Q = \frac{Q}{\beta_f \cdot \mathfrak{R}_f \cdot l_w};$$

$$\tau_{wf}^M = \frac{6M}{\beta_f \cdot \mathfrak{R}_f \cdot l_w^2}.$$

5.4 Розрахунок з'єднань втавр

З'єднання втавр здійснюються кутовими швами. Розрахунок з'єднань втавр, також як і з'єднань внапуск, починають з визначення небезпечної площини, для чого порівнюють твори $R_{wf}\beta_f$ і $R_{wz}\beta_z$. Якщо $R_{wf}\beta_f < R_{wz}\beta_z$, то розрахунок слід вести по металу шва переріз $f - f$ (рис. 5.8); якщо $R_{wf}\beta_f > R_{wz}\beta_z$ небезпечним буде перетин $z - z$ і розрахунок треба буде вести по металу межі сплавлення.

Розрахунок найпростішого з'єднання втавр (рис. 5.10. а) при дії сили F виробляють за формулами:

- якщо небезпечний перетин проходить по металу шва:

$$\tau_{wf} = \frac{F}{2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c,$$

- якщо небезпечний переріз проходить по металу межі сплавлення:

$$\tau_{wz} = \frac{F}{2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c,$$

де $l_w = b - 2 \cdot 10$ мм - довжина шва.

При дії моменту M (рис. 5.10. б) відповідні формули матимуть вигляд:

$$\tau_{wf} = \frac{6M}{2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c,$$

$$\tau_{wz} = \frac{6M}{2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w^2} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c.$$

Якщо у з'єднанні сила F діє з ексцентриситетом e (рис. 5.10. в), то шви окрім зрізу від сили F будуть відчувати на собі деформацію згинання від дії моменту $M = F \cdot e$. Перевірку міцності перерізу $f - f$ виконують за формулами:

$$\tau_{wf}^{cym} = \sqrt{(\tau_{wf}^F)^2 + (\tau_{wf}^M)^2} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c,$$

де

$$\tau_{wf}^F = \frac{F}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w}; \quad \tau_{wf}^M = \frac{6M}{2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2} = \frac{3M}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2}.$$

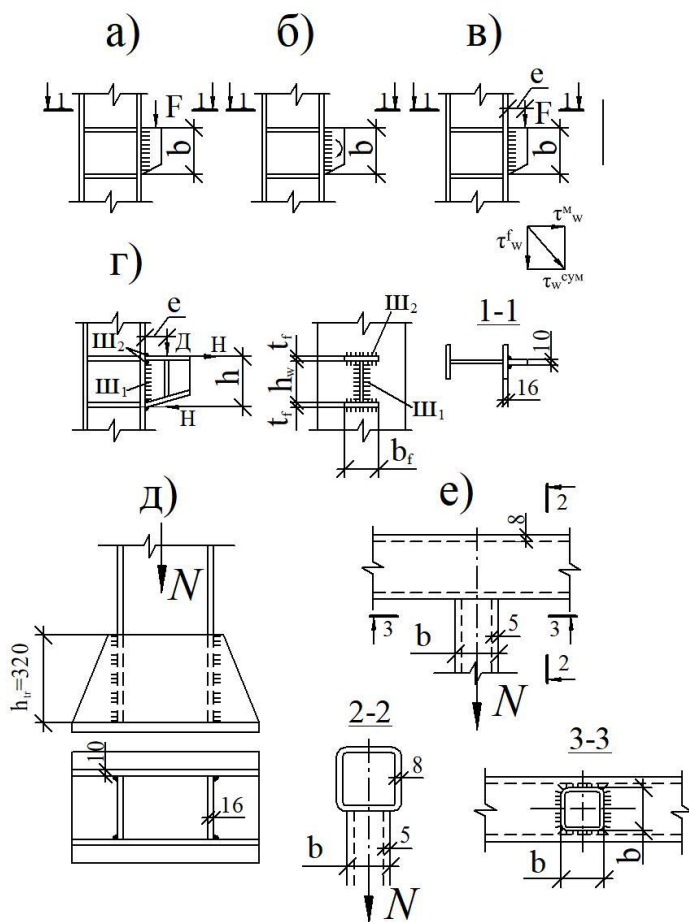


Рисунок 5.10 - З'єднання втавр.

На рис. 5.10. г представлена двутаврова консоль, яка приварюється до колони за допомогою швів Ш1 та Ш2. Вертикальні шви Ш1 сприймають силу зсуву F . Умова міцності швів Ш1 за перетином $f-f$:

$$\tau_{wf} = \frac{F}{2\beta_f \cdot k_f \cdot h_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c.$$

Сила D , що діє з ексцентриситетом e , дає момент $M = D \cdot l$. Розкладаючи момент але пару сил, отримаємо сили $H = M/h$, одна з яких (верхня) відкриває консоль від колони, друга (нижня) притискає консоль до колони. На силу H розраховують верхні зварні шви Ш2, умова міцності яких перерізом $f-f$ і має вигляд:

$$\tau_{wf} = \frac{H}{\beta_f \cdot k_f \cdot \Sigma l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c,$$

де $\Sigma l_w = 2b_f - t_w$.

