

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Новомлинець О. О., Олексієнко С. В.,
Ющенко С. М.

**ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО
ВИРОБНИЦТВА**

Навчальний посібник

Чернігів 2023

УДК 621.791.01:624.014.2

H74

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 8 від 03.07.2023 р.).

Рецензенти:

Болотов Г. П. – доктор технічних наук, професор Національного університету «Чернігівська політехніка»;

Макаренко Н. О. – доктор технічних наук, професор Донбаської державної машинобудівної академії;

Бриков М. М. – доктор технічних наук, професор Національного університету «Запорізька політехніка».

Новомлинець О. О.

H74

Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : навчальний посібник / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 130 с.

ISBN 978-617-7932-50-4

У посібнику розглянуто загальні питання проектування зварних конструкцій, технологічних процесів їх виготовлення, організації виробництва металевих зварних конструкцій, наведено критерії, що визначають оптимальність вибору варіанта технологічного процесу, розглянуто розрахункові методики забезпечення точності виготовлення конструкцій, способи забезпечення їхньої працездатності та міцності при дії різних навантажень. Розглянуто основи техніко-економічного аналізу конструкцій та процесів їх виробництва.

Посібник призначений для здобувачів вищої освіти та інженерно-технічних працівників в галузі зварювального виробництва.

УДК 621.791.01:624.014.2

ISBN 978-617-7932-50-4

© Новомлинець О. О., Олексієнко С. В.,
Ющенко С. М., 2023

© НУ «Чернігівська політехніка», 2023

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	6
1.1. Раціональне проектування і технологічність зварних конструкцій	6
1.2. Технологія виготовлення та автоматизація виробництва зварних конструкцій	11
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	16
2.1. Підприємство з виробництва металевих конструкцій	16
2.2. Управління виробництвом	21
2.3. Принципи організації виробничих процесів	26
2.4. Типи виробництв	28
2.5. Методи організації виробничих процесів	32
2.6. Види технологічних процесів та їхні особливості	35
РОЗДІЛ 3. ЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	43
3.1. Взаємозв'язок зварної конструкції та технології її виготовлення	43
3.2. Вплив технології на трудомісткість зварних конструкцій	46
3.3. Вплив технологічного процесу виготовлення зварної конструкції на її працездатність	54
3.4. Загальні вимоги до проєкту технологічного процесу виготовлення зварної конструкції	58
РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ	61
4.1. Вимоги до технологічного процесу виготовлення зварної конструкції	61
4.2. Вплив послідовності складання на залишкові деформації від зварювання	64
4.3. Вплив послідовності накладення зварних швів на деформації конструкції	68

4.4. Вплив конструктивного оформлення зварних елементів на залишкові деформації від зварювання	72
4.5. Вибір оптимального варіанта технологічного процесу виготовлення зварної конструкції	78
РОЗДІЛ 5. ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	
87	
5.1. Засоби зменшення деформацій, що виникають при зварюванні конструкцій	87
5.2. Закріплення деталей, що зварюються	89
5.3. Застосування зворотних вигинів	93
5.4. Заходи боротьби з місцевими деформаціями	96
РОЗДІЛ 6. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ	
102	
6.1. Шляхи підвищення працездатності зварних конструкцій	102
6.2. Підвищення міцності зварних конструкцій при статичному і ударному навантаженнях	104
6.3. Підвищення витривалості зварних конструкцій при циклічних навантаженнях	108
6.4. Підвищення стійкості зварних конструкцій	114
РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА КОНСТРУКЦІЙ	
119	
7.1. Залежність трудомісткості виготовлення виробів від конструктивних форм та технології виготовлення	120
7.2. Собівартість виготовлення зварних конструкцій	125
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА	129

ПЕРЕДМОВА

На сучасному етапі розвитку зварювального виробництва є безліч можливостей для забезпечення якості зварних конструкцій, продуктивності їх виготовлення, економії трудових, матеріальних ресурсів і, як наслідок, зменшення фінансових витрат. Повнота використання цих можливостей багато в чому визначається якістю проектів як самої конструкції, так і технологічного процесу її виготовлення. Рішення, прийняті при розробці проекту конструкції, повинні обов'язково забезпечувати можливість її простого й економічного виготовлення при повному дотриманні її експлуатаційних показників. Разом з тим, якісний технологічний процес може стати ефективним засобом забезпечення працездатності конструкції.

Дотримання точності виготовлення на всіх етапах виробництва конструкції є винятково важливою загальною вимогою, від виконання якої залежать і технічні, і економічні показники якості технологічного процесу виготовлення зварної конструкції. Найбільш повну та об'єктивну оцінку прийнятих варіантів проектів дозволяють дати розрахункові методики. Їх використання дає змогу визначити не тільки конструктивні особливості виробів, але і встановити, якою мірою для досягнення необхідної точності при їх виготовленні можна запобігти виникненню зварювальних деформацій.

У посібнику висвітлено загальні питання проектування та виробництва зварних конструкцій, організації та структури підприємств із виробництва зварних конструкцій, розглянуто питання значення технологічного процесу виготовлення зварної конструкції, вибору його варіанта, засобів забезпечення необхідної точності виготовлення та працездатності виробів, техніко-економічного аналізу процесів виробництва зварних конструкцій.

В основу викладеного матеріалу покладено праці співробітників ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, НУК ім. адмірала Макарова, Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, НУ «Чернігівська політехніка».

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Раціональне проєктування і технологічність зварних конструкцій

Задача створення оригінальних машин чи механізмів, призначених для виконання яких-небудь нових або відомих функцій, але новим способом, у практиці проєктування трапляється досить рідко. У більшості випадків конструкція, що створюється, являє собою результат роботи проєктувальників декількох поколінь. Проте будь-який виріб, який заново проєктується, має елемент оригінальності. Різноманітність призначень, форм і розмірів зварних конструкцій, а також прогрес техніки та технології не дозволяють конструктору просто повторювати готові рішення. Тому проєктування – творче завдання, що не виключає розумної конструктивної спадкоємності.

Оптимальними є такі конструктивні форми, які відповідають службовому призначенню виробу, забезпечують надійну роботу в межах заданого ресурсу, дозволяють виготовити виріб при мінімальних затратах матеріалів, праці й часу. Ці ознаки визначають поняття *технологічності конструкції*. Крім того, необхідно, щоб конструкція відповідала вимогам технічної естетики. Ці вимоги повинні дотримуватись на всіх стадіях проєктування конструкції і в процесі її виготовлення.

На етапі *ескізного проєктування* виявляють принципову можливість забезпечення заданих службових властивостей виробу при різних варіантах конструктивного оформлення та оцінюють їхню технологічну доцільність.

Генеральне конструктивне оформлення зазвичай визначається попереднім досвідом створення виробів такого типу. Вибір форми та розмірів окремих елементів конструкції визначається параметрами та особливостями даного виробу. При проєктуванні цих елементів одночасно з вибором матеріалу і методу отримання заготовок конструктор призначає розміщення розташування зварних з'єднань, їхній тип та спосіб зварювання. Таким чином, основні питання технологічності зварних конструкцій вирішуються вже на першому етапі проєктування шляхом вмілого використання широких можливостей

компоновання з окремих заготовок та використання найбільш прогресивних прийомів виготовлення за допомогою зварювання.

Технолог не в змозі ефективно використовувати передову технологію там, де конструкція розроблена без урахування технологічності. Тому на всіх стадіях проектування зварної конструкції при відпрацюванні технологічності конструктивних рішень обов'язкова участь технологів-зварників, яка забезпечується як через технологічні відділи конструкторських бюро, так і шляхом погодження з відділом головного зварника.

На стадії *технічного проекту* конструкції всіх основних вузлів та найбільш трудомістких деталей звичайно розроблюють у декількох варіантах, які потім порівнюють між собою за технологічністю та надійністю в експлуатації. У разі потреби при цьому здійснюють розрахунки трудомісткості виготовлення, металоємності та інших показників. Не завжди вдається знайти варіант, який суттєво переважає всі інші. Тоді вибір здійснюють на основі того показника, який у цьому випадку є вирішальним.

На етапі *робочого проектування* здійснюють детальну технологічну проробку прийнятого варіанта конструкції. Передусім здійснюють проробку креслень та технічних умов на великі заготовки, особливо тих, що поставляються з інших заводів, потім креслення всіх основних вузлів і деталей та технічні умови на їх виготовлення, складання, монтаж та випробування. Робочі креслення направляються у відділ головного зварника. Тут при розробці робочої технології конструкції, що спроектована, виявляють недоліки, пов'язані здебільшого з вибором матеріалів (за здатністю до зварювання), видів заготовок, розмірів швів та характеру підготовки кромки, припусків на механічну обробку, допусків форми та розмірів, методів контрольних операцій. Необхідні зміни після погодження з конструктором вносять у креслення та в технологічну документацію до запуску виробу у виробництво. У багатьох випадках при створенні принципово нових типів зварних конструкцій, а також при освоєнні нових матеріалів або зварювальних процесів до вирішення найбільш складних питань притягують науково-дослідні організації.

На стадії проектування робота з покращення технологічності зазвичай здійснюється за трьома напрямками.

1. Економія металу. Пошук найкращих конструктивних форм, більш точний облік характеру і значень діючих навантажень, використання більш точних методів розрахунку дозволяють конструктору економити метал, усуваючи залишковий запас міцності, зменшуючи масу металу, що слабо бере участь у роботі. Доцільно замість просторових решітчастих конструкцій використовувати оболонкові; вимоги високої жорсткості задовольняти, використовуючи гнуті чи гофровані тонколистові, а також стільникові елементи; при роботі на поздовжню стійкість використовувати трубчасті елементи. Вибір матеріалу відкриває великі можливості зниження маси виробу. Найбільша економія металу може бути отримана при використанні міцних і високоміцних сталей та сплавів з високою питомою міцністю (алюмінієвих, титанових). Зниженню маси виробу сприяє також використання більш міцних холоднокатаних елементів замість гарячекатаних. Підвищення міцності, а отже, і зниження маси виробу досягається термообробкою. Однак підвищення міцності металу нерідко супроводжується погіршенням його здатності до зварювання або зниженням опору руйнуванню. Тому економія металу за рахунок підвищення його міцності доцільна тільки при врахуванні цих факторів. Великі перспективи має використання композиційних матеріалів, наприклад, двошарових сталей.

2. Зниження трудомісткості виготовлення. У цьому плані важливим є вибір розмірів та методу отримання заготовок, а також прийомів їх зварювання. При опрацюванні конструктивної схеми й орієнтовному підрахунку розмірів перерізів ще не має суттєвого значення, чи буде конструкція монолітною або зварною. Питання, безпосередньо пов'язані зі зварюванням, виникають при *членуванні* виробу на окремі заготовки. При намітці розміщення зварних з'єднань проектувальник не тільки задає форму й розміри окремих заготовок, а і значною мірою визначає рішення багатьох конструктивних і технологічних питань, таких як методи отримання заготовок, типи з'єднань, прийоми зварювання тощо. Тому вибір варіанта розчленування дуже важливий з погляду його впливу на технологічність конструкції.

При проектуванні унікальних виробів великого розміру й маси членування нерідко є єдиним можливим вирішенням завдання, оскільки виготовити їх цілісно не дозволяє потужність наявного обладнання. При членуванні складних деталей бажано сполучати простоту форм окремих заготовок з раціональним розміщенням зварних з'єднань. Так, наприклад, цільнолиту складну сталеву відливку великого розміру доводиться формувати в підлозі цеху з великими затратами ручної праці. Перехід до зварного варіанта з невеликих простих литих заготовок дозволяє використати машинну формовку і значно скоротити трудомісткість.

Нерідко умови навантаження різних частин зварної конструкції розрізняються досить помітно. У цьому випадку доцільно вибрати матеріали й методи одержання заготовок з урахуванням розходження вимог до механічних властивостей окремих частин.

При виборі методу зварювання конструктор повинен урахувати здатність до зварювання металу заготовок, призначити тип з'єднання і забезпечити зручність виконання складально-зварювальних операцій. Доставка великих зварних виробів до місця експлуатації досить часто виявляється неможливою або недоцільною. У цьому разі частину зварювальних операцій виконують при монтажі. Підхід до вибору методу зварювання і конструктивного оформлення з'єднань для заводського й монтажного зварювання може бути різним. Тому розміри елементів і місця розташування монтажних швів призначають одночасно з вибором методу зварювання. Вибір методу зварювання зазвичай включає призначення типу зварного з'єднання, зварювальних матеріалів, прийомів виконання зварювання, а також термообробки, якщо це необхідно. Ці дані визначають механічні властивості зварного з'єднання та значення напружень, які допускаються, що необхідно для виконання розрахунків на міцність.

На стадії робочого проектування конструктивне оформлення зварних з'єднань проробляється більш детально. На кресленнях вказуються характер обробки кромки, допуски на розмір з урахуванням припусків на наступну механічну обробку вузла або виробу.

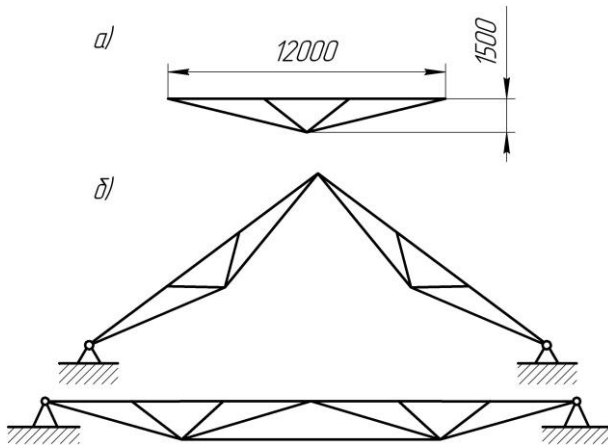
Питання точності та стабільності розмірів конструкції, звичайно, не вичерпуються вибором методу зварювання. Істотним є облік зварювальних деформацій і напружень, призначення технологічних

заходів щодо їхнього запобігання та усунення. Це коло питань вирішують на стадії робочого проектування як з метою обґрунтування значень допусків і припусків, так і з погляду доцільності проведення термообробки. Багато досить відповідальних виробів цілком надійно працюють після зварювання без якої-небудь термічної обробки. З іншого боку, застосування термообробки нерідко помітно поліпшує механічні властивості та структуру зварних з'єднань, сприяючи підвищенню їхньої працездатності. Невиправдане призначення операції термообробки може істотно збільшити трудомісткість виготовлення виробу, особливо в умовах серійного виробництва. Проводити термообробку після зварювання або відмовитися від неї – вирішують, беручи до уваги хімічний склад металу та зварювальних матеріалів, метод зварювання, конструктивне оформлення з'єднань і вузлів, вимоги до механічних властивостей, умови експлуатації тощо.

3. Економія часу. Найбільша економія часу досягається в умовах безперервного потокового автоматизованого виробництва при великосерійному й масовому випуску продукції, коли всі операції погоджені в часі й виконуються механізмами. Отже, при проектуванні зварних виробів конструктор повинен забезпечити ефективність їхнього виготовлення за допомогою високопродуктивних механізмів і автоматичних пристроїв. Однак частка зварних конструкцій, виготовлених в умовах серійного й масового виробництва, порівняно невелика. У дрібносерійному виробництві ефективно використовувати потокові методи виготовлення дозволяють типізація і нормалізація. Важливо здійснити раціональний вибір системи конструкції і розмірних її параметрів. Вишукування прогресивних конструктивних форм і технологій дозволяє проектувальникові обмежити кількість типорозмірів і тим самим збільшити серійність виробів, що випускаються.