На рис. 5.10. д представлена база суцільної колони, в якій траверси приварюються до стержня колони кутовими вертикальними швами, кількість яких $n = 4$.

Умова міцності швів по перетину $f-f$:

$$\tau_{wf} = \frac{N}{\beta_z \cdot k_f \cdot \Sigma l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c,$$

де $\Sigma l_w = n (h_{tr} - 10 \text{ мм}) = 4 (h_{tr} - 10 \text{ мм})$.

З умови міцності можна знайти висоту траверси:

$$\Sigma l_w = \frac{N}{\beta_z \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c}; \quad h_{tr} = \frac{\Sigma l_w}{4} + 10 \text{ мм.}$$

На рис. 5.10. встик з'єднуються між собою два елементи з гнутих зварних замкнених профілів. Вертикальний елемент, з'єднуючись з горизонтальним, обварюється по контуру. Умова міцності швів по перетину $f-f$:

$$\tau_w = \frac{N}{\beta_f \cdot \mathfrak{R}_f \cdot \Sigma l_w} \leq R_{wf} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c,$$

де $\Sigma l_w = 4b$.

З умови міцності можна знайти несучу спроможність з'єднань:

$$N = \beta_f \cdot \mathfrak{R}_f \cdot \Sigma l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c.$$

Або необхідний катет зварних швів:

$$k_f = \frac{N}{\beta_f \cdot \Sigma l_w \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c}.$$

Контрольні запитання

1. Що таке зварювання і які основні його види в будівництві?
2. Які основні типи зварних швів, їх класифікація?
3. У яких випадках застосовують прямі та косі стикові шви?
4. Яка формула використовується для перевірки міцності стикового шва при дії осьового навантаження?
5. Як змінюється розрахунковий опір шва при візуальному та фізичному контролі якості зварювання?
6. Як визначається момент опору зварного шва при дії згинального моменту?
7. Що таке небезпечна площа у кутових швах і як її визначити?
8. Які параметри впливають на розрахунок довжини шва?
9. Які конструктивні вимоги існують щодо мінімальних і максимальних катетів кутових швів?

ЛЕКЦІЯ 6. БОЛТОВІ ТА ЗАКЛЕПОЧНІ З'ЄДНАННЯ

6.1 Загальна характеристика болтових з'єднань. Види болтів. Загальна характеристика заклепочних з'єднань

Болтові з'єднання найчастіше використовують при монтажі металевих конструкцій. Для болтових з'єднань не потрібно використання спеціального обладнання та підведення енергії. При необхідності конструкції на болтах можуть бути збірно-розбірні. У порівнянні зі зварними з'єднаннями болтові відрізняються більшою металоємкістю так як мають стикові накладки. Отвори під болти послаблюють перетин елементів, що призводить до необхідності їх збільшення.

Для будівництва конструкцій використовують болти:

- грубої та нормальної точності;
- підвищеної точності;
- високоміцні;
- анкерні.

Болти грубої та нормальної точності вставляються в отвори, діаметр яких більше діаметра болта на 2...3 мм. Не щільна посадка болтів робить з'єднання деформованими та погіршує їх роботу на сприйняття зсуваючих сил. Такі болти рекомендується використовувати для фіксації положення елемента при роботі на розтягнення, а також при роботі на зсув в мало-відповідальних конструкціях, які виконані зі сталі з межею плинності 380 МПа.

Болти підвищеної точності вставляються в отвір, діаметр яких більше діаметра болта на 0,3 мм. Щільна посадка болта забезпечує малу деформацію з'єднання, що добре працює на зсув. При цьому необхідна обробка ненарізної частини болту (обточування); поверхня отвору також має бути гладкою, чого можна досягти шляхом свердління отворів у елементах що з'єднуються через спеціальні кондуктори - шаблони. Складність виготовлення болтів та їх постановка привели до того що болти підвищеної точності використовуються доволі не часто.

Болти грубої, нормальної та підвищеної точності виготовляються з вуглецевої сталі. В залежності від процесу виготовлення розрізняють декілька класів.

Такі болти ставляться в отвори, діаметр яких більше діаметра болта на 2...3 мм, але гайки затягуються спеціальним таріровним ключем, що дозволяє створювати і контролювати силу натягу. Болти щільно стягуються, утворюючи монолітне з'єднання, що добре працює на зсув. При дії зсувних сил між елементами, що з'єднуються, виникають сили тертя. Для збільшення сили тертя деталі, що з'єднуються, очищають від бруду, іржі металевими щітками, піскоструминним або дробоструминним апаратом, вогневим очищенням. Контроль натягу болта здійснюють по куту повороту ключа з або за закручуванням M .

Анкерні або фундаментні болти застосовуються для кріплення баз металевих колон до фундаментів (рис. 6.1. б. в).

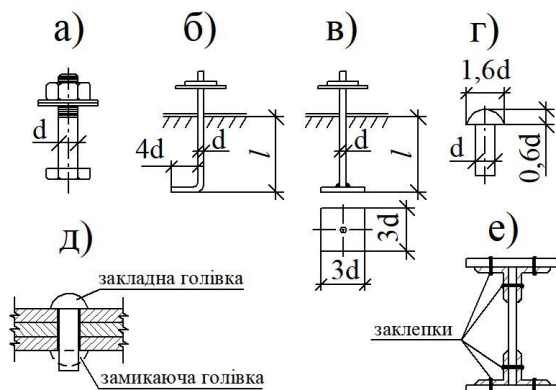


Рисунок 6.1 - Болтові та заклепочні з'єднання:

- а - болт з шайбою та гайкою; б - анкерний болт $d = 20 \dots 36$ мм; в - анкерний болт $d = 42 \dots 80$ мм; г - заклепка; д - постановка заклепки; е - перетин клепаної балки.

Заклепувальні з'єднання були в минулому основним видом з'єднання металоконструкцій. Через незручності технологічного процесу клепки та перевитрати матеріалів на з'єднання клепаї конструкції майже повністю витіснені звареними. На рис. 6.1.е представлено переріз клепаї балки.

Клепку ведуть гарячим та холодним способами. При гарячій клепці розігріту до яскраво-червоного гартування (800°C) заклепку

(рис. 6.4.г) вставляють в отвір і ударом пневматичного молотка утворюють замикаючу головку (рис. 6.1.д). При ударі заклепка осідає, щільно заповнюючи отвір.

При холодному клепанні головку утворюють клепальною скобою.

Розрахунок заклепочних з'єднань аналогічний розрахунку звичайних болтів.

6.2 Робота та розрахунок болтових з'єднань на зсув. Робота і розрахунок болтових з'єднань на розтягування.

Робота на зсув є основним видом роботи болтових з'єднань. Розрахунок на зсув містить в собі розрахунок болтів на зріз і розрахунок на змінання матеріалу елементів, які з'єднуються болтами.

Деякі види болтових з'єднань, які працюють на зсув, показані на рис. 6.2.

Перевірку міцності на зріз болтів грубої, нормальної або підвищеної точності виконують за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{n \cdot n_s \frac{\pi d^2}{4}} \leq R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c,$$

де n - кількість болтів у з'єднанні по один бік від стику;

n_s - кількість зрізів одного болта;

d - діаметр болта;

R_{bs} - розрахунковий опір болтового з'єднання зрізу, яке приймається за таблицею 6.1. в залежності від класу міцності болтів;

γ_b - коефіцієнт умов роботи болтового з'єднання, приймається за таблицею 6.2.

В пакеті з двох елементів, що з'єднуються (рис. 6.2. а) кількість зрізів $n_s = 1$; якщо болтами з'єднуються три елементи $n_s = 2$.

Таблиця 6.1 — Розрахунковий опір зрізу та розтягу для одноболтових з'єднань.

Напружений стан	Умовне позначення	Розрахунковий опір, МПа, болтів класів					
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	8.8
Зріз	R_{bs}	150	160	190	200	230	320
Розтяг	R_{bt}	175	160	210	200	250	400

Таблиця 6.2 — Коефіцієнт умов роботи з'єднань на болтах

Характеристика з'єднань	Коефіцієнт умов роботи γ_6
Багатоболтове при розрахунках на зріз та зминання при болтах точності:	
- підвищеної	1,0
- грубої та нормальної	0,9

Перевірку міцності на зминання елементів, які з'єднуються болтами, виконують за формулою:

$$\tau_{bp} = \frac{N}{n \cdot d \Sigma t_{min}} \leq R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c,$$

де d - діаметр болта;

Σt_{min} - найменша сумарна товщина листів, що зминається в одному напрямку; якщо в одному пакеті з'єднуються два елементи (рис. 6.2.а), то $\Sigma t_{min} = t_{min} = 8$ мм, якщо з'єднуються три елементи (рис. 6.2.б), то товщина листів, які працюють в одному напрямку, підсумовується і в якості Σt_{min} приймається найменше значення, яке дорівнює 16 мм;

R_{bp} - розрахунковий опір болтового з'єднання зминання, приймається за таблицю 6.3 в залежності від тимчасового опору R_{tm} сталі з'єднуваних елементів. Значення R_{tm} в залежності від марки сталі.

В болтовому з'єднанні двох куточків з фасонкою (рис. 6.2. в) для визначення Σt_{min} порівнюють товщину фасонки t_1 та суму товщин полок двох куточків; в якості остаточного значення приймають найменше з них.