Розглянемо вирішення цих питань на прикладі кроквяних ферм, серійному виробництву яких перешкоджає велика кількість типорозмірів і безліч коротких по-різному орієнтованих швів, а також необхідність кантування під зварювання вже зібраної ферми. Нині розроблена типова конструкція кроквяної ферми з мінімальною чисельністю деталей (рис. 1.1, *a*). Типорозміри розрізняються за розмірами перерізів елементів при збереженні незмінними довжини ферми $L = 12 \text{ м}$ і висоти $h = 1,5 \text{ м}$. Компонування з таких ферм дозволяють споруджувати перекриття

прольотом понад 12 м (рис. 1.1, б). Це дає змогу суттєво збільшити випуск таких типових ферм, що забезпечує можливість переходу до їх великосерійного виробництва. Крім того, обмежена кількість деталей, легке складання, можливість використання точкового зварювання, що не вимагає кантування ферми, – усе це дозволяє організувати виробництво ферм в умовах автоматичної потокової лінії.



*Рисунок 1.1 – Типова кроквяна ферма (а)
та можливі способи її компоновання (б)*

У разі, коли збільшити серійність випуску виробу не вдається і виготовлення конструкції передбачається в умовах дрібносерійного виробництва, конструкторові варто так підбирати типорозміри вузлів і елементів, щоб вони відповідали формам і розмірам нормалізованого технологічного оснащення.

1.2. Технологія виготовлення та автоматизація виробництва зварних конструкцій

Вихідними даними для проектування технологічного процесу виготовлення зварної конструкції є креслення виробу, технічні умови та планована програма випуску.

Креслення містять дані про матеріал заготовок, їхню конфігурацію, розміри, типи зварних з'єднань – рішення, що були прийняті конструктором у процесі проектування виробу й повинні бути

прийняті до виконання технологом. Технолог не має права вносити зміни в креслення. Тому будь-якому відхиленню від креслення повинно передувати його виправлення конструктором.

Технічні умови (ТУ) на виготовлення визначеного типу конструкцій містять перелік вимог, що ставляться до матеріалів, устаткування та виконання технологічних і контрольних операцій. ТУ коротко викладають досвід проектування, виготовлення та експлуатації, накопичений у цій галузі виробництва. Тому при проектуванні технологічних процесів обов'язкове дотримання вимог ТУ. Відхилення від них у кожному окремому випадку повинне бути досить обґрунтовано.

Програма випуску містить дані про чисельність виробів, які треба виготовити протягом конкретного терміну (наприклад, за рік). Ці цифри служать підставою для вибору устаткування, технологічного оснащення і засобів механізації та автоматизації. Крім того, за програмою випуску проводять оцінювання економічної ефективності цього вибору. Виробничий процес виготовлення виробів включає різні технологічні, контрольні і транспортні операції. Головна вимога, що визначає послідовність виконання цих операцій, їхній зміст і забезпечення оснащенням, – виконання заданої програми випуску виробів високої якості в найкоротший термін при мінімальній вартості.

Послідовність виконання основних складально-зварювальних операцій визначається вибором варіанта членування конструкції на технологічні вузли, підвузли й окремі деталі. Оптимальність такого членування визначається такими розуміннями.

1. На монтажному майданчику умови праці, можливості застосування високопродуктивного оснащення і засобів контролю якості менш сприятливі, ніж на заводі. Тому вироби великих габаритів доцільно розчленовувати на такі транспортабельні вузли, що дозволять звести до мінімуму роботи на монтажі.

2. З позиції доступності зварних з'єднань, зручності їхнього виконання і наступного післяопераційного контролю складально-зварювальні роботи доцільно виконувати шляхом послідовного укрупнення окремих елементів у підвузли й вузли з наступною обробкою всього виробу. Таке чергування складальних і зварювальних операцій полегшує використання високопродуктивного зварювального оснащення, але при малій жорсткості окремих вузлів може призводити до збільшення деформацій від зварювання.

3. Для оцінки очікуваних зварювальних деформацій і вибору раціональної послідовності складально-зварювальних операцій варто користуватися розрахунковими методами.

4. Необхідну точність розмірів і форми зварного виробу варто забезпечувати раціональною побудовою технологічного процесу і застосуванням правки на стадії заготівлі елементів і складання та зварювання окремих вузлів. Виправлення готового виробу є зазвичай дуже трудомістким.

5. Термообробка всієї конструкції може істотно ускладнити процес виготовлення, особливо в умовах серійного й масового виробництва. Тому в разі потреби поліпшення механічних властивостей, зняття залишкових напружень або стабілізації розмірів у якій-небудь зоні конструкції вигідний такий вибір послідовності складання та зварювання, що дозволяє робити місцеву або попередню термообробку окремих підвузлів або деталей.

Розробка технології має на меті забезпечити оптимальні умови виконання кожної окремої операції і всього процесу загалом. Для різних типів зварних конструкцій уявлення про оптимальність технологічного процесу можуть сильно відрізнятись.

Однак вимога економії ручної праці є загальною і з роками здобуває дедалі більшу гостроту. Тому на сьогодні йдеться про необхідність скорочення, а надалі й повного витіснення важкої фізичної праці на основі комплексної механізації й автоматизації виробництва.

Під *механізацією* виробничого процесу розуміють заміну ручної праці роботою машин. При *автоматизованому* процесі обслуговуючий персонал виконує лише функції *налагодження* та *спостереження* за роботою приладів і систем керування. *Систему керування становлять механізми й засоби зв'язку, що забезпечують точну й погоджену в часі взаємодію робочих і допоміжних агрегатів і пристроїв.*

У сфері зварювального виробництва трудові витрати власне на зварювальні роботи звичайно не перевищують 30 %. Значний обсяг займають заготівельні, складальні й допоміжні, особливо транспортні, операції. Отже, підвищення продуктивності тільки зварювальних робіт не може дати істотного ефекту. Звідси – необхідність комплексної механізації й автоматизації, що охоплює весь процес виробництва, включаючи не тільки основні (заготівельні, складальні, зварювальні, оздоблювальні), але

й допоміжні (транспортні, контрольні) операції. Удосконалення виробництва зварних конструкцій вимагає не тільки наявності механізмів, здатних здійснювати всі необхідні операції технологічного процесу, але й раціонального їхнього компоунання. При цьому вимоги як до механізмів, так і до їхнього компоунання визначаються характером виробництва. Так, для одиничного й дрібносерійного виробництва потрібні універсальні пристрої, придатні для роботи у широкому діапазоні типорозмірів заготовок і виробів, тоді як для великосерійного й масового виробництва необхідно спеціалізоване устаткування, на основі якого створюються поточкові й автоматичні лінії цільового призначення. З урахуванням доцільності збільшення серійності виробів, що випускаються, за рахунок типізації та уніфікації можна виділити основні напрями вдосконалення виробництва зварних конструкцій.

1. Збільшення серійності виробів, що випускаються, шляхом вишукування прогресивних конструктивних форм і технологій, що відповідають умовам безперервного й синхронного циклу виробництва.

2. Створення та централізоване виготовлення спеціального технологічного оснащення, здатного забезпечити ефективність такого виробництва.

3. Створення універсальних пристроїв для комплексної механізації процесів в індивідуальному та дрібносерійному виробництві.

Переважає більшість устаткування для поточкових і автоматичних ліній зварювального виробництва виготовляється за рахунок злиття зварювальних фірм із фірмами, що роблять верстати із програмним керуванням. Досвід верстатобудівників у цій сфері сприяє вдосконаленню зварювального устаткування та дозволяє знаходити нові рішення. Прикладом цього може служити створення промислових роботів. Для зварювального виробництва застосування роботів, очевидно, послужить основним засобом вирішення проблеми економії трудових ресурсів. Універсальність роботів дозволяє організувати проєктування і виготовлення їх у спеціалізованих організаціях великими серіями. Застосування роботів у процесі виробництва зварних виробів може позбавити від необхідності проєктування та виготовлення складного спеціалізованого устаткування для кожної автоматичної лінії. У серійному, а тим більше дрібносерійному, виробництві універсальність роботів виявляється особливо корисною завдяки відносній простоті переходу від виробництва одного типорозміру виробу до іншого.

Ефективність технологічної лінії, яка обслуговується пристроями, що автоматично виконують окремі операції, істотно підвищується за рахунок використання систем у вигляді комплексів програмних і технічних засобів, призначених для вироблення та реалізації керувальної дії на технологічний об'єкт управління. На їхній основі створюють *системи групового керування* більшою кількістю механізмів для автоматизації не тільки основних, але й допоміжних операцій. Шляхом введення *зворотних зв'язків* система групового керування дозволяє організувати *контроль якості* виконання технологічних операцій із компенсацією спотворень технологічних режимів, що виникають. Можлива також організація оперативного контролю стану устаткування з метою підвищення надійності роботи лінії. Наприклад, перерозподіл функцій робота, що вийшов з ладу, між іншими роботами дозволяє проводити його ремонт без зупинки лінії, лише трохи знизивши її продуктивність. Застосування групового керування агрегатами за допомогою програмних комплексів відбиває один з основних принципів використання *автоматичних систем керування* (АСК) – забезпечення повної й ефективною автоматизації процесів виробництва.

Питання для самоперевірки

1. Ознаки технологічної зварної конструкції.
2. Етапи проєктування конструкцій.
3. Напрями, за якими проводиться робота з покращення технологічності конструкцій.
4. Засоби зниження металоємності зварних конструкцій.
5. Засоби зниження трудомісткості виготовлення зварних конструкцій.
6. Засоби економії часу при виготовленні зварних конструкцій.
7. Вихідні дані для проєктування технологічного процесу виготовлення зварної конструкції.
8. Міркування, за якими визначається оптимальність членування конструкції на вузли та окремі деталі.
9. Поняття механізації, автоматизації та роботизації виробничих процесів.
10. Переваги використання групового керування агрегатами за допомогою програмних комплексів.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1. Підприємство з виробництва металевих конструкцій

Підприємство – самостійний (частково або повністю) господарюючий суб'єкт, який здійснює виготовлення продукції, проводить виконання робіт та надає послуги з метою отримання прибутку та задоволення суспільних потреб.

Виробництво будь-якої продукції визначає комплексну діяльність, при цьому різні підприємства використовують різні процеси, різні засоби механізації та автоматизації, обладнання і устаткування, технологічні процеси тощо. При цьому, щоб отримувати прибуток, усі ці чинники повинні бути пов'язані між собою так, щоб здійснювати виготовлення продукції високої якості при мінімальних витратах у найкоротші терміни.

Виробнича діяльність (виробничі процеси) здійснюється у виробничих підрозділах – структурних підрозділах промислових підприємств, які виконують конкретні виробничі функції і відповідають за них. Структурною основою виробничого підприємства є цех, який являє собою сукупність виробничих дільниць. Виробнича дільниця об'єднує групу робочих місць, організованих за предметним, технологічним або предметно-технологічним принципами. Промислове підприємство – це комплекс різноманітних взаємопов'язаних виробничих підрозділів, таких як цехи, відділи та обслуговуючі приміщення.

Виробничі підрозділи утворюють такий ієрархічний зв'язок:

- цех – організаційно і (або) технологічно відокремлений структурний підрозділ, що безпосередньо або опосередковано займається перетворенням предметів праці в готову продукцію і складається із сукупності виробничих дільниць;

- відділ – структурний підрозділ цеху, що складається з кількох виробничих дільниць, займає окрему територію і виконує закінчену частину виробничого процесу з переробки предмета праці;

- виробнича дільниця – структурний підрозділ підприємства або цеху, що об'єднує групу робочих місць, організованих за принципом предметної, технологічної або предметно-технологічної спеціалізації;

- потокова лінія – виробнича дільниця, обладнана комплексом машин і механізмів, призначених для виробництва певної продукції та встановлених згідно з послідовністю операцій технологічного процесу, що здійснюються з певною ритмічністю;

- робоче місце – основна одиниця виробничої структури, що містить частину простору виробничого підрозділу, необхідну для виконання трудової діяльності та оснащену та технічними засобами, що використовуються під час роботи.

Робочі місця можуть бути простими та комплексними, спеціалізованими й універсальними, стаціонарними й пересувними, одно- і багатоагрегатними, а також автоматизованими.

Структура виробничого підприємства залежить від конструктивно-технологічних особливостей виробів, масштабу виробництва, виду обладнання і технологій, що використовуються підприємством, та спеціалізації підприємства.

Виробництво металевих конструкцій складається з низки операцій, для виконання яких організовані *цехи основного виробництва*. До них відносяться цех підготовки металу зі складом, цех обробки деталей, склад напівфабрикатів, складально-зварювальні цехи, складально-клепальні цехи, малярвантажний цех зі складом готової продукції.

Цех підготовки металу здійснює розвантаження, сортування, маркування, виправлення, складування, зберігання та видачу металопрокату. Крім цього, у цеху підготовки здійснюються приймання та зберігання обрізу та ділових відходів, видача ділових відходів, обробка обрізу й відвантаження металобрухту. На деяких заводах у цехах підготовки металу проводять очищення металопрокату від корозії та окалини на спеціальних установках, різання профільної сталі на заготовки, а також попереднє стикування листової сталі.

У *цеху обробки* виконуються операції з виготовлення деталей із металопрокату, що надходить із цеху підготовки. Виготовлення деталей у наш час переважно здійснюють без розмітки та намітки. У разі потреби розмітки або намітки спочатку на поверхню металу наносять контури деталей, центри отворів, лінії перегинів, а також знаки та написи. Різання металу на деталі здійснюють по лініях, нанесених на метал. Різання здійснюють з використанням механічного та термічного

різання з використанням ручних пристроїв, механізованого й автоматизованого обладнання, установок із програмним керуванням. Утворення отворів у деталях здійснюють з використанням пресів чи свердлильних верстатів. Для деяких деталей доменних печей, газгольдерів, резервуарів, труб, трубопроводів, силосів і бункерів виконують згинання у холодному або, рідше, у гарячому стані. В окремих деталях стругають кромки та фрезерують торці.

Технологічні операції з обробки деталей групують за профілями прокату: листи, кутники, швелери чи двотаври, які обробляються в паралельних технологічних потоках.

Кожен технологічний потік оснащений необхідним обладнанням та пристроями для подачі профілів прокату, прибирання та транспортування оброблюваних деталей.

Для обробки деталей у листовому прольоті встановлюють гільйотинні ножиці, прес-ножиці, газорізальні машини, установки плазмового та лазерного різання, листопрямильні вальці, листозгинальні вальці, діркопробивні та кромкозгинальні преси, радіально-свердлильні, кромкостругальні верстати та торцефрезерні верстати.

У прольотах обробки кутників, швелерів та двотаврів встановлюють ножиці для різання, зубчасті та дискові пили, діркопробивні та свердлильні верстати, торцефрезерні верстати та ін.

Крім цього, багато цехів обробки мають технологічні лінії та автоматизовані установки для виконання кількох операцій. Ці лінії та установки мають комплекс основного та допоміжного обладнання, що виконує основні операції без попередньої розмітки. Наприклад, поточна лінія великих листових деталей виконує правку листової сталі, стикування та зварювання листової сталі, прямолінійне та криволінійне газове різання, правку листових деталей і свердління отворів. Виготовлені деталі маркують і здають на склад напівфабрикатів комплектно по кожному робочому кресленню окремо. Довгі деталі зазвичай складають у відсіках, а дрібні – зберігають у контейнерах. Тут же ведуть облік надходження та видачі деталей до складальних цехів.

У складально-зварювальних цехах проводять складання конструкцій з окремих деталей, які надходять зі складу напівфабрикатів. Процес складання конструкцій складається з розміщення деталей відповідно до креслення та з'єднання їх між собою короткими зварними швами

(прихватками). Зібрані конструкції піддаються автоматичному зварюванню під шаром флюсу та механізованому зварюванню в середовищі вуглекислого газу. В окремих випадках застосовують контактне, точкове та стикове зварювання. На окремих заводах збереглися складально-клепальні цехи, де проводять складання конструкцій на болтах, розсвердлювання або прочищення отворів під kleпання, kleпання kleпальними машинами або пневматичними kleпальними молотками.