В болтовому з'єднанні двох балок в одному рівні (рис. 6.2. г) в якості Σt_{min} приймають найменше значення з двох товщин: товщини t_1 ребра балки та товщини t_2 стінки двотаврової балки, що примикає, яка, в свою чергу, приймається за сортаментом в залежності від номера двотавра (по сортаменту $t_2 = d$).

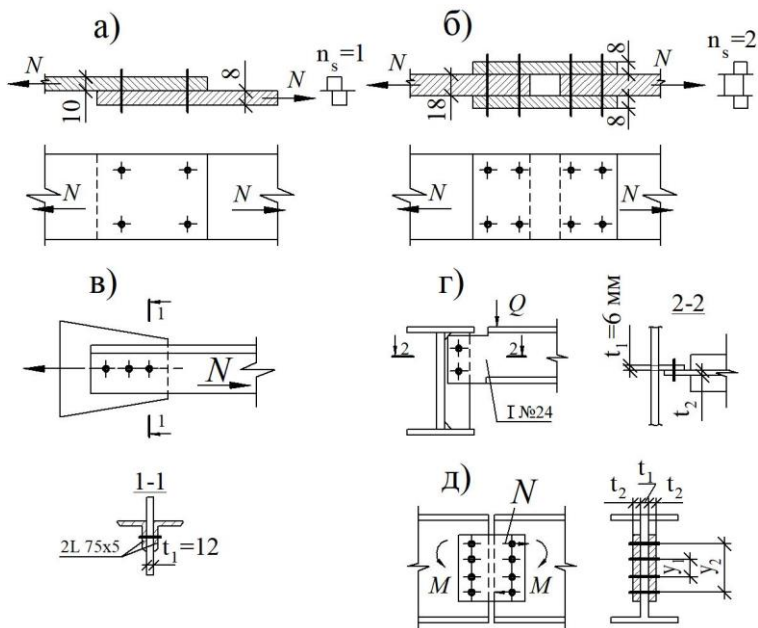


Рисунок 6.2 - Болтові з'єднання, що працюють на зсув.

В сполученні двох балок (рис. 6.2. д) болтове з'єднання сприймає згинальний момент M . Найбільше зусилля N від моменту виникає в болтах, що найвіддаленіші від центру болтового поля. Максимальне зусилля, що доводиться на один болт, визначається за формулою:

$$N = M \frac{y_2}{y_1^2 + y_2^2}$$

де y_1 та y_2 - відстань між симетричними рядами болтів.

Таблиця 6.3 — Розрахунковий опір зминанню елементів, що з'єднуються болтами.

Тимчасовий опір сталі з'єднувальних елементів, R_{tn} , МПа	Розрахунковий опір, МПа, зминанню елементів, що з'єднуються болтами точності	
	підвищеної	нормальної та грубої
345	365	335
355	385	350
365	400	365
370	410	370
380	430	385
390	445	400
400	465	415
410	485	435
420	500	450
430	520	462
440	540	485
450	560	500
460	580	520
470	600	535
480	620	555
490	640	570
500	665	590
510	685	610
520	705	630
530	730	645

Перевірку міцності найвіддаленішого болта виконують за формулою (6.1) і (6.2) при $n = 1$. Болтове з'єднання двоохрізне ($n_s = 2$); в якості Σt_{min} приймають товщину стінки двотавра t_1 або сумарну товщину двох накладок $2t_2$ (те, що менше).

Формули нижче призначені для перевірки міцності болтових з'єднань, з умови міцності визначити необхідний діаметр болтів:

- з умови міцності на зріз:

$$d = \sqrt{N/n \cdot n_s \cdot R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c},$$

- з умови міцності на зминання:

$$d = \frac{N}{n} \cdot \Sigma t_{min} \cdot R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c.$$

Остаточний діаметр приймають за більшим з найдених значень.

З умов міцності можна визначити необхідну кількість болтів в з'єднанні:

$$n = \frac{4N}{n_s \cdot \pi d^2 \cdot R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c};$$

$$n = \frac{N}{d \cdot \Sigma t_{min} \cdot R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c}.$$

Остаточну кількість болтів приймають за найбільшим з найдених значень.

З умов міцності можна визначити несучу здатність з'єднання:

- при роботі на зріз:

$$N = n \cdot n_s \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c;$$

- при роботі на зминання:

$$N = n \cdot d \cdot \Sigma t_{min} \cdot R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c.$$

Остаточну несучу здатність з'єднання призначають, виходячи з найменшого значення N .

Окрім роботи на зсув для болтів характерна робота на розтягнення (рис. 6.3). При розтягненні навантаження у з'єднанні завжди направлено паралельно осі болтів, руйнування яких може статися

шляхом відриву голівок. Болтові з'єднання, що працюють на розтягнення, називають фланцеві.