Деякі види великогабаритних і складних конструкцій вимагають певних додаткових робіт для забезпечення високої якості монтажних з'єднань (фрезерування торців конструкцій, свердління отворів для монтажних з'єднань за кондукторами або за розміткою, загальне та контрольне складання). Загальне складання проводиться для забезпечення проектних розмірів конструкцій, підгонки кромek під зварювання та розсвердлювання монтажних отворів. Контрольне складання проводиться для перевірки точності виготовлення елементів та їх взаємозамінності. Зазвичай контрольному складанню піддається кожен перший і надалі кожен десятий екземпляр однотипних конструкцій. Закінчені виготовленням конструкції маркують – наносять фарбою номер замовлення, робочого креслення, марку конструкції.

Виготовлені конструкції транспортують у *маляровантажний цех*, де конструкції ґрунтують, складають у штабелі та вантажать на залізничні платформи або автотранспорт для відправлення на монтаж.

Для забезпечення необхідної якості виготовлення сталевих конструкцій на заводах існує система контролю та перевірки якості матеріалів, стану обладнання, пристроїв та інструменту, кваліфікації працівників, поопераційного контролю та приймання-здачі якості виконаних робіт. Якість прокатної сталі, електродів, зварювального дроту, флюсів, вуглекислого газу, заклепок, лакофарбових матеріалів, що застосовуються при виготовленні конструкцій, повинна задовольняти вимогам відповідних стандартів та технічних умов.

Організація праці в цехах основного виробництва залежить від прийнятого способу організації праці: індивідуального чи бригадного. Індивідуальний спосіб організації праці застосовується в тих випадках, коли необхідно розчленувати технологічний процес, забезпечивши при

цьому ефективно планування, облік, нормування та виконання робіт окремими виконавцями. Якщо технологічний процес недоцільно розчленовувати між окремими виконавцями або для виконання роботи, потрібна група робітників, а також якщо не можна встановити коло обов'язків окремого виконавця або обсяг робіт не забезпечує його повного завантаження, застосовують бригадний спосіб організації праці.

Нині набула широкого застосування організація праці бригадних форм з подачі металу в цех без обробки, розмітки, обробки профілю, обробки листа, сортування напівфабрикату, автоматичного зварювання тощо.

До складу комплексних норм при бригадній формі організації праці включається виконання всіх основних та допоміжних робіт, включаючи електрозварювальні та газорізальні, під час виготовлення сталевих конструкцій.

Бригадні форми організації праці дозволяють зменшити тривалість підготовчих, завершальних і допоміжних операцій, покращити використання обладнання та виробничих площ, скоротити тривалість виробничого циклу та розміри незавершеного виробництва, а також підвищити продуктивність праці.

Для обслуговування цехів основного виробництва на заводі організовуються *цехи допоміжного виробництва*.

Транспортний цех з депо та гаражем забезпечує безперебійну роботу заводського залізничного та автомобільного транспорту;

Ремонтні цехи (ремонтно-механічний, ремонтно-будівельний, електроремонтний) здійснюють ремонт механічної та електричної частин верстатного та кранового електрообладнання, будівель, споруд та комунікацій. Електроремонтний цех забезпечує також експлуатацію електропідстанцій та електромереж.

До допоміжного виробництва належать також *головний склад, телефонна станція та лабораторія*.

Для забезпечення основного виробництва киснем, ацетиленом, електродами, металовиробами (болтами, заклепками, шайбами), інструментом, стисненим повітрям, парою, водою на заводах металевих конструкцій організовуються підсобні виробництва:

- *киснева станція* виробляє кисень, який подається на робочі місця киснепроводом; багато заводів не мають своєї кисневої станції та одержують кисень від кисневих заводів;

- *ацетиленова станція* виробляє ацетилен, який надходить трубопроводом у цехи для газового різання; на багатьох заводах замість ацетилену використовуються природні газ чи горючі гази сусідніх металургійних заводів;

- *метизний цех* призначений для виготовлення болтів, заклепок, шайб; обладнання таких цехів зазвичай малопродуктивне, тому більшість заводів не має їх, комплектуючи металоконструкції метизами, які отримують із метизних заводів;

- *електродні цехи* є на деяких заводах; надалі це виробництво має скорочуватися за рахунок постачання електродів із великих спеціалізованих електродних цехів та заводів;

- *інструментальні цехи* створюються зазвичай на великих заводах; у таких цехах виготовляють та ремонтують інструмент, штампи та спеціальні пристрої; на більшості заводів цю роботу виконують ремонтно-механічні цехи;

- *компресорна станція* є на всіх заводах і призначена для виробництва стиснутого повітря, яке подається на робочі місця трубами; на стиснутому повітрі працюють притиски ножиць, скидачів, свердлильні та шліфувальні машинки, клепальні скоби та молотки тощо.

Крім того, для вироблення пари на заводах є котельні, окремі заводи мають цехи для виробництва карбїду.

З метою підвищення продуктивності праці необхідно всіляко скорочувати допоміжне виробництво за рахунок постачання продукції спеціалізованими підприємствами.

2.2. Управління виробництвом

На вітчизняних заводах металоконструкцій склалася певна система керування виробництвом. Вона здійснюється заводоуправлінням на чолі з директором та його заступниками. Дедалі ширше застосування в управлінні виробництвом знаходить нова система планування та матеріального стимулювання. Управління виробництвом покликане забезпечити наукову організацію праці, технічну та матеріальну підготовку виробництва, планування та оперативне керівництво, контроль якості продукції та її реалізацію.

Структура управління залежить від масштабів виробництва, складності конструкцій, що виготовляються, і спеціалізації виробництва.

Загальне керівництво заводом здійснює *директор*, якому безпосередньо підпорядковані відділи: виробничо-диспетчерський, технічного контролю, капітального будівництва, кадрів та спеціальних робіт, а також бухгалтерія. *Головний інженер* здійснює технічне керівництво основним виробництвом через відділи головного конструктора, головного технолога, головного механіка, головного енергетика, автоматизації та механізації. У веденні головного інженера також знаходяться технічна рада заводу, бюро (інженер) з техніки безпеки, бюро (інженер) з раціоналізації та винахідництва, навчальний пункт, технічна бібліотека, заводська лабораторія, бюро технічної інформації. *Заступник директора з економічних питань* керує відділами: планово-економічними, фінансово-збутовими, праці та зарплати. *Заступник директора із загальних питань* керує роботою транспортного цеху та відділів: матеріально-технічного постачання, житлово-комунального, адміністративно-господарського, гаража, бюро перепусток, складського господарства, охорони.

Раніше на заводах потужністю 20...30 *тис. т* оперативне керівництво здійснювалося директором заводу через відділ підготовки виробництва, на заводах потужністю 60...120 *тис. т* через виробничо-диспетчерський відділ. Нині всі заводи мають начальника виробництва, якому підпорядковані підрозділи основного виробництва. До обов'язків начальника виробництва належить оперативне планування та облік роботи основних цехів, керівництво та контроль за їхньою виробничою діяльністю.

Питаннями механізації та автоматизації, служби техніки безпеки, раціоналізації та винахідництва, праці та зарплати, технічної інформації на заводах потужністю 20...30 *тис. т* займаються працівники відділу головного технолога. На заводах потужністю 60...190 *тис. т* цю роботу виконують самостійні відділи, бюро чи групи.

Конструкторський відділ (відділ головного конструктора) здійснює розробку робочих креслень, комплектування їх металом та видачу у виробництво. Відділ очолює головний конструктор. До складу відділу входять кілька конструкторських бюро або бригад, групи замовлення та комплектування металом, копіювальне бюро, технічний архів.

Кожне конструкторське бюро (бригада) має у своєму складі начальника бюро (бригадира), 7...10 конструкторів і 3...5 перевірників. На 1000 т річного випуску металоконструкцій з числом креслень КМД (конструкції металеві деталювальні) близько 100...120 потрібні один конструктор та один перевірник.

Група замовлення та комплектування веде облік металу за профілями, марками та розмірами як наявного, так і того, що підлягає постачанню з металургійних заводів, бронює метал на кожне креслення КМД, комплектує його при запуску у виробництво. Конструкторський відділ відповідно до плану заводу розробляє креслення КМД, які є основними технічними документами, за якими проводиться виготовлення металевих конструкцій. Кожне креслення КМД, розроблене конструктором, підлягає обов'язковій перевірці перевірником. Конструкторський відділ також вирішує всі питання, пов'язані зі зміною конструкцій, дає висновок про можливість відступу від креслень КМ (конструкції металеві) та погоджує відступ від креслень КМ з проектною організацією.

Технічний архів здійснює приймання та зберігання креслень КМ та КМД, видає у виробничо-диспетчерський відділ укомплектовані металом креслення КМД, листи готових елементів, списки болтів і заклепок, схеми монтажних та загальних складань, пакувальні відомості, креслення; відправляє замовнику креслення КМД, монтажні схеми, титульний лист, список монтажних болтів і заклепок.

Відділ головного технолога забезпечує технологічну підготовку виробництва для всіх виробничих цехів. На основі детального вивчення креслень КМ, технічних можливостей заводу, умов монтажних організацій, а також техніко-економічної доцільності він розробляє основні технологічні положення виготовлення та постачання конструкцій, якими користуються при розробці креслень КМД та технології. У плані підготовки виробництва нових конструкцій передбачаються узгодження технічних умов виготовлення, розробка нових технологічних процесів, проектування та виготовлення спеціальних верстатів, пристроїв та інструментів. Відділ також керує інструментальним господарством заводу, забезпечує технологічне оснащення, складає заявки та розробляє норми витрачання основних та допоміжних матеріалів, керує роботою бюро технічної інформації,

спільно з відділом технічного контролю розробляє нормалі та стандарти підприємства, розробляє організаційно-технічні заходи, надає допомогу цехам щодо впровадження нових технологічних процесів та контролює дотримання технологічної дисципліни.

На великих заводах є *відділ (група) механізації та автоматизації*, який займається розробкою нових механізмів, потокових ліній, більш досконалих пристосувань до верстатів, удосконаленням кранового та технологічного обладнання.

Виробничо-диспетчерський відділ здійснює оперативне планування роботи виробничих цехів, оперативний облік виготовлених конструкцій, керує виробничою діяльністю цехів і контролює її.

Невеликі заводи мають відділи підготовки виробництва, які виконують обов'язки відділів головного технолога та виробничо-диспетчерського відділу.

Оперативний облік ведеться на підставі диспетчерських листів, актів-пред'явлень цехів, що подаються щодня у виробничо-диспетчерський відділ. Облік ведеться за кожним замовленням, кресленням та відправним елементом. Зазначаються дати видачі документації в цех обробки, закінчення виготовлення напівфабрикату, початку складання, закінчення виготовлення відправного елемента та відвантаження.

Контроль за ходом виробничого процесу проводиться начальником виробничо-диспетчерського відділу на диспетчерських нарадах, де присутні начальники цехів та відділів. Перевіряється виконання кожним цехом та відділом денних планів (наміток), дотримання тижневих графіків, графіків термінових та важливих замовлень, а також окремих оперативних доручень, даних із попередніх нарад.

Працівники виробничо-диспетчерського відділу (начальник, диспетчер) у процесі всього робочого часу стежать за ходом виробничого процесу, виконанням оперативних завдань, взаємодією цехів, координують роботу цехів та вживають оперативні заходи для вирішення питань, що виникають у процесі роботи, та усунення причин, що порушують нормальний хід роботи.

Відділ технічного контролю є самостійним відділом заводу, у його підпорядкуванні знаходиться заводська лабораторія. Основними обов'язками відділу є приймання продукції, що випускається

заводом, а також контроль за її якістю та комплектністю. Відділ перевіряє якість усіх матеріалів, що застосовуються при виготовленні металокопункцій (металу, електродів, зварювального дроту, флюсів, газів, матеріалів для ґрунтування), проводить облік та аналіз браку, здійснює контроль за складанням контрольно-вимірювальних приладів, оформляє та зберігає документацію на готову продукцію та матеріали, що застосовуються при виготовленні металокопункцій, здійснює лабораторні випробування металу та інших матеріалів. Усі види готової продукції можуть бути відвантажені замовнику лише після приймання та оформлення їх відділом технічного контролю. Цей відділ також контролює дотримання вимог монтажних організацій, зокрема, стежить за встановленим членуванням копункцій на відправні марки, за виконанням контрольних та загальних складань, оснащенням відправних елементів монтажними пристосуваннями, за фрезеруванням торцевих площин і свердлінням монтажних отворів.

Планово-економічний відділ перебуває в підпорядкуванні директора заводу або його заступника з економічних питань. До обов'язків відділу входять планування виробництва та організація господарської діяльності, статистичний облік та аналіз господарської діяльності, складання калькуляцій, розробка кошторисів тощо. Відділ розробляє для заводу перспективні плани розвитку, річні, кварталні та місячні плани виробництва; розробляє та видає відділам, основним і допоміжним цехам, дільницям місячні плани та веде облік їх виконання.

На планово-економічний відділ покладається також складання кошторисних калькуляцій на основні вироби, окремі замовлення та послуги, що виконує завод, розробка й затвердження оптових цін на вироби. Крім того, відділ бере участь у складанні та перевірці виконання колективного договору.

Відділ праці та заробітної плати займається плануванням, нормуванням та організацією праці, а також розробляє заходи щодо підвищення продуктивності праці та проекти річних, кварталних та місячних планів з праці для цехів та заводу, контролює витрачання фонду заробітної плати та виконання плану підвищення продуктивності праці. Відділ забезпечує розробку та впровадження норм витрат праці, керує роботою з перегляду норм виробітку й заміни їх більш прогресивними та здійснює контроль за правильністю застосування

затверджених норм і розцінок, аналізує виконання чинних норм виробітку та розробляє заходи, що забезпечують виконання норм виробітку всіма робітниками.

Цей відділ вивчає ефективність застосування діючих систем оплати праці, розробляє та проводить заходи з покращення організації заробітної плати робітників, інженерно-технічних працівників та службовців, аналізує організацію та структуру заробітної плати за цехами та службами заводу, окремими категоріями та професіями.

У теперішній час підприємства з виробництва металевих конструкцій впроваджують автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва (АСТПВ) на базі програмних комплексів, які забезпечують вибір в автоматичному режимі (за кресленнями КМД) оптимальної технології виготовлення складальних деталей із необхідною точністю та з оптимальною трудомісткістю виготовлення.

Нормативно-довідковою базою АСТПВ є:

- класифікатор та код деталей, технологічних операцій і маршрутів виготовлення деталей;
- перелік модифікацій точності виготовлення деталей;
- лист модифікацій трудомісткості виготовлення деталей;
- бібліотека профілів металопрокату та марок сталей;
- формування та перелік операцій.

2.3. Принципи організації виробничих процесів

Організація виробничого процесу незалежно від галузі виробництва має базуватись на певних принципах, відповідати певним умовам та передбачати раціональне суміщення в часі та просторі основних, допоміжних та обслуговуючих процесів. Водночас при будь-якому варіанті взаємодії цих процесів, організація виробничих процесів підпорядковується конкретним принципам: спеціалізації, пропорційності, паралельності, прямоочності, безперервності, ритмічності, автоматичності, гнучкості та стандартизації.

Принцип спеціалізації. Спеціалізація всередині виробництва ґрунтується на закріпленні технологічно однорідних груп робіт або визначеної номенклатури виробів за кожним цехом, виробничою дільницею та робочим місцем. Тобто всі вищезазначені робочі місця забезпечуються відповідними засобами праці, кадрами та пристосуваннями для виготовлення конкретної продукції.

Спеціалізоване обладнання працює з більшою продуктивністю, збільшується використання основних фондів підприємства, зменшується собівартість продукції, підвищується якість продукції, підвищується ступінь механізації та автоматизації процесів виробництва.

Принцип пропорційності. Принцип пропорційності в організації виробничих процесів є передумовою вирівнювання продуктивності праці виробничих підрозділів за одиницю часу: основних, допоміжних цехів і обслуговуваних підрозділів підприємства. Дотримання принципу пропорційності дозволяє уникнути проблем з диспропорцією у виробництві. Порушення цього принципу викликає утворення «вузьких місць» у виробництві або неповного завантаження окремих робочих місць, дільниць, цехів, що призводить до зниження ефективності роботи підприємства.

Принцип паралельності. Цей принцип базується на одночасному виконанні окремих етапів виготовлення конструкції та її елементів, поєднанні виконання основних та допоміжних операцій. Це дозволяє скоротити тривалість циклу виготовлення одиниці продукції та забезпечує економію робочого часу. Паралельними можуть бути й окремі технологічні лінії зі спільними іншими виробничими підрозділами (наприклад, заготівельними).

Принцип прямоочності. Кожен виріб має проходити найкоротший шлях від початку виробничого процесу до випуску готової продукції. За цим принципом складські приміщення, виробничі лінії, окремі цехи та склади готових виробів розташовані послідовно один за одним відповідно до передбачених технологічним процесом виготовлення виробу операцій. Вказаний принцип також сприяє зменшенню витрат на транспортування.

Принцип безперервності. Безперервність означає необхідність мінімізації та, де це можливо, повного усунення перерв у виробничому процесі (перерви між змінами, операціями та інші). Безперервність сприяє скороченню часу виробництва, зменшенню часу простою обладнання та працівників. Найбільш ефективною формою організації безперервного виробничого процесу з цього погляду є автоматизоване безперервне потокове виробництво.

Принцип ритмічності заснований на виконанні заздалегідь встановленого графіка виробничого процесу в різні проміжки часу й виконанні обсягу робіт основними й допоміжними цехами,

дільницями, лініями та на окремих робочих місцях. Особливо важливо, щоб цей принцип дотримувався не тільки в основному виробництві, а й у допоміжних та обслуговуючих підрозділах.

Принцип автоматичності. Принцип автоматичності – застосування економіко-математичних методів і систем керування виробничими процесами, що частково або повністю вивільнює працівників від їх безпосередньої участі в реалізації конкретного виробничого чи управлінського процесу. У системах автоматичного керування об'єкти керування, вимірювальні та контрольні пристрої об'єднані в систему, у якій обробка інформації, формування команд і прийняття рішень здійснюються автоматично, після чого команда автоматично надходить на об'єкт керування без участі контролера (працівника). Такий принцип автоматизації процесів призводить до збільшення обсягів випуску продукції, заміни ручної некваліфікованої ручної праці на працю висококваліфікованих робітників, виключення ручної праці у шкідливих умовах та заміни працівників промисловими роботами та автоматами.

Принцип гнучкості. Принцип гнучкості полягає в тому, що більшість із зазначених принципів організації виробничого процесу можна об'єднати в гнучку систему всього виробничого циклу. Принцип гнучкості створює комплексний підхід до організації та спеціалізації виробничих процесів, можливість поєднання професійно-трудова функцій основних, допоміжних і обслуговуючих технологічних процесів.

Принцип стандартизації передбачає широке використання стандартизації, уніфікації, типізації та нормалізації при створенні нових об'єктів та нових технологій, що дозволяє уникнути надмірної різноманітності матеріалів, обладнання, технологічних процесів та значно скоротити тривалість цих робіт.

2.4. Типи виробництв

Тип виробництва – це набір ознак, які визначають організаційні та технічні характеристики виробничого процесу, який реалізується на одному чи декількох робочих місцях у масштабі виробничої дільниці, цеху чи всього підприємства.

Тип виробництва визначає форми спеціалізації, способи організації виробничих процесів, раціональні методи підготовки та планування виробництва і контролю за виробничою діяльністю.

Класифікація типів виробництв формується на основі обсягу випуску продукції, ступеня незмінності номенклатури продукції, характеру завантаження робочих місць та їхньої спеціалізації. Чим ширша номенклатура продукції, тим менш спеціалізований виробничий процес.

Ступінь незмінності номенклатури продукції – це повторюваність виробництва певного виду продукції протягом послідовних періодів часу. Якщо продукт виготовляється протягом одного періоду, але не виготовляється протягом наступних періодів, тоді ступеня незмінності номенклатури продукції немає. Якщо випуск виробів певного типу регулярно повторюється, то це забезпечує передумови для реалізації принципу ритмічності виробничого процесу. При цьому регулярність залежить від обсягу виробництва, оскільки великі обсяги випуску продукції можуть бути рівномірно розподілені на послідовні планові періоди.

Розрізняють чотири типи виробництва: *одиничне, серійне, масове та змішане*.

Орієнтовні ознаки серійності виробництва металевих конструкцій приведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Орієнтовні ознаки серійності виробництва

Маса виробів, кг	Річний обсяг випуску, тис. шт.		
	Дрібносерійне та одиничне виробництво	Серійне виробництво	Великосерійне та масове виробництво
до 25	до 5	5...200	200...400
25...100	2...8	2...100	100...400
100...500	0,5...2,5	0,5...150	30...350
500...1000	0,3...0,6	0,3...10	5...100
1000...5000	0,2...1	0,2...17,5	3,5...125
5000...25000	0,1...0,5	0,1...10	2...25
25000...100000	0,05...0,2	0,05...4	1...10
понад 100000	до 0,01	понад 0,01	–

Одиничний тип виробництва характеризується непостійною номенклатурою продукції, невеликим обсягом виготовлення однотипної продукції, яка з часом не повторюється. Це обмежує можливості використання типових технологій і конструктивних рішень.

Основні особливості одиничного виробництва:

- широка номенклатура продукції, що випускається підприємством;
- у структурі підприємства переважна кількість цехів, дільниць та робочих місць, робота яких організовується за технологічною спеціалізацією, не має закріпленої за ними конкретної номенклатури продукції;

- використання універсального обладнання і розміщення його за однотипністю;

- необхідність залучення висококваліфікованих робітників до безпосередньої участі у виробничому процесі;

- велика кількість робіт виконується вручну, тривалий виробничий цикл;

- децентралізація управління та планування виробництва;

- достатньо висока частка відходів виробництва.

До продукції одиничного типу виробництва належать унікальні верстати, турбіни, преси великої потужності, прокатні стани, потужні електричні машини, а також більшість будівельних об'єктів, крім стандартного домобудівництва.

Одним із різновидів одиничного виробництва є *індивідуальне* (на замовлення) виробництво.

Серійний тип виробництва характеризується обмеженою номенклатурою продукції, яка випускається окремими партіями (серіями), і її випуск періодично повторюється.

Під серіями розуміють випуск ряду виробів, однакових за конструктивними ознаками, які запускаються у виробництво окремими партіями одночасно чи послідовно та безперервно випускаються протягом певного часу (протягом року або кількох років).

Основні особливості серійного типу виробництва:

- постійність виготовлення певної номенклатури виробів у достатньо великій кількості (великими партіями);

- періодичність виготовлення виробів серіями та періодична обробка деталей певними партіями;

- робочі місця спеціалізуються на виконанні декількох операцій, закріплених за працівником;
- робочі місця оснащені переважно спеціалізованим обладнанням та оснащенням для виконання відповідних технологічних процесів;
- обсяг робіт, який виконується вручну, незначний;
- виробничий процес реалізується з використанням праці робітників середньої кваліфікації;
- незначна тривалість циклу виробництва;
- можливість централізованого управління виробництвом;
- автоматизований контроль якості продукції;
- можливість конструктивної уніфікації деталей та виробів;
- типізація технологічних процесів та технологічного оснащення виробничих процесів.

Залежно від кількості виробів, що одночасно виготовляються у серії, виробництва поділяють на дрібносерійні, середньосерійні та великосерійні.

Масовий тип виробництва характеризується безперервністю і доволі тривалими термінами виробництва продукції сталोї номенклатури у великій кількості, вузькою спеціалізацією на робочому місці, орієнтованою на безперервне виконання однієї-двох операцій, які постійно повторюються. Масове виробництво сприяє швидкому зростанню продуктивності праці, високому завантаженню обладнання без необхідності його постійного переналагодження, чіткому ритму роботи.

Невід'ємною ознакою масового виробництва є високий рівень стандартизації та уніфікації деталей, вузлів та агрегатів під час їх конструювання.

Масове виробництво – це вища форма виробничої спеціалізації, яка дозволяє підприємству зосередитися на виробництві одного чи кількох конкретних видів продукції.

Основні особливості масового типу виробництва:

- чітко встановлена номенклатура та великий обсяг випуску виробів;
- робочі місця розташовуються послідовно за операціями, передбаченими технологічним процесом виготовлення (характерно для поточкових ліній);
- робочі місця оснащені спеціалізованим обладнанням та технологічним оснащенням;

- високий ступінь комплексної механізації та автоматизації виробничих процесів;

- використання праці робітників з невисокою кваліфікацією;
- мінімальний обсяг робіт, які виконуються вручну;
- високий рівень стандартизації та уніфікації складових виробу;
- тривалість виробничого циклу мінімальна;
- можливість автоматизованого керування виробництвом;
- централізоване управління виробництвом.

Залежно від типу виробництва та особливостей виробів, що випускаються, корегується структура підприємства та здійснюється відповідна організація робочих процесів.

2.5. Методи організації виробничих процесів

Залежно від типу виробництва, обсягів випуску продукції, її матеріалоемності та трудомісткості застосовуються різні методи організації виробництва. Оскільки будь-який виробничий процес здійснюється в часі та просторі, ефективне використання часу в процесі виробництва залежить від методів організації виробничого процесу та управління ним. Ефективність виробництва також залежить від просторового розташування робочих місць та їхніх груп на території виробництва. Оптимальним є таке розміщення робочих місць, яке забезпечує найкоротший маршрут переміщення предметів праці.

У виробничій діяльності переважно застосовуються два методи організації виробництва: *непотоковий і потоковий*.

Непотоковий метод притаманний для одиничного виробництва виробів із номенклатурою, що змінюється. Йому властиві такі ознаки:

- на робочих місцях обробляються різноманітні за конструкцією предмети праці з використанням різних технологій; їх кількість невелика, що не дозволяє завантажити устаткування;

- робочі місця розміщуються за однотипними технологічними групами, а робота на них здійснюється незалежно від послідовності виконання операцій;

- збільшені перерви між операціями через складний маршрут переміщення предметів праці;

- предмети праці знаходяться на проміжних складах до звільнення наступного в технологічному процесі робочого місця для виконання наступних операцій.

Залежно від кількості продукції та її номенклатури метод може мати різні модифікації. В умовах одиничного виробництва метод переважно реалізується у формі одиничного технологічного методу. Обробка предметів праці виконується поштучно або невеликими серіями. Метод може бути використаний і в серійному виробництві залежно від специфікації та лінійки продукції. У серійному виробництві цей метод може набувати форми партійно-технологічного або предметно-групового.

Потоковий метод організації виробництва вважається одним із найефективніших. Він є максимально наближеним до раціональної організації виробництва. Йому притаманні такі ознаки:

- операції обробки або складання однойменних елементів або обмеженої кількості конструктивно та технологічно подібних предметів закріплюються за групою робочих місць;

- робочі місця розміщені послідовно та відповідають протіканню технологічних процесів;

- на кожному робочому місці виконується одна або декілька подібних операцій;

- передача предметів праці здійснюється поштучно або невеликими партіями з одного робочого місця на інше, що забезпечує високий ступінь паралельності та безперервності виробництва.

При поточковому методі організації виробничого процесу здебільшого використовується транспортний конвеєр, який виконує функції переміщення предметів праці та регулювання ритму виробничого циклу. Поточкові методи дозволяють виготовляти продукцію у великих кількостях і протягом тривалого часу, тобто використовуючи великосерійне та масове виробництво.

Потокова лінія є основною складовою ланкою в поточковому виробництві, у якому елементи технологічно й організаційно пов'язані між собою. Виробничі лінії відрізняються залежно від галузі, до якої належить конкретне виробництво, та типу продукції, що виготовляється. Вони класифікуються за певними ознаками. За номенклатурою продукції їх поділяють на одно- та багатопредметні.

Лінія, на якій тривалий час обробляється чи складається виріб того самого типорозміру (телевізор, пральна машина, холодильник), називається *однопредметною*. Для переходу на випуск виробу іншого типорозміру необхідно провести переналагодження лінії (перустановлення обладнання або заміна окремих установок). Ці лінії переважно використовуються в масовому виробництві, особливо в легкій промисловості та у виробництві побутової техніки.

Багатопредметна потокова лінія – це лінія, на якій одночасно або послідовно виготовляється декілька виробів однакових типорозмірів зі схожою конструкцією та з використанням подібних технологій. Ці лінії здебільшого використовуються в умовах серійного виробництва на підприємствах легкої та харчової промисловості. За ступенем безперервності виробничого процесу потоки поділяються на безперервні та переривчасті.

Безперервною є лінія, на якій предмети праці переміщуються між окремими робочими місцями, дільницями та цехами за послідовністю операцій технологічного процесу виготовлення безперервно, без міжопераційного чекання.

Перервною вважається лінія, яка не забезпечує безперервність переміщення предметів праці через несинхронність виконання окремих операцій. Це призводить до виникнення перерв, під час яких предмети праці перебувають у черзі на виконання наступної операції технологічного процесу виготовлення, утворюючи періодично оборотні запаси.

За способом підтримання ритму розрізняють лінії з регламентованим і вільним ритмом.

На лініях із *регламентованим ритмом* предмети праці з операції на операцію передаються через чітко встановлений час, тобто витримується певний ритм. Регламентований ритм застосовується на безперервних лініях.

На лініях з *вільним ритмом* знаряддя праці з одного робочого місця на інше передаються за допомогою певної сигналізації (світлової, звукової) безпосередньо працівниками. Таким чином, загальний ритм залежить від стабільної роботи та продуктивності працівників першої операційної лінії.

Залежно від місця виконання операцій лінії поділяють на лінії з робочим конвеєром і лінії зі зняттям виробів із конвеєра для їхньої обробки.

Лінії з робочим конвеєром виконують функції транспортування та підтримування ритму, а також є безпосереднім місцем виконання операцій. До них належать складальні конвеєри.

Лінії зі зняттям виробів із конвеєра характерні для виробничих процесів, де операції виконуються на окремо встановленому устаткуванні.

За способом роботи (руху по виробничій лінії) конвеєри поділяються на конвеєри з безперервним рухом і конвеєри з пульсуючим рухом.

Конвеєри з постійним рухом мають сталу швидкість та не зупиняється під час реалізації виробничого процесу. *Конвеєр з пульсуючим рухом* є нерухомим під час виконання операцій. У дію він приводиться періодично, відповідно до такту лінії. Такі конвеєри використовуються у випадку, коли в процесі роботи над виробом необхідно забезпечити його нерухомий стан.

До основних параметрів потокових ліній можна віднести: такт, ритм, якість робочих місць, довжина робочих зон, швидкість руху конвеєра.

Такт потокової лінії – це інтервал часу, за який сходять з лінії виробу, що рухаються послідовно один за одним.

У процесі роботи безперервних потокових ліній можливі періодичні короточасні зупинки конвеєра (для обідньої перерви, міжзмінної перерви тощо).

Ритм потокової лінії – це інтервал часу, за який сходять з потокової лінії транспортна партія виробів того ж самого виду.

2.6. Види технологічних процесів та їхні особливості

Технологічним процесом називають частину виробничого процесу, яка складається з дій, спрямованих на зміну та (чи) визначення стану предмета праці. При реалізації технологічного процесу здійснюється зміна форми, розмірів та властивостей предметів праці (матеріалу чи напівфабрикату) з метою отримання виробу, властивості якого відповідають технічним вимогам до нього.

Технологічна операція – це закінчена частина технологічного процесу, яка виконується на одному робочому місці одним працівником (або групою працівників) безперервно над однією деталлю або складальною одиницею (над декількома деталями чи складальними одиницями). Технологічна операція є основним елементом виробничого планування, обліку й моделювання виробничих процесів. За операціями можна визначити трудомісткість і собівартість процесу, необхідну чисельність працівників та засобів технологічного оснащення.