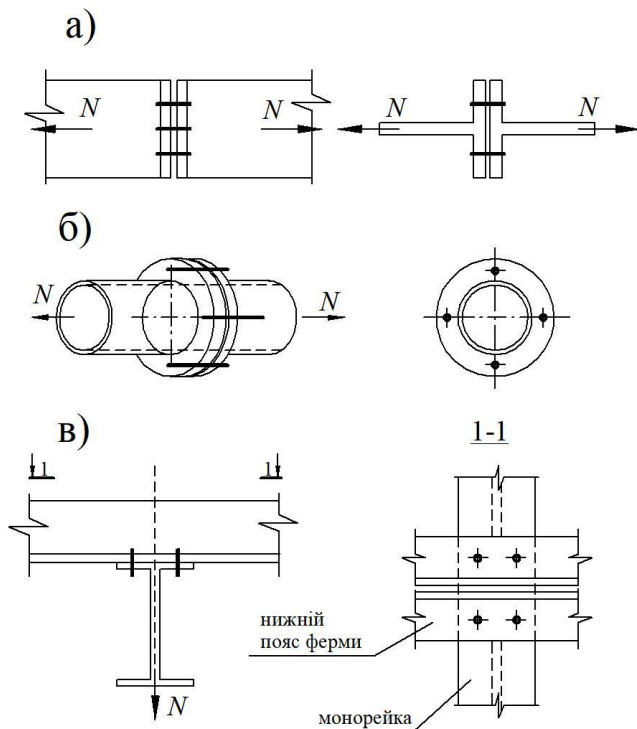


Рисунок 6.3 - Болтові з'єднання, що працюють на розтягнення.

Перевірку міцності болтового з'єднання на розтягнення виконують за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq R_{bt} \cdot \gamma_c,$$

де n - кількість болтів в з'єднанні

d - діаметр болта;

R_{bt} - розрахунковий опір болтового з'єднання розтягненню, яке приймається за таблицею 6.2 в залежності від класу міцності болта.

З умови міцності можна визначити кількість болтів в з'єднанні:

$$n = \frac{N}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot R_{bt} \cdot \gamma_c}$$

Потрібний діаметр болтів:

$$d = \sqrt{4N/n \cdot R_{bt} \cdot \gamma_c}$$

Несуча здатність з'єднання:

$$N = n \frac{\pi d^2}{4} \cdot R_{bt} \cdot \gamma_c$$

6.3 Розрахунок з'єднань на високоміцних болтах. Правила розміщення болтів, граничні габарити болтових полів

З'єднання на високоміцних болтах, що працюють на зсув, розраховуються з урахуванням сили тертя між поверхнями з'єднувальних елементів, яка виникає від натягнення високоміцних болтів. Несучу здатність одного високоміцного болта при роботі на зріз виконують за формулою:

$$Q_{bh} = R_{bh} \cdot A_{bn} \cdot \mu \cdot n_\mu \cdot \gamma_b / \gamma_h,$$

де R_{bh} - розрахунковий опір розтягуванню високоміцного болта, визначається за формулою;

A_{bn} - площа болта нетто, визначається за таблицею 6.4;

μ - коефіцієнт тертя, визначається за таблицею 6.5;

n_μ - кількість площин тертя;

γ_h - коефіцієнт надійності, визначається за таблицею 6.5;

γ_b - коефіцієнт умови роботи болтового з'єднання, який залежить від кількості болтів n , необхідних для сприйняття розрахункового зусилля, приймається рівним:

$\gamma_b = 0,8$ при $n < 5$;

$\gamma_e = 0,9$ при $5 < n < 10$;

$\gamma_e = 1$ при $n > 10$.

Розрахунковий опір розтягуванню високоміцного болта визначається за формулою:

$$R_{bh} = 0,7 \cdot R_{bun},$$

де R_{bun} – найменший тимчасовий опір болта розриву, що приймається в залежності від марки сталі болтів.

Затягування високоміцного болту виконують осьовим зусиллям:

$$P = R_{bh} \cdot A_{bh}.$$

У з'єднаннях, які працюють на зсув (рис. 6.4), кількість високоміцних болтів по один бік від стика (рис. 6.4. а) або всього (рис. 6.4. б) визначається за формулою:

$$n = \frac{N}{Q_{bh} \cdot \gamma_c}$$

де N – зсувна сила;

Q_{bh} – несуча здатність одного високоміцного болта.

Таблиця 6.4 — Болти грубої, нормальної, підвищеної точності, високоточні.

Діаметр, мм		Площа перерізу, см ²		Діаметр, мм		Площа перерізу, см ²	
болта	отвору	A_e (брутто)	A_{bh} (брутто)	болта	отвору	A_e (брутто)	A_{bh} (брутто)
16	19	2,01	1,57	27*	30	5,72	4,59
18*	21	2,54	1,92	30	33	7,06	5,60
20	23	3,14	2,45	36	39	10,17	8,26
22*	25	3,80	3,03	42	45	13,85	11,20
24	27	4,52	3,52	84	51	18,09	14,72

*Болти вказаних діаметрів застосовувати не рекомендується.

При спільній дії у з'єднанні сил Q і N спочатку знаходять результуючу зсувну силу:

$$S = \sqrt{Q^2 + N^2};$$

а потім необхідна кількість болтів у з'єднанні:

$$n = \frac{S}{Q_{bh}\gamma_c}.$$

З умови можна визначити несучу здатність з'єднання:

$$N = n \cdot Q_{bh} \cdot \gamma_c = n \cdot R_{bh} \cdot A_{bn} \cdot \mu n_\mu \cdot \gamma_b / \gamma_n,$$

або необхідну площу болтів, а потім за табл. 6.4 діаметр болтів:

$$A_{bn} = \frac{N \gamma_n}{n \cdot R_{bh} \cdot \mu n_\mu \cdot \gamma_b},$$

Таблиця 6.5 — Значення коефіцієнтів тертя μ та надійності γ_n .

Методи обробки (очищення) з'єднуваних елементів	Коефіцієнт тертя, μ	Метод регулювання натягу	Коефіцієнт γ_n при навантаженні та різності діаметрів отворів та болтів δ , мм	
			Динамічному у при $\delta =$ 3...6 статичному при $\delta = 5...6$	динамічному при $\delta = 1$ статичному при $\delta = 3...4$
1. Дрібострум. Піскострум. або дрібометний двох поверхонь кварцовим піском або дрібною, без консервування	0,58	M a	1,35 1,20	1,12 1,02

Кінець таблиці 6.5.

2. Теж саме з консервуванням, металізуванням розпиленням цинку або алюмінію	0,5	<i>M</i> <i>a</i>	1,35 1,20	1,12 1,02
3. Газополум'яний двох поверхонь без консервування	0,42	<i>M</i> <i>a</i>	1,35 1,20	1,12 1,02
4. Сталевими щітками двох поверхонь без консервування	0,35	<i>M</i> <i>a</i>	1,35 1,25	1,17 1,06
5. Без обробки	0,25	<i>M</i> <i>a</i>	1,7 1,5	1,3 1,2
Примітка: Метод регулювання натягу болтів <i>M</i> означає регулювання за моментом закручування, <i>a</i> - за кутом оберту гайки				

Високоміцні болти застосовуються і в з'єднаннях працюючих на розтяг (фланцевих). У цьому випадку сили тертя між деталями, що з'єднуються, відсутні і несучу здатність одного високоміцного болта, що працює на розтягування визначають за формулою:

$$N = R_{bh} \cdot A_{bn};$$

$$R_{bf} = 0,7R_{bun},$$

де R_{bun} - найменший тимчасовий опір болта розриву;

A_{bn} - площа болта, нетто, прийнята за табл. 6.4. Кількість високоміцних болтів у з'єднаннях, що працюють на розтягування (рис. 6.5), визначиться формулою:

$$n = \frac{N}{N_{bh} \cdot \gamma_c},$$

де N - сила, що розтягує;

N_{bh} - несуча здатність одного високоміцного болта на розтяг.

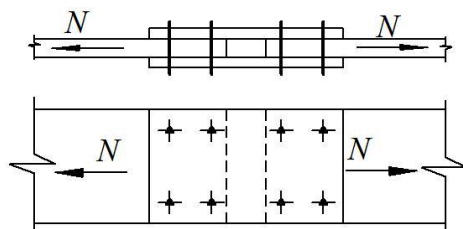
$$N = n \cdot N_{ah} \cdot \gamma_c = n \cdot R_{bh} \cdot A_{bh} \cdot \gamma_c,$$

або необхідну площу перерізу болтів:

$$A_{bn} = \frac{N}{n \cdot R_{sh} \cdot \gamma_c},$$

а потім за табл. 6.4. діаметр болтів.

а)



б)

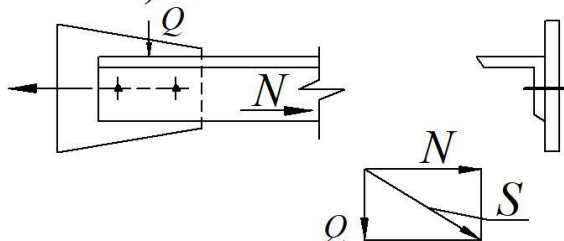


Рисунок 6.4 - З'єднання на високоміцних.

Якщо в з'єднанні одночасно діють сили, що зсувають і розтягують (рис. 6.5. б), то розрахунок проводять окремо на зсув (зріз) та розтягнення. Необхідна кількість болтів під час роботи на зріз:

$$n = \frac{T}{Q_{bh} \gamma_c},$$

та при роботі на розтягування:

$$n = \frac{N}{N_{bh}\gamma_c},$$

де Q_{bh} і N_{bh} несуча здатність одного болта на зріз і розтягнення.