Основні й допоміжні технологічні процеси та операції, що входять до їх складу, умовно поділяють (за аналогією з виробничими процесами) на *прості* та *складні*.

У *простих* технологічних процесах предмети праці послідовно піддаються низці операцій, послідовне виконання яких забезпечує отримання заготовок та деталей – нероз'ємних частин виробу.

Складні технологічні процеси забезпечують отримання готових продуктів праці через сполучення окремих деталей та складальних одиниць – здійснюється виготовлення складних виробів, наприклад, верстатів, машини тощо.

Отже, технологічний процес є сукупністю різноманітних операцій, виконання яких забезпечує зміну форм та розмірів предметів праці (заготовок, деталей, виробів) та їхніх властивостей, способів поєднання деталей у складальні одиниці та вироби, засобів контролю якості виконання робіт та дотримання технічних умов.

Технологічні процеси зварювального виробництва спрямовані на виробництво зварних конструкцій і являють собою сукупність фізико-хімічних і фізико-механічних процесів, призначених для перетворення матеріалів, заготовок і напівфабрикатів у готові вироби, які виконуються працівниками з використанням ручних інструментів, механізмів чи автоматичних пристроїв.

До складу технологічного процесу зварювального виробництва входять окремі робочі технологічні процеси: різання, механічна обробка та гнуття для отримання заготовок, складання заготовок, їх зварювання для отримання частин виробу або виробу загалом.

Особливості технологічних процесів різних способів зварювання приводяться у відповідних нормативно-технічних документах на них. Так, для способів зварювання плавленням використовуються розроблені

в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України стандарти серії ДСТУ ISO 3951-1 «Статистичний контроль. Процедури вибирання для перевірки за кількісною ознакою. Частина 1. Плани одиничного вибирання для послідовної перевірки партій з одиничною характеристикою якості та визначеною межею прийняття якості. Загальні технічні вимоги».

Наприклад, ДСТУ 3951.1 «Технічні умови та процедура підтвердження відповідності технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Частина 1. Загальні правила для зварювання плавленням» містить загальні правила стосовно виробництва зварних конструкцій із використанням звичайного зварювального устаткування, яке безпосередньо контролюється зварниками, тобто такий стандарт не використовується для автоматизованих та роботизованих процесів зварювання.

Технологічний процес зварювання визначається як такий (ДСТУ 3951.1), що встановлює порядок дій, якого необхідно дотримуватись під час виконання шва, у тому числі рекомендації щодо основного металу зварювальних матеріалів та їх підготовки, попереднього підігрівання (якщо необхідно), методу та контролю зварювання і термообробки після зварювання (якщо потрібно), а також щодо застосування устаткування.

Технологічний процес промислового виробництва металевих зварних конструкцій складається з таких робочих процесів:

- підготовчі операції;
- операції з обробки металу;
- складально-зварювальні операції;
- завершальні операції термічної, механічної або іншої розмірної чи стабілізаційної обробки;
- операції контролю якості виконаних робіт, випробування (за необхідністю, передбачається технічними умовами на виготовлення);
- фарбування та маркування.

Таким чином, технологічний процес виробництва металевих зварних конструкцій складається з окремих технологічних процесів:

- отримання заготовок із матеріалів;
- отримання деталей із заготовок шляхом розмірної обробки;
- складання та зварювання вузлів і виробів із деталей та/або вузлів;

- завершальної обробки (опоряджувальних робіт).

Способи контролю якості виконаних робіт на всіх етапах виробництва конструкцій регламентується відповідними технічними умовами.

Під час виготовлення деталей використовують такі операції: правка, очищення та підготовка поверхонь, розмітка, маркування, різання, згинання, штампування, механічна обробка тощо.

Основними процесами зварювального виробництва є технологічні процеси складання та зварювання. Їх можна поділити на такі операції: складання до зварювання, сумісні складально-зварювальні операції та зварювання окремих вузлів або виробу загалом.

На завершальному етапі виготовлення виконуються технологічні операції зачищення зварних швів та навколошовних зон від бризок, правка виробів, проковка, термічна обробка, нанесення захисних покриттів тощо.

Основні стадії всіх технологічних процесів зварювального виробництва супроводжуються виконанням допоміжних виробничих процесів, які можна поділити на дві групи: операції, безпосередньо пов'язані з основним виробництвом та операції з його обслуговування.

До першої групи операцій належать такі види робіт: зберігання та видача матеріалів, інструментів та пристроїв, виготовлення та налагодження технологічного оснащення, транспортування, контроль якості. До другої групи операцій – прибирання, ремонт тощо.

При здійсненні робітником кожної технологічної операції, він витрачає певну кількість праці. Ці витрати характеризуються тривалістю праці.

Трудомісткість операції – кількість часу, яка витрачається робітником необхідної кваліфікації за нормальної інтенсивності праці й у відповідних умовах на виконання технологічного процесу або його частини. Одиницею вимірювання є *людина-година (люд.-год)*. Разом із показниками трудомісткості застосовують поняття *машиномісткості* операції, одиницею вимірювання відповідно є *машино-година (маш.-год)*.

Технологічна норма – це регламентоване значення показника технологічного процесу. *Технологічне нормування* – це встановлення технічно обґрунтованих норм витрат виробничих ресурсів, таких як енергія, сировина, матеріал, інструмент, робочий час тощо.

Норма часу – це регламентований час виконання деякого обсягу робіт за певних виробничих умов одним або декількома виконавцями відповідної кваліфікації (ДСТУ 2391).

Норма виробітку – це регламентований обсяг роботи, яка повинна бути виконана за одиницю часу за певних організаційно-технічних умов одним або декількома виконавцями відповідної кваліфікації.

Одиницею вимірювання норми виробітку є кількість продукції в стандартних одиницях вимірювання (штуках, кілограмах тощо), вироблена за одиницю часу із зазначенням кваліфікації праці (100 шт. за зміну, робота 5-го розряду).

Рух предметів праці у виробничих процесах здійснюється таким чином, щоб результат праці одного робочого місця став початковим предметом праці для наступного робочого місця. Тобто кожне попереднє в часі й у просторі робоче місце забезпечує роботу наступному робочому місцю. Такий взаємозв'язок забезпечується організацією виробництва.

Існуюча на промислових виробництвах кінця ХХ ст. (Єдина система технологічної підготовки виробництва – ЄСППВ) на сьогодні трансформувалась в апробовані правила, які є основою для формування технологічних процесів на виробництвах. Ними передбачено порядок розробки технологічної документації та застосування в процесі виробництва типових технологічних процесів, стандартного оснащення та уніфікованого обладнання. Усе це дозволяє значно економити час на підготовку виробництва – у 2...2,5 рази.

Одна з основ формування виробничих технологічних процесів є Єдина система технологічної документації (ЄСТД), яка призначена для уніфікації методів, термінології та технологічних засобів.

Технологічна підготовка виробництва встановлює два типи технологічних процесів: *одиничний* і *типовий*. Ці види визначаються кількістю виробів, які охоплюються технологічним процесом (один виріб, група однотипних виробів, група різнотипних виробів).

Одиничний технологічний процес – це технологічний процес виготовлення однойменних виробів одного типорозміру та виконання незалежно від типу виробництва.

Типовий технологічний процес – це технологічний процес виготовлення групи виробів із загальними конструктивними та технологічними ознаками (ДСТУ 2391).

Типова технологічна операція характеризує послідовність технологічних переходів для виконання певної роботи над продуктом праці на робочому місці для групи виробів із загальними конструктивними та технологічними ознаками.

Типовий технологічний процес розробляється для виготовлення в конкретних виробничих умовах типового представника групи виробів, які мають спільні конструктивно-технологічні ознаки (ДСТУ 3321, ДСТУ 3278, ДСТУ 2391). *Типовим представником групи виробів* можна назвати виріб, який вимагає при обробці найбільшої кількості основних та допоміжних операцій, що притаманні для виробів цієї групи.

Типізація технологічних процесів здійснюється у двох пов'язаних між собою напрямках:

- типізація комплексних технологічних процесів виготовлення однотипних виробів;
- типізація та стандартизація окремих операцій обробки різних виробів.

Також типові технологічні процеси розрізняють як:

- оперативні, тобто такі, що відображають прогресивний стан технології на певний момент;
- перспективні, тобто такі, що передбачають подальше вдосконалення виробництва з урахуванням розвитку у сфері технології в майбутньому.

Однієї з прогресивних форм організації виробництва є *групове виробництво*. *Групою* називають сукупність об'єктів обробки, які під час реалізації цього процесу характеризуються використанням спільного устаткування (у тому числі спільного налагодження), оснащення, та технологічного процесу (операційного). Габаритні розміри об'єктів обробки беруться до уваги при створенні груп, оскільки габаритними розмірами визначаються типи устаткування та розміри технологічного оснащення. Також потрібно враховувати геометричну форму та матеріал заготовок, їхню точність, шорсткість поверхонь, серійність випуску об'єктів обробки та однорідність заготовок.

Групове виробництво формується на основі класифікації виробів, уніфікації технологічних процесів і подетально-групової спеціалізації виробничих систем і в умовах одиничного, дрібносерійного та серійного виробництва забезпечує можливість у повному обсязі врахувати та реалізувати характерні для масового виробництва принципи раціональної організації виробничого процесу. Групова організація виробництва характеризується спільним виготовленням виробів різної конфігурації на спеціалізованих робочих місцях, яка може бути потоковою чи непотоковою.

У великосерійному і масовому виробництвах метод групової обробки доцільно застосовувати за короткого циклу виготовлення виробу.

У груповому виробництві допускається використовувати декілька методів групування об'єктів обробки:

- за видами обробки;
- за спільністю технологічного маршруту;
- за операціями (які доцільні в умовах цього виробництва).

Формування уніфікованих (групових) технологічних процесів може базуватися на різних методах групування:

- за конструктивно-технологічною схожістю об'єктів обробки;
- за елементарними поверхнями об'єктів обробки (дозволяє встановити варіанти обробки цих поверхонь, а з комбінації елементарних процесів одержати технологічний процес обробки будь-якого об'єкта обробки);

- за переважаючими видами обробки об'єктів (за типами устаткування), за єдністю технологічного оснащення та спільністю налагодження устаткування.

Водночас у груповому технологічному маршруті деякі об'єкти чи їхні групи можуть пропускати окремі операції чи переходи.

Груповий технологічний процес – це технологічний процес виготовлення групи виробів із різними конструктивними, проте загальними технологічними ознаками.

Групова технологічна операція – це технологічна операція сумісного виготовлення групи виробів із різними конструктивними, проте загальними технологічними ознаками.

За рівнем деталізації опису змісту розрізняють:

- *маршрутний технологічний процес*; *маршрутний опис технологічного процесу* – це скорочений опис усіх технологічних

операцій у маршрутній карті відповідно до послідовності їх виконання без зазначення переходів і технологічних режимів;

- *операційний технологічний процес; операційний опис технологічного процесу* – це повний опис усіх технологічних операцій відповідно до послідовності їх виконання із зазначенням переходів та технологічних режимів;

- *маршрутно-операційний технологічний процес; маршрутно-операційний опис технологічного процесу* – це скорочений опис технологічних операцій у маршрутній карті відповідно до послідовності їх виконання, з повним описом окремих операцій в інших технологічних документах.

Питання для самоперевірки

1. Ієрархічна структура виробничих підрозділів підприємства.
2. Структурні складові основного виробництва.
3. Структурні складові допоміжного виробництва.
4. Структурні складові підсобного виробництва.
5. Структура управління виробництвом.
6. Робота відділу технічного контролю.
7. Принципи, які лежать в основі організації виробничих процесів.
8. Типи виробництв.
9. Потоковий та непотоковий методи організації виробництва.
10. Безперервні та перервні виробничі лінії.
11. Виробничі лінії з регламентованим та вільним ритмом.
12. Складові технологічного процесу виготовлення металевих зварних конструкцій.
13. Поняття про трудомісткість операцій.
14. Одиничний та груповий технологічні процеси.

РОЗДІЛ 3. ЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

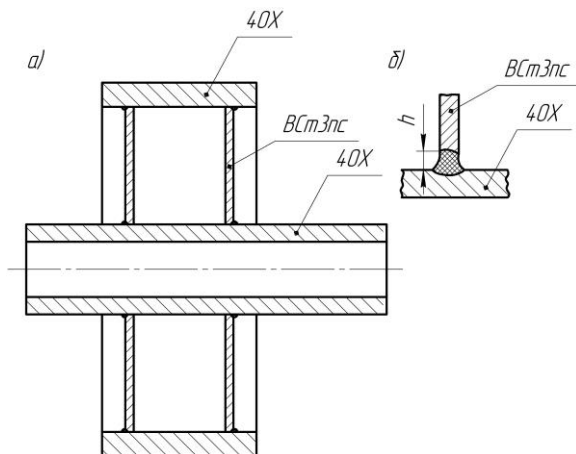
3.1. Взаємозв'язок зварної конструкції та технології її виготовлення

Переваги зварних конструкцій настільки очевидні, що сфера їхнього застосування безупинно розширюється. Вони використовуються в усіх галузях народного господарства. Масове впровадження прогресивних зварних конструкцій у промисловості, будівництві й на транспорті здійснюється замість клепанних і неекономічних литих, кованих та інших. У цих умовах недостатньо повне використання сучасних досягнень зварювальної техніки при виробництві зварних конструкцій призводить до підвищених витрат матеріалів і праці, що рівноцінно завдання значного збитку народному господарству нашої країни.

Водночас повнота використання створених зварюванням можливостей підвищення якості зварних конструкцій, властивостей матеріалів, зниження витрат праці, скорочення термінів виготовлення і збільшення випуску продукції з наявних виробничих площ – багато в чому залежить від якості проекту технологічного процесу виготовлення зварної конструкції. *Однак при цьому не можна забувати, що у зварних конструкціях матеріали, які використовуються, конструктивні форми і технологічні процеси взаємозалежні. Кожному матеріалу повинні відповідати свої конструктивні форми та своя технологія зварювання, кожному методу зварювання – визначені конструктивні форми. Також пов'язаними виявляються міцнісні та технологічні розрахунки.* Досить показовим у цьому відношенні може бути приклад виготовлення редукторного колеса.

На рис. 3.1, а наведена схема конструкції зварного зубчастого колеса редуктора, диски якого виконані з низьковуглецевої сталі ВСт3пс, а обід і вал – з легованої сталі марки 40Х. Конструкція сполучення дисків з ободом показана умовно у виді з'єднань упритул із двома кутовими швами. Щоб уникнути підкалювання навколошовної зони при зварюванні легованої сталі 40Х, необхідний її попередній підігрів. Сталь ВСт3пс підігріву не вимагає.

Якщо виходити з технологічних вимог, зумовлених обраною маркою матеріалу обода і вала, то обід з дисками й диски з валом необхідно зварювати при попередньому підігріві. Однак, якщо врахувати особливості конструкції і розташування обох зварних з'єднань, то виявиться, що така технологія припустима тільки для зварювання обода з дисками.



а – поперечний розріз; б – спряження диска з валом

Рисунок 3.1 – Схема конструкції редукторного колеса

Дійсно, підігрів обода перед зварюванням приведе до того, що зменшення його діаметра при остиганні після зварювання викликає стиск швів, що з'єднують обід з дисками, що позитивно відіб'ється на роботі цих швів, розтягнутих в умовах експлуатації. Якщо ту ж саму технологію застосувати до зварювання вала з дисками, то результат виявиться іншим. Попередньо нагрітий вал при остиганні після зварювання буде скорочуватися в діаметрі, що викликає напруження розтягу у швах, що з'єднують вал із дисками. За певних умов, що залежать від температури підігріву й розмірів конструкції, у зварних швах можуть з'явитися тріщини ще в процесі виготовлення колеса редуктора. Таким чином, та сама технологія зварювання, яка визначалася властивостями сталей, що зварюються, виявилася припустимою при одних швах конструкції і неприпустимою – при інших швах того ж типу.