Остаточне число болтів призначають за максимальним значенням n .

При розміщенні болтів у плані слід керуватися вказівками ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування», що обмежують як мінімальні, так і максимальні відстані в болтових полях. У наведених нижче позначеннях прийнято: d - діаметр отвору, t - товщина найбільш тонкого елемента.

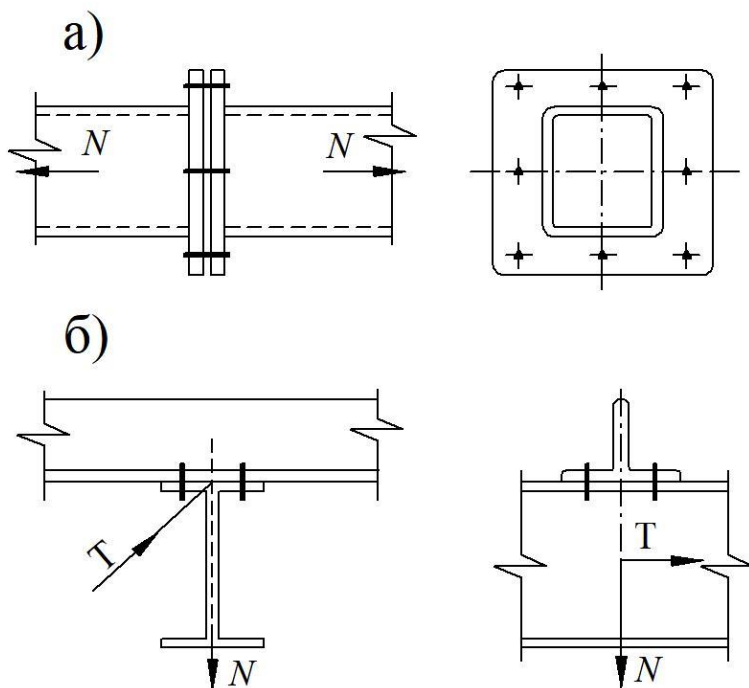


Рисунок 6.5 - З'єднання на міцних болтах, що працюють на розтяг.

Можна знайти несучу здатність з'єднання при роботі на зріз та розтяг відповідно:

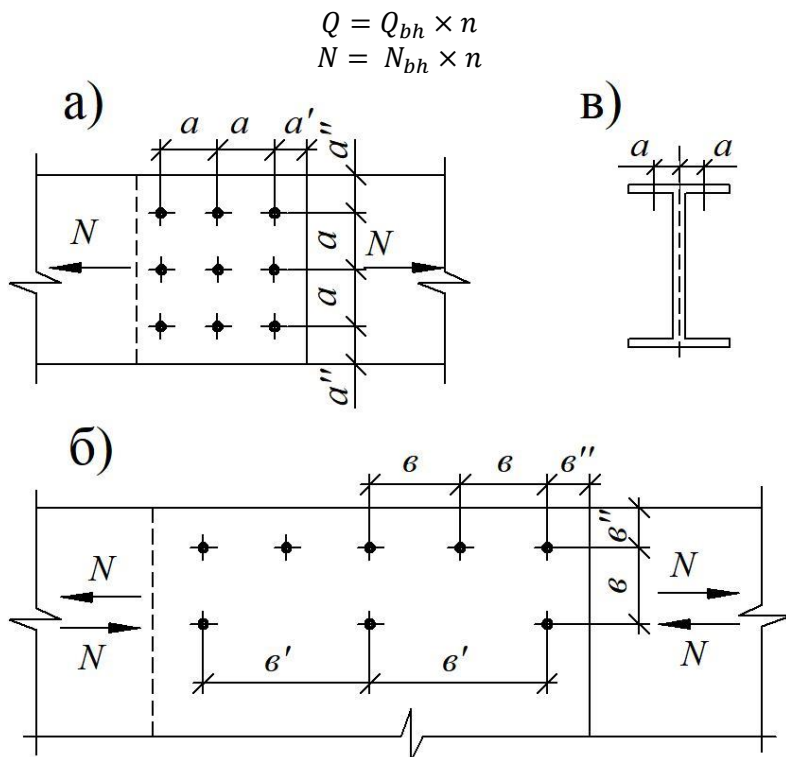


Рисунок 6.6 - Відстань між центрами болтів і до країв елементів:
 а - мінімальна; б - максимальна; в - в двотаврових балках.

Мінімальні відстані (рис. 6.6. а):

- між центрами болтів у напрямі $a = 2,5d$; для елементів зі сталі з межею плинності від $\sigma_m > 380$ МПа $a = 3d$;
- від центру болта до краю елемента вздовж зусилля $a = 2d$;
- та ж поперек зусилля $a'' = 1,5d$;
- для високоміцних болтів $a' = a'' = 1,3d$;

Максимальні відстані (рис. 5.6.6):

- між центрами болтів у крайніх рядах $b = 8d$ або $12t$;
- між центрами болтів у середніх рядах;
 $b' = 16d$ або $24t$ при розтягуванні;
 $b' = 12d$ або $18t$ під час стиснення;
- від центру болта до краю елемента;

$$e'' = 4d \text{ або } 8t.$$

У профільних елементах (куточках, двотаврах, швелерах) можливе положення отворів (рисок) і діаметри отворів, що допускаються, встановлені з умов міцності і практичної можливості постановки болтів.

Для двотаврових перерізів положення рисок та максимальні діаметри отворів наведені в табл. 6.6 (див. рис. 6.6. в).

Таблиця 6.6 — Положення рисок та максимальні діаметри отворів в двотаврових балках.

d max, мм	a , мм	Номер балки	
		10	12
9	32	10	12
11	36	14	16
11	40	18	20
13	45	22	24
15	50	27	30
17	55	33	36
19	60	40	45
19	60	50	
21	70		
23	70		
23	80		
23	80		
23	80		
23	90		
25	100		

Контрольні запитання

1. Які основні переваги болтових з'єднань порівняно зі зварними?
2. Які типи болтів використовуються у будівництві?
3. Чим відрізняються болти грубої, нормальної та підвищеної точності?
4. Які вимоги до підготовки отворів і поверхонь для високоміцних болтів?
5. Для чого застосовуються анкерні болти?
6. У чому полягає суть роботи болтового з'єднання на зсув?
7. За якою формулою виконується перевірка міцності болта на зріз?
8. Як визначається кількість площин зрізу болта в залежності від типу з'єднання?
9. Які значення коефіцієнта умов роботи γ_b приймаються для різних типів болтів?
10. Як розраховується міцність на зминання елементів, що з'єднуються болтами?
11. За якою формулою визначається несуча здатність болтового з'єднання на розтяг?
12. Як проводиться розрахунок болтового з'єднання, яке одночасно працює на згин і зсув?

Перелік джерел посилання

1. Конспект лекцій з курсу «Металеві конструкції» для студентів всіх форм навчання спеціальностей 8(7).060101 «Промислове та цивільне будівництво». Укладач: Жаданова К.Ф. - Запоріжжя: видавництво ЗНТУ, 2017. - 30 с.

2. ДБН В.2.6-198:2014. «Сталеві конструкції. Норми проектування». К.: Мінрегіон України, 2014.

3. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд

4. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2

5. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. - К.: Мінрегіон України, 2017. - 80 с.

6. ДБН В.2.2-9:2018 Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення

7. ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Прогини і переміщення. Вимоги проектування (укр)

8. Хоменко О.Г. Сталеві конструкції у будівництві: Підручник.— Глухів: Глухівський національний педагогічний університет ім.О.Довженка, 2018.

9. Барашиков А.Я., Колякова В.М. Будівельні конструкції. Підручник.-К.: ВД «Слово», 2011.-256 с

10. Клименко Ф. Є., Барабаш В. М., Стороженко Л.І. Металеві конструкції: / За ред. Ф.Є Клименка: Підручник. - 2-ге видання, випр. і доп. - Львів: Світ, 2002. - 312 с

11. Лугченко О. І. Конспект лекцій з курсу «Металеві конструкції» (для студентів 3 курсу денної, 4 курсу заочної форм навчання і слухачів факультету післядипломної освіти напряму підготовки 6.060101 - Будівництво, спеціальності «Промислове і цивільне будівництво») / О. І. Лугченко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. - Х.: ХНАМГ, 2012. - 160с.

12. Пермяков В.О., Белов І.Д. Металеві конструкції. Ферми: Навчальний посібник. Київ. КНУБА, 2006. 170 с.

13. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для ВНЗ: Видання 2-е, перероблене і доповнене / Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В. та ін.; Під загальною редакцією О.О. Нілова та О.В. Шимановського. Київ: Видавництво «Сталь», 2010. 869 с

14. Гілодо О. Ю. Металеві конструкції у питаннях та відповідях : навчальний посібник / О. Ю. Гілодо. — Одеса : Астропринт, 2019. — 120 с.

15. Металеві конструкції. Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності "Будівництво та цивільна інженерія" усіх форм навчання. Укладач - д.т.н., професор Пашинський В.А. - Кропивницький: ЦНТУ, 2018. - 29 с.

16. Конспект лекцій "Основи металевих конструкцій" з дисципліни "Будівельні конструкції", розділ "Металеві конструкції" для студентів спеціальностей 7.092102 ПГС і 7.092103 ГСХ заочної форми навчання / Укладач: К.Ф. Жаданова. - Запоріжжя: Видавництво ЗДА, 2002. - 105 с.