Оскільки при виконанні швів, що з'єднують вал із дисками, попередній підігрів неприпустимий, то для того, щоб задовольнити вимоги, зумовлені особливостями матеріалу й конструкції, необхідно змінити як конструкцію з'єднання, так і технологію її виконання. Для того щоб зварювання диска з валом можна було виконувати без підігріву, у місцях сполучення з дисками вал повинен мати на поверхні матеріал, що не вимагає підігріву при зварюванні. Найпростіше це досягається наплавленням на вал буртиків (рис. 3.1, б) зі сталі, що не гартується. Це наплавлення можна виконати з попереднім підігрівом вала, а наступне зварювання дисків з буртиками вала – без його підігріву. Розмір h наплавленого буртика повинен бути таким, щоб при зварюванні його з диском температура нагрівання основного металу вала не досягала точки A_c1 , що гарантує відсутність структурних перетворень у металі вала.

З наведеного прикладу видно, що технологія, зумовлена властивостями двох матеріалів, що зварюються, може задовольнити вимоги міцності в одних умовах і не задовольнити їх в інших. Це залежить від положення зварного з'єднання в конструкції, що при прийнятій технології створює в ньому корисні напруження в одному випадку (з'єднання дисків з ободом) і шкідливі – в іншому (з'єднання дисків з валом). Тому технологію зварювання не можна обирати без обліку особливостей конструкції, так само як конструктивні форми не слід призначати без обліку вимог технології. Отже, найбільш раціонально конструктивні й технологічні питання можна вирішити тільки при спільній розробці проектів конструкції і технологічного процесу її виготовлення. Необхідна міцність зварних з'єднань і конструкцій досягається лише в результаті призначення розмірів окремих елементів з'єднання (наприклад, розмірів буртика) на підставі розрахунків, за допомогою яких можна не тільки оцінити діючі напруження від експлуатаційного навантаження, але й установити можливість запобігання утворення небезпечних крихких структур у навколошовних зонах з'єднання, тобто на підставі розрахунків міцності й технологічних розрахунків.

Тісний взаємозв'язок матеріалу, конструкції і технології при зварюванні змушує зробити ще один висновок: якщо до останнього часу технологія значною мірою була підпорядкована вимогам точності виконання конструкції і її вплив обмежувався питаннями

продуктивності праці, то нині вона може стати активним засобом підвищення працездатності зварної конструкції. Оскільки при цьому при вирішенні технологічних питань прийдеться втручатися в питання конструктивного оформлення, то одночасно можна більш повно використовувати конструктивні можливості для полегшення механізації виробничих операцій і підвищення продуктивності праці.

Масовість застосування зварних конструкцій вимагає подальшого їхнього удосконалення як у конструктивному, так і в технологічному відношенні. При цьому повинні вирішуватися дві основні задачі: підвищення працездатності зварної конструкції та зниження трудомісткості її виготовлення. Раціональна розробка технологічного процесу виготовлення зварної конструкції повинна сприяти вирішенню цих обох задач.

3.2. Вплив технології на трудомісткість зварних конструкцій

Трудомісткість виготовлення зварної конструкції і продуктивність праці залежать від того, які технологічні процеси використовуються для виробництва заготовок і окремих елементів зварної конструкції. Чим більш механізовані ці процеси, тим менше витрат праці потрібно на виготовлення зварної конструкції.

Якщо окремі частини конструкції різко відрізняються за своїми розмірами і конфігурацією одна від іншої, то для їхнього виготовлення найбільш вигідними можуть виявитися не тільки різні методи зварювання, але й інші високопродуктивні процеси лиття, кування, штампування тощо. Унаслідок того, що умови роботи окремих частин і конструкцій також можуть відрізнятися, вимоги до основного металу різних частин конструкції повинні бути різні. *Отже, найбільш економічною і найменш трудомісткою повинна виявитися конструкція, у якій деталі, що відрізняються за конфігурацією та характером роботи, виконані з різних матеріалів різними технологічними процесами. Така комбінована зварна конструкція більш економічна, ніж конструкція таких же розмірів, але виготовлена зі сталі однієї марки за допомогою одного технологічного процесу. Зокрема, комбінована зварна конструкція вигідніше великогабаритної, суцільнолитної чи цільнокованої конструкції. Заміна*

суцільнолитой чи цільнокованой конструкції на зварну з більш дрібних відливків чи поковок дає значний економічний ефект тому, що при виробництві дрібних відливків і поковок легше використовувати механізовані методи й одержати заготовки без дефектів із більш стабільними властивостями металу.

Таким чином, вибір раціонального технологічного процесу виробництва заготовок визначає трудомісткість зварної конструкції і її економічні показники. Наведемо кілька прикладів.

Ахтерштєвень для атомного криголама виконаний у вигляді зварної конструкції з окремих литих деталей (рис. 3.2). Чиста вага всього ахтерштєвня становить 82,3 т.

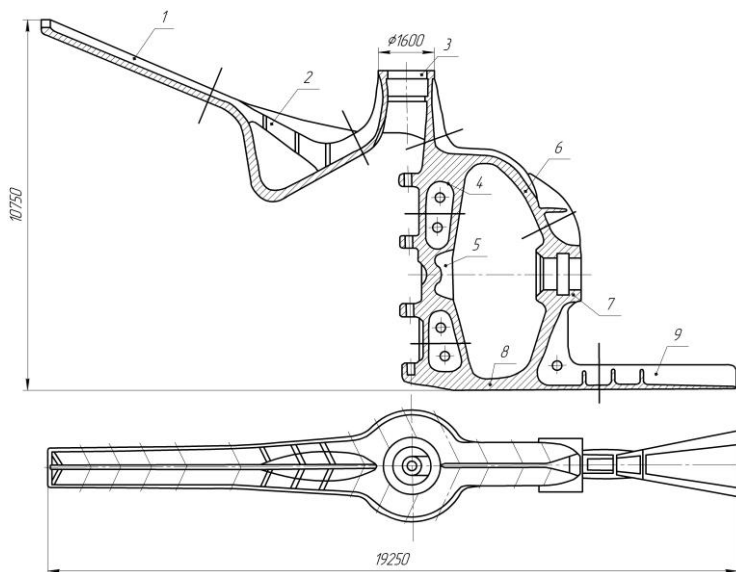


Рисунок 3.2 – Ахтерштєвень атомного криголама

Щоб виконати його суцільнолитим (для забезпечення монолітності), для заливання треба було б одноразово 135 т рідкого металу. Площа форми досягла б 240 м², а вантажність кранів на ділянках формування, заливання й обробки – 150 т. Виконання ахтерштєвня зварним з окремих литих заготовок дозволяє, забезпечуючи монолітність, знизити вагу рідкого металу (на найбільшу заготовку) до

25 т, площу форми – до 20 м², а вантажність кранів – до 50 т. Крім того, більш дрібні виливки можна виконати з більшою точністю, у той час як розміри великих виливків у процесі остигання у формі і при термічній обробці настільки спотворюються, що доводиться застосовувати дуже трудомістку операцію виправлення, що до того ж часто (при великих перерізах відливок) не дає потрібного результату.

Як показав досвід, уникнути помітного короблення відливки можна в тому випадку, якщо її довжина не більше як 4–5 м.

Отже, виготовляти ахтерштевень у виді суцільнолітої конструкції недоцільно. Також недоцільно було б виготовляти його у вигляді суцільнозварної конструкції з листового прокату. У цьому випадку для того, щоб одержати штевень необхідної форми, довелося б застосувати велику кількість дрібних деталей, вирізка яких із прокатного листа й наступне зварювання потребували б великої витрати праці.

Однак і прийнятий варіант конструкції не є оптимальним, тому що не всі дев'ять заготовок (1-9) доцільно виконувати литими. Як це видно з рис. 3.2, форма деяких заготовок (наприклад 1 і 9) настільки проста, що їх вигідніше виготовити з прокатних листів і профілів. Таким чином, у ряді випадків більш доцільною виявляється зварна конструкція, у якій литі заготовки сполучаються з деталями з прокату. Така конструкція показана на рис. 3.3.

Виготовлення великих суцільнозварних деталей переважно сполучене з великими відходами матеріалу, зі значною неоднорідністю властивостей металу в окремих частинах поковок, з обмеженнями за їхніми розмірами й вагою. Застосування замість поковок зварних конструкцій із листів і дрібних кованих заготовок приводить до великого економічного ефекту та підвищення якості конструкції. Так, на рис. 3.4 наведено ескіз вала турбіни, чиста вага якого становить 43,7 т. При виготовленні його за допомогою кування потрібно злиток вагою 200 т, причому відходи металу становлять 157 т, у тому числі стружки 68 т. При виготовленні цього вала з трьох поковок вага найбільшого злитка – 105 т, а відходи зменшуються до 88 т, у тому числі стружки 42 т. Застосування зварної труби з двох штампованих заготовок (замість однієї поковки) ще більше знижує витрати металу.

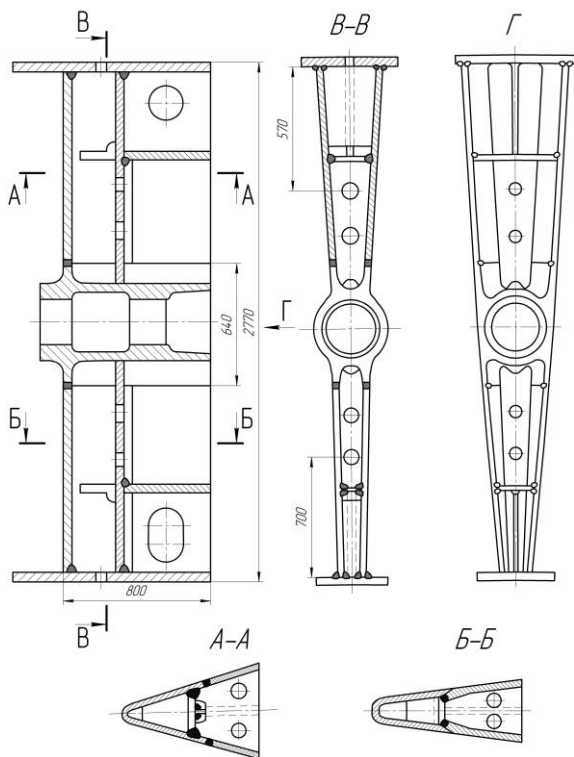


Рисунок 3.3 – Комбінована зварна конструкція з відливок і прокатних листів

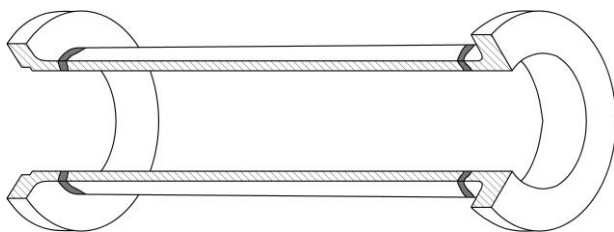
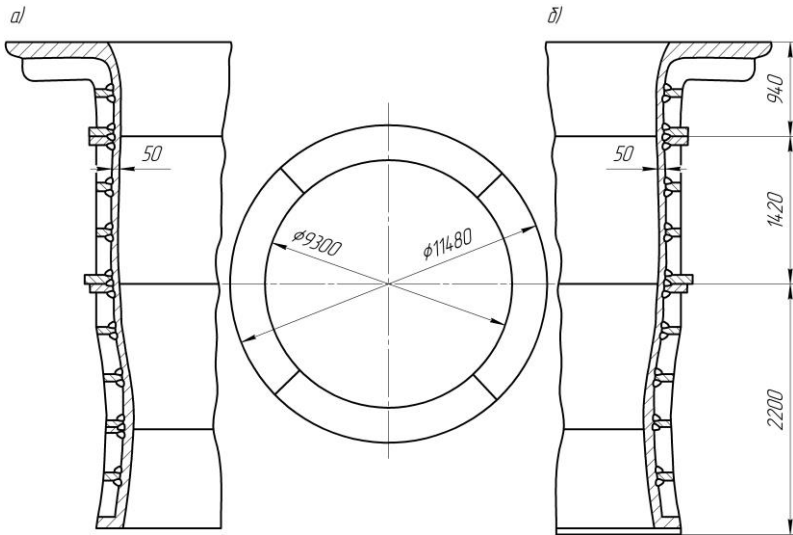


Рисунок 3.4 – Вал турбіни

При виготовленні комбінованих зварних конструкцій у багатьох випадках доцільно застосовувати заготовки, отримані за допомогою штампування чи гнуття. Так, наприклад, заставні фундаментні частини турбіни ГЕС (рис. 3.5) при виготовленні їх литими вимагали 169,9 т заготовок при чистій вазі конструкції 111,7 т.



а – з відливок; б – зварна конструкція

Рисунок 3.5 – Заставні частини турбіни

Виконання заставних частин у вигляді зварної конструкції зі штампованих деталей із використанням прокатних листів дозволило зменшити товщину стінок, знизити чисту вагу до 89,3 т, а вагу заготовок – до 96 т, скоротити обсяг механічної обробки та зменшити загальну трудомісткість механоскладальних робіт з 5510 до 3030 нормогодин. При цьому підвищилася кавітаційна стійкість фундаментних частин завдяки тому, що листи на внутрішній поверхні робочої камери зберегли прокатну кірку. Крім того, з'явилася можливість застосування штампованих заготовок із біметалевих листів, що забезпечить подальше підвищення стійкості фундаментних частин турбіни.

Як відзначалося вище, при виробництві заготовок для комбінованих зварних конструкцій доцільно застосовувати не тільки різні технологічні процеси, але й різні матеріали.

Прикладом зварної конструкції з різнорідних сталей може служити ротор газової турбіни (рис. 3.6).

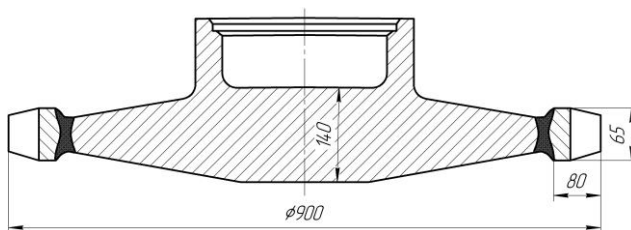


Рисунок 3.6 – Ротор газової турбіни

При роботі його периферійні частини піддаються дії високих температур і відносно невеликих механічних зусиль, а центральна частина, що з'єднується з валом, – дуже значним зусиллям при порівняно невисокій температурі. Підібрати матеріал, що однаково добре працює при високих температурах і здатний витримувати значні зусилля, досить важко. Тому технічно й економічно доцільно виготовити зварний ротор із двох частин: центральний диск – з високоміцної перлітної сталі, а периферійне кільце – із жароміцної аустенітної сталі. У цьому випадку створюються умови, що забезпечують повне використання властивостей матеріалів, які використовуються.

У багатьох випадках замість виготовлення зварної деталі з двох різних матеріалів здійснюється наплавлення на заготовку захисного шару, що значно підвищує експлуатаційні характеристики конструкції. Так, наприклад, застосування наплавлення при виготовленні прокатних валків дозволяє підвищити їхню довговічність у декілька разів, що призводить до зменшення витрати металу на прокатні валки й до підвищення продуктивності прокатних станів, унаслідок зменшення числа їхніх зупинок для заміни валків.

Для одержання максимального ефекту від зварної конструкції необхідно вибрати раціональну технологію не тільки для виробництва заготовок, але і для одержання із заготовок цілої конструкції.

Найкращі результати можна одержати при застосуванні автоматичного чи напіваавтоматичного зварювання. Продуктивність праці при застосуванні механізованих і автоматизованих методів зварювання набагато вище, ніж при ручному зварюванні, однак вибір методу й режиму автоматичного зварювання не повинен визначатися тільки його продуктивністю. Застосування високопродуктивного методу зварювання не повинне спричинити додаткові виробничі операції до чи після зварювання. Так, наприклад, продуктивність зварювання можна підвищити, якщо замість двопрохідного зварювання застосувати однопрохідне. Однак, якщо викликаний цим підвищений режим зварювання приведе до росту зерна в наволошовній зоні й буде потрібна термічна обробка після зварювання, то доцільність однопрохідного зварювання може виявитися сумнівною. У цьому випадку тільки при економічному порівнянні загальних витрат можна встановити, який варіант вигідніше: високопродуктивний метод зварювання, якщо є потреба в наступній термообробці, чи менш продуктивний, але без додаткової операції термообробки. Отже, при виборі методу зварювання необхідно виходити з вимоги зниження витрат праці не тільки на зварювання, але і на всі операції з виготовлення зварної конструкції.

Особливо важливо виключити чи хоча б максимально скоротити такі додаткові операції, як підрублювання кромок, які стикуються (для можливості застосування автоматичного зварювання), припасування при складанні недостатньо точних заготовок і вузлів конструкції, виправлення покороблених при зварюванні елементів і т. ін. Усі ці операції дуже трудомісткі й вимагають здебільшого ручної праці.

У зв'язку з цим необхідно висувати високі вимоги до точності заготовок і приділяти особливу увагу запобіганню зварювальних деформацій, тобто усувати основні причини, що викликають підрублювання і виправлення. Варто враховувати, що недостатня точність виконання окремих зварних вузлів конструкції не тільки викликає додаткові непродуктивні операції, але й утруднює механізацію операцій наступного складання та зварювання. Крім того, значні відхилення при зварюванні від проектних розмірів і форми змушують передбачати великі припуски на механічну обробку тих конструкцій, для яких ця операція обов'язкова. У свою чергу, великі

припуски на механічну обробку призводять не тільки до збільшення її обсягу, але й до зниження її точності, тому що в результаті механічної обробки виникають вторинні деформації, тим більші, ніж більше припуски на обробку. Варто також мати на увазі, що вторинні деформації, що виникають після виготовлення конструкції, викликаються не тільки механічною обробкою, але й зовнішнім експлуатаційним навантаженням. Усе це приводить до необхідності висувати високі вимоги до точності виготовлення зварної конструкції.

Виконання вимог підвищення точності зварних конструкцій і окремих її елементів і вузлів значно спрощується при використанні розрахункових методів визначення зварювальних деформацій. Вони дозволяють заздалегідь оцінювати величину деформацій, що виникають при зварюванні, і вибрати таку послідовність складальних і зварювальних операцій, при якій деформації не будуть виходити за межі допусків, установлюваних технічними умовами.

Оскільки зварювальні деформації залежать від конструктивних форм і геометричних розмірів деталей, то на підставі розрахунків можна вибрати такі форми й розміри різного роду конструктивних елементів (ребра, косинки, книці тощо), при яких деформації деталей практично будуть відсутні. У цьому випадку може призначатися мінімальна величина припусків на механічну обробку, що підвищить точність механічної обробки.

Можливість визначати розрахунковим шляхом не тільки деформації, що виникають при зварюванні конструкції, але і вторинні деформації, що викликаються експлуатаційним навантаженням, дозволяє в багатьох випадках уникати термічної обробки, яка проводиться з метою стабілізації розмірів зварної деталі й виключення їхньої зміни під дією зовнішніх сил.

Для підвищення точності виготовлення зварних конструкцій можуть бути використані складально-зварювальні пристосування, у яких конструкція отримує зворотний вигин. Однак різного роду механічні прийоми запобігання деформацій (закріплення, зворотні вигини й ін.) можуть дати позитивний ефект лише при визначених розмірах конструкції. Тому, щоб правильно використовувати механічні прийоми боротьби зі зварювальними деформаціями, необхідно розрахунковим шляхом заздалегідь оцінити ефективність цих прийомів

до конкретних умов. Це виключить у випадках малої ефективності спеціального оснащення витрати на його виготовлення, витрати праці на його використання і подовження термінів виготовлення конструкції, викликане проєктуванням і виготовленням спеціального оснащення.

Застосування розрахункових методів визначення деформацій сприяє підвищенню не тільки економічності, але і якості зварної конструкції, тоді як визнання неминучості зварювальних деформацій і наступного виправлення (ще зустрічається на деяких заводах) приводить до нехтування вимогами точності виготовлення, до погіршення технологічної дисципліни і, як наслідок, до зниження якості виготовлення зварної конструкції.

Таким чином, можна визнати, що технологія дуже впливає на трудомісткість зварної конструкції і на її економічність. При цьому питання точності мають вирішальне значення.

Розрахункові методи вибору режиму зварювання, визначення зварювальних деформацій, оцінки точності й інші технологічні розрахунки полегшують розробку проєкту найбільш раціонального технологічного процесу виготовлення зварної конструкції.

3.3. Вплив технологічного процесу виготовлення зварної конструкції на її працездатність

Технологічний процес виготовлення зварної конструкції визначає не тільки її економічні показники, але і її міцнісні характеристики. Це зумовлено тим, що при зварюванні відбувається зміна властивостей основного металу в навколошовній зоні, виникають деформації конструкції, створюється поле залишкових напружень. Усі ці зміни відбиваються на умовах роботи зварних з'єднань і можуть привести як до підвищення, так і до зниження працездатності зварної конструкції. Крім того, властивості металу зварних швів, від яких залежить їхня міцність, цілком визначаються обраними зварювальними матеріалами, режимом і технологією виконання зварювання.

Немає потреби доводити, наскільки небезпечні для міцності зварних конструкцій непровари і тріщини у зварних швах і як важливо при проєктуванні технологічного процесу виготовлення зварної конструкції приділяти належну увагу питанням формування зварних швів. Використання розрахункових методів визначення режиму

зварювання дозволяє вирішувати і питання формування шва, і питання отримання необхідних механічних характеристик і хімічного складу металу шва, що підвищує надійність зварної конструкції.

Не менш важливо при проектуванні технологічного процесу виготовлення зварних конструкцій враховувати вплив на міцність зварювальних деформацій. Перекручування форми зварної деталі чи зварного з'єднання, викликані деформаціями при зварюванні, можуть настільки змінити умови роботи з'єднання чи деталі, що розрахункові напруження, що визначають міцність, зростуть у кілька разів.

Як приклад розглянемо випадок руйнування зварної конструкції цементної силосної вежі.

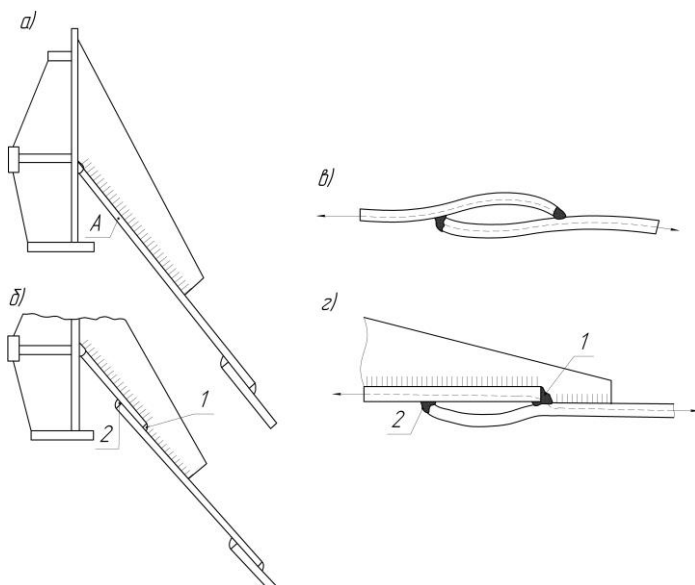
При проектуванні силосної вежі конструкція сполучення конуса з циліндричною частиною була передбачена згідно зі схемою, наведеною на рис. 3.7, а. Оскільки не виявилось необхідних розмірів листа А, його виготовили з двох частин (рис. 3.7, б), причому для цих сполучень був обраний той тип зварного з'єднання, що був прийнятий у проекті для сполучення окремих частин конуса (рис. 3.7, а). У результаті в межах кутової косинки з'явилося напусткове з'єднання (рис. 3.7, б).

У процесі експлуатації силосної вежі шов 1 (рис. 3.7, б) лопнув і обвалилась частина конуса. Цемент потік із силосної вежі у вигляді лавини, потужність якої виявилася достатньою для того, щоб перекинути паротяг, що стояв на шляхах, а швидкість була настільки велика, що людям, які знаходилися поблизу, довелося бігти, щоб не «потонути» у масі цементу.

Причиною аварії було нераціональне застосування напусткового з'єднання в межах кутової косинки. Зіставляючи два типи напусткового з'єднання, наведених на рис. 3.7, б, можна встановити, що з'єднання, розташоване за межами косинки, забезпечує спільну роботу обох кутових швів, так що кожний із них виявляється навантаженим половиною зусилля, переданого конусом. Такі умови роботи визначаються однаковою жорсткістю листів, що з'єднуються внапустку, й однаковим характером деформацій, викликаних зварюванням (рис. 3.7, в).

Розміщення з'єднання внапустку в межах кутової косинки приводить до того, що жорсткість листів, що з'єднуються, незважаючи на однакову їхню товщину, виявляється різною. Верхній лист, підкріплений косинкою, деформується при зварюванні менше, ніж нижній (рис. 3.7, г), унаслідок чого шов 2 виключається з роботи і все

зусилля передається на один шов 1. Через місцеві дефекти у шві 1, перевантаження якого вдвічі перевершувало розрахункове, його міцність виявилася недостатньою і призвела до аварії.



*а – по проєкту; б – змінене при виготовленні;
в, г – деформації з'єднання при рівній (в)
і при різній (г) жорсткості листів, що з'єднуються*

Рисунок 3.7 – Спряження конуса з циліндричною частиною вежі для цементу

Таким чином, той самий тип зварного з'єднання, цілком надійний в одних умовах, може виявитися ненадійним в умовах, що трохи змінились. Тому без достатнього аналізу міцності неприпустимо вводити при виготовленні нові зварні з'єднання, навіть того ж типу, що і прийняті в проєкті, а тим більше заміняти один тип зварного з'єднання іншим. Водночас при проєктуванні технологічного процесу виготовлення зварної конструкції часто доцільно змінити тип зварного з'єднання, щоб спростити виготовлення і поліпшити його роботу. Такого роду зміни завжди повинні супроводжуватися глибоким аналізом умов роботи зварного з'єднання як у процесі виготовлення, так і в умовах експлуатації.

Великий вплив на працездатність зварної конструкції може робити напружений стан, викликаний зварюванням. Так, наприклад, відомо, що різна послідовність виконання швів монтажного стику двотаврової балки може істотно змінити витривалість балки при дії вібраційного навантаження. У випадку, коли першими виконувалися стики поясів, а останнім – стик стінки (рис. 3.8, а), балка витримала 1 200 000 циклів; при зворотній послідовності (коли в останню чергу зварювалися стики поясів) така ж за розмірами балка (рис. 3.8, б) витримала лише 650 000 змін навантаження.

Виникнення у другому випадку в поясах залишкових реактивних напружень розтягу помітно знизило витривалість балки. При першій схемі виконання швів у поясах були створені напруження стиску, що підвищили витривалість.

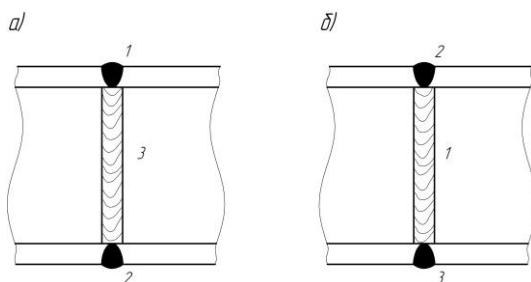


Рисунок 3.8 – Два варіанти послідовності виконання зварних швів монтажного стику двотаврового перерізу

Облік напруженого стану, що виникає при зварюванні, необхідний не тільки для того, щоб запобігти небезпечному зниженню працездатності. Такий облік необхідний і для того, щоб можна було забезпечити підвищення працездатності конструкції технологічними засобами.

Так, наприклад, створення поля додаткових напружень шляхом місцевого нагрівання чи накладення холостих валиків дозволяє підвищити витривалість конструкції, що має концентратори напружень.

Таким чином, від якості проекту технологічного процесу виготовлення зварної конструкції і повноти використання в ньому всіх можливостей, створюваних зварювальною технікою, залежить працездатність зварної конструкції та її економічні показники.

Отже, необхідно так організувати розробку проекту, щоб можна було задовольнити вимоги, що забезпечують високу його якість.

3.4. Загальні вимоги до проєкту технологічного процесу виготовлення зварної конструкції

3-поміж вимог, які повинен задовольняти проєкт технологічного процесу виготовлення зварної конструкції, основними є такі.

Насамперед повинно бути забезпечене комплексне опрацювання всіх питань, зв'язаних із виготовленням зварної конструкції. Неприпустимо обмежуватися розробкою технології тільки зварювальних операцій, тому що при оцінюванні якості й економічності зварної конструкції повинні враховуватися всі виробничі операції, що виконувалися при її виготовленні. При цьому варто пам'ятати, що будь-яке зниження вимог до якості виконання різних операцій на перших етапах виготовлення конструкції, несприятливо відіб'ється на якості виконання наступних етапів, а виправлення дефектів, що виникли на перших етапах, буде тим складніше і дорожче, ніж пізніше воно буде здійснюватися. Так, наприклад, неточності заготовок призведуть до неякісного складання, що спричинить появу дефектів у зварних швах і неточність зварної конструкції. Якщо зробити економічне порівняння витрат на виправлення дефектів, викликаних неточністю розмірів заготовки, то виявиться, що дешевше виправити заготовки перед складанням, чим виправляти недоліки складання, викликані дефектами заготовок. Якщо ж спробувати виправити дефекти, викликані неякісними заготовками, у готовій зварній конструкції, то виявиться, що це або неможливо, або потребуватиме дуже великих витрат. Найдешевшим виявиться виготовлення зварної конструкції з точних якісних заготовок. Тому зниження вартості виробництва заготовок за рахунок зниження їхньої якості – це завжди виявиться дорожчим рішенням.

Вибір найбільш раціонального технологічного процесу виготовлення зварної конструкції повинен здійснюватися на підставі аналізу декількох варіантів технологічного процесу. Зіставлення варіантів дозволить висунути нові, у яких можуть бути усунуті недоліки й об'єднані позитивні сторони початкових варіантів. Під час оцінювання варіантів необхідно надавати їхню технічну й економічну характеристики, що доповнюють одна одну. Не слід вибирати варіант технологічного процесу, ґрунтуючись тільки на економічних чи тільки на технічних показниках, – в обох випадках він виявиться неповноцінним.

Для характеристики й оцінки різних варіантів технологічного процесу потрібні не тільки якісні, але й кількісні показники. Такі показники повинні ґрунтуватися на об'єктивних даних для кожного варіанта. Як було зазначено вище, цими даними повинні бути: точність конструкції, трудомісткість її виготовлення, витрата матеріалів. Для цього повинні бути обрані оптимальні режими зварювання, оцінені сумарні деформації конструкції, встановлена витрата потрібних матеріалів і т. ін. Через достатність факторів, що впливають на ці показники, неможливо уможливити оцінити вплив кожного з них. Досвід виготовлення аналогічних конструкцій теж не може дати надійних підстав для вибору оптимального технологічного процесу, тому що при виготовленні аналогічних конструкцій переважно різні розміри елементів, режими зварювання і розташування зварних швів, що здійснює дуже великий вплив на поведінку конструкції при зварюванні. У деяких випадках для відпрацювання технології зварювання виготовлялися досвідні конструкції. Однак це занадто дорогий і тривалий спосіб вибору оптимального технологічного процесу і, крім того, умови виготовлення досвідних конструкцій усе-таки відрізняються від виготовлення реальних конструкцій. Найбільш зручними, дешевими й об'єктивними є розрахункові методи проектування технологічних процесів виготовлення зварних конструкцій. На підставі розрахунків можуть бути обрані режими зварювання, що забезпечують задані властивості металу шва й навколошовної зони основного металу, визначені зварювальні деформації й оцінена ефективність тих чи інших способів боротьби з деформаціями, можуть бути підраховані витрати зварювальних матеріалів тощо. За допомогою розрахунків може бути уточнений ступінь впливу різних факторів на працездатність конструкції, що зварюється. Тому при проектуванні обрані технологічні процеси виготовлення зварних конструкцій повинні супроводжуватися розрахунками.

Застосування розрахункових методів при проектуванні технологічних процесів полегшує також проектування самих конструкцій. При цьому вибір конструктивних рішень може бути обґрунтований рівною мірою як розуміннями міцності, так і розуміннями технологічності. Таким чином, створюються передумови для переходу до конструкторсько-технологічного проектування зварних конструкцій, що буде сприяти подальшому удосконаленню як самих конструкцій, так і технологічних процесів їх виготовлення.

Питання для самоперевірки

1. Сутність взаємозв'язку зварної конструкції та технології її виготовлення.
2. Сутність технологічних розрахунків для призначення окремих розмірних параметрів конструкції.
3. Вплив технологічного процесу виробництва заготовок на трудомісткість виробництва зварних конструкцій.
4. Переваги використання комбінованих зварних конструкцій, які виготовляються з різних матеріалів.
5. Вибір раціональної технології зварювання для одержання із заготовок цілої конструкції.
6. Пояснити необхідність дотримання точності виготовлення на всіх етапах виробництва зварної конструкції.
7. Пояснити перевагу використання розрахункових методів визначення величини зварювальних деформацій для забезпечення економічності виготовлення зварної конструкції.
8. Приклад впливу деформації зварних з'єднань на працездатність зварної конструкції.
9. Приклад впливу напруженого стану, викликаного зварюванням, на працездатність зварної конструкції.
10. Загальні вимоги до проекту технологічного процесу виготовлення зварної конструкції.

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

4.1. Вимоги до технологічного процесу виготовлення зварної конструкції

Серед різноманітних вимог, що ставляться до технологічного процесу виготовлення зварної конструкції, особливе значення мають вимоги: мінімальних витрат праці, мінімальних термінів виготовлення, максимальної механізації й автоматизації виробничих процесів і максимальної точності виготовленої конструкції. Усі ці вимоги взаємозалежні. Наприклад, без механізації процесів виготовлення, без застосування автоматичних методів зварювання не можна підвищити продуктивність праці й забезпечити мінімальні витрати праці. Без скорочення трудомісткості технологічного процесу виготовлення зварної конструкції, без виключення всякого роду додаткових операцій на зразок виправлення, підрублювання й інших, не можна скоротити терміни виготовлення конструкції. Без підвищення точності виготовлення заготовок, зварних вузлів і елементів, складання деталей і загального складання не тільки не можна досягти необхідної точності готової зварної конструкції, але й не можна виконати жодну з перерахованих вище основних вимог до технологічного процесу. Недостатня точність заготовок і окремих елементів стає на перешкоді використання механізованих і автоматизованих методів складання і зварювання, вимагає застосування додаткових операцій підрублювання кромки, що зварюються, і правки зварних елементів і цілих конструкцій, веде тим самим до зайвих витрат праці й подовжує терміни виготовлення конструкції.

Таким чином, точність виготовлення зварної конструкції на всіх етапах, починаючи від виробництва заготовок і закінчуючи загальним складанням і зварюванням цілих конструкцій, є винятково важливою загальною вимогою, від виконання якої залежать і технічні, і економічні показники якості технологічного процесу виготовлення зварної конструкції.

Задоволення вимог точності виготовлення багато в чому залежить від того, якою мірою відвернені залишкові зварювальні деформації.

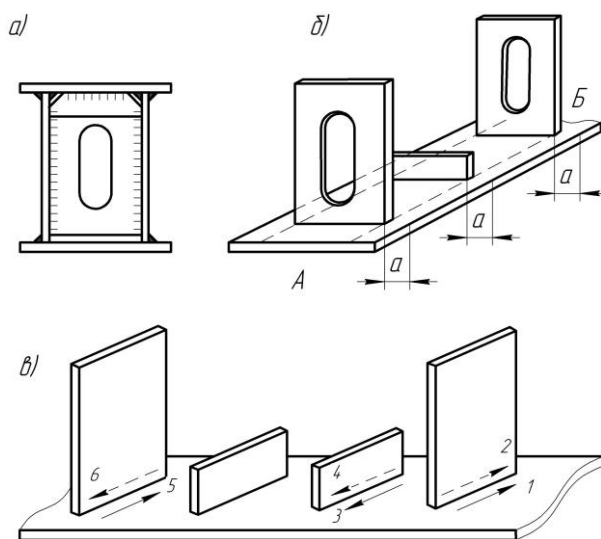
На теперішній час при виготовленні зварних конструкцій звичайно вживаються заходи боротьби зі зварювальними деформаціями. Ці заходи спрямовані або на запобігання залишкових укорочень і скривлень конструкції, або на виправлення деформованої в результаті зварювання конструкції. Очевидно, що виправлення не може бути віднесене до прогресивної технології виготовлення зварної конструкції, не тільки тому, що є дуже трудомісткою і здебільшого ручною операцією, але й тому, що в більшості випадків приводить до місцевих погіршень властивостей матеріалу, до створення невизначеного поля залишкових напружень чи до перекручування форми і розмірів інших, що не піддавалися виправленню елементів конструкції. Усе це знижує експлуатаційні характеристики конструкції і може понизити її працездатність і довговічність. Тому основним напрямом боротьби зі зварювальними деформаціями повинні бути заходи запобігання залишкових деформацій.

Деформації конструкції запобігають шляхом вибору такої послідовності складання і зварювання, при якій деформації, викликані одними швами, врівноважуються деформаціями зворотного знаку, що викликаються іншими швами. У деяких випадках застосовують зворотні вигини й закріплення, створюють початковий напружений стан, використовують припуски тощо.

Однак, як вказувалося вище, поряд із деформаціями, що виникають при зварюванні, істотний вплив на точність конструкції здійснюють деформації, викликані недостатньою якістю складальних операцій. При цьому часто відхилення від проєктних розмірів конструкції, що виникли через незадовільну якість складання, помилково вважають такими, що виникли від зварювання. Природно, що в цьому випадку будь-які заходи боротьби зі зварювальними деформаціями не можуть підвищити точність виготовленої конструкції.

Як приклад того, як впливає якість складання і вибір методу складання на кінцеві деформації конструкції, можна навести такий випадок. При виготовленні зварної балки коробчастого перерізу (рис. 4.1, *а*) із внутрішніми діафрагмами була обрана така послідовність складання і зварювання. На горизонтальний лист верхнього поясу встановлювалися вертикальні діафрагми і приварювалися до поясу (рис. 4.1, *б*). Потім встановлювалася одна

вертикальна стінка, приварювалася поясними швами до поясу, поверталася на 90° і приварювалася до діафрагм. Після цього встановлювалися і приварювалися друга вертикальна стінка і нижній пояс. Зварна балка мала прогин у плані й вісь верхнього поясного листа (середина між вертикальними стінками) виявилася скривленою. Отриманий прогин намагалися пояснити зварювальними деформаціями. Аналіз технології складання показав, що при установці діафрагм за базову лінію приймали кромку поясного листа (припускаючи її прямолінійною) і діафрагми розташовували на відстані a від кромки (рис. 4.1, б).



a – поперечний переріз; б – установка вертикальних діафрагм на верхньому поясі; в – послідовність (1–6) і напрямок зварювання швів, що приєднують діафрагми до верхнього поясу

Рисунок 4.1 – Схема етапів складання та зварювання балки коробчастого перерізу

Насправді кромка поясного листа виявилася непрямолінійною і діафрагми, розташовані на однакових відстанях від кромки, зафіксували вигин вертикальних стінок у плані, а отже, і вигин у плані всієї балки. Якби діафрагми встановлювалися так, як це потрібно, – по шнуру, натягнутому по лінії AB , то стінки й балка від складання не

одержали б скривлень. Для того щоб поясний лист не скривився від приварки до нього діафрагм, варто чергувати напрямок зварювання на окремих ребрах і діафрагмах (шви 1, 2, 3, 4 на рис. 4.1, в) чи напрямки швів на кожній діафрагмі чи ребрі (шви 5, 6 на рис. 4.1, в).

Деформації, викликані складанням, виникають не тільки в результаті таких грубих порушень нормальної технології складання, як це було в прикладі, приведеному вище, але й у результаті недостатньої точності заготовок, мінливості зазорів у стиках тощо. Порушення звичайних правил складання можуть вплинути і на деформації, викликані зварюванням. Так, кінцеві деформації зварної конструкції можуть істотно змінитися, якщо при складанні допускається насильне припасування листів, що стикаються, примусове підтягування одна до одної деталей, що зварюються, тощо. Будь-яке насильне припасування при складанні викликає в деталях, що складаються, початкові напруження стиску чи розтягу, що призводять до зміни величини зварювальних деформацій: на деяких (стиснутих) ділянках шва деформації від зварювання зростають, тоді як на інших (з початковими напруженнями розтягу) – вони зменшуються. У результаті з'являються незакономірні місцеві деформації, що порушують розміри й форму виробу, боротьба з якими внаслідок їхньої незакономірності надзвичайно утруднена. Наявність у зібраних деталях початкових напружень, викликаних насильним припасуванням при складанні, знижує ефективність таких засобів боротьби з деформаціями як зворотний вигин, що застосовується для компенсації деформацій, викликаних зварюванням.

З огляду на те, що основним засобом одержання необхідної точності конструкції є правильно розроблений технологічний процес складання і зварювання, розглянемо вплив окремих його елементів на залишкові деформації зварної конструкції.

4.2. Вплив послідовності складання на залишкові деформації від зварювання

Вплив послідовності виконання складання на деформації від зварювання різноманітний залежно від того, якими засобами з'єднують окремі деталі між собою при складанні. Зазвичай складання здійснюється на так званих жорстких прихватках, коли деталі, що зварюються, з'єднують одна з одною короткими зварними

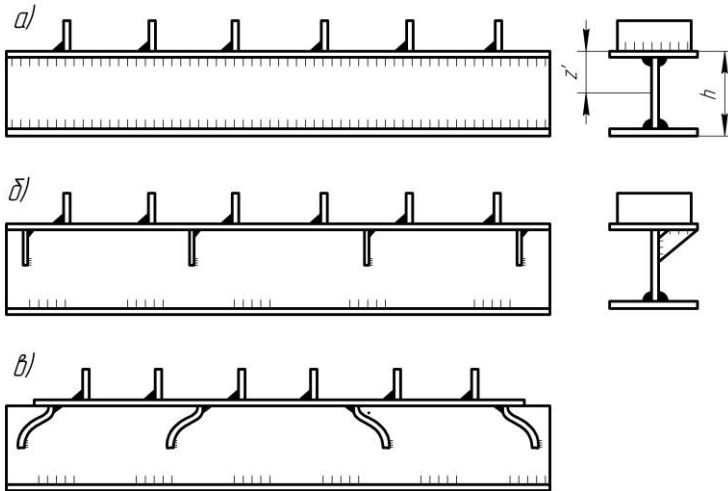
швами – прихватками. У цьому випадку деталі, що зварюються, виявляються з'єднаними між собою настільки жорстко, що їх можна розглядати як одну загальну деталь, а зварний шов – як валик, що накладається на цю деталь. Зумовлені при цьому деформації будуть залежати від загального моменту інерції і площі всього перерізу (а не від площі і моментів інерції окремих деталей) і від розташування зварного шва відносно центра ваги загального складеного перерізу.

У деяких випадках застосовують так названі еластичні прихватки, які дозволяють ту чи іншу деталь, приєднану до загального перерізу, виключати з деформацій перерізу при зварюванні. У цьому випадку при накладенні шва на елемент, що складається з двох частин, кожна з яких зібрана на жорстких прихватках, і з'єднаних між собою еластичними прихватками, деформуватися буде лише та частина, на яку накладається шов, а не весь елемент. Друга частина, відділена від першої еластичними прихватками, деформуватися не буде.

Так, наприклад, якщо треба виготовити балку, до поясу якої повинні бути приварені поперечні ребра (рис. 4.2, а), то при складанні на жорстких прихватках приварка ребер до верхнього поясу викликала б деформації подовжнього укорочення і вигину всієї балки. При визначенні величини деформацій потрібно було б у розрахункові формули вводити момент інерції J і площу перерізу F всього двотавра. Так само величина z' визначалася б як відстань від центра ваги поперечних швів до центра ваги перерізу балки, тобто $z' = h/2$.

Якби верхній пояс був приєднаний до стінки еластичними прихватками у вигляді планок, прихоплених до стінки й поясу на достатній відстані від місця сполучення стінки й поясного листа (рис. 4.2, б), то приварювання поперечних ребер до верхнього поясу привела б до укорочення верхнього поясного листа, але не викликала б деформацій стінки і нижнього поясу, зв'язаних між собою жорсткими прихватками. У цьому випадку еластичні прихватки не перешкоджали б укороченню верхнього поясу, тому що планки, якими приєднаний верхній пояс до стінки, зігнулися б, як це схематично показано на рис. 4.2, в. Якщо при схемі складання по рис. 4.2 першим виконувався б поясний шов, що з'єднує нижній пояс зі стінкою, то деформації від цього шва визначалися б жорсткістю тільки таврового перерізу, утвореного вертикальною стінкою і нижнім поясом, а не жорсткістю всієї двотаврової балки.

Будь-які інші засоби кріплення деталей при складанні повинні бути віднесені або до жорстких або до еластичних прихваток, якщо неможливо більш точно оцінити їхній вплив залежно від їх конструктивного оформлення.



*а – схема балки; б – схема складання на еластичних прихватках;
в – характер деформації еластичних прихваток
у результаті приварки ребер*

*Рисунок 4.2 – Схема складання і зварювання балки
з поперечними ребрами на верхньому поясі*

Розглянемо вплив послідовності складання на деформації від зварювання. Як вказано вище, деформації від зварювання залежать від площі F і моменту інерції J перерізу того елемента, на який накладається зварний шов, і від відстані z' від центра ваги шва до центра ваги перерізу елемента. Тому, якщо який-небудь складний елемент складати та зварювати в різній послідовності, то в загальному випадку залишкові деформації від зварювання будуть різні.

Так, наприклад, несиметричний двотавровий переріз можна виготовити при трьох різних послідовностях чергування складальних і зварювальних операцій (при застосуванні жорстких прихваток):

- зварювання двотавра після повного складання стінки з поясами;

- складання нижнього поясу зі стінкою, зварювання тавра, що утворився, складання його з верхнім поясним листом і зварювання поясного шва;

- складання верхнього поясного листа зі стінкою, зварювання тавра, що утворився, складання його з нижнім поясним листом і зварювання поясного шва.

Неважко бачити, що в момент виконання кожного поясного шва площа й момент інерції того перерізу, на який він накладався, були різними, так само як і відстань від центра ваги шва до центра ваги перерізу.

Нижче, у табл. 4.1, наведені дані про величини F , J і z' при різній послідовності складання і виконання кожного з двох поясних швів несиметричного двотаврового перерізу.

Таблиця 4.1 – Величини F , J і z' при різній послідовності складання та зварювання

№ шва	Характеристики перерізу	Варіанти послідовності складання та зварювання		
1	F	65	45	50
	J	10555	4685	5200
	z'	16,2	9,8	8,8
2	F	65	65	65
	J	10555	10555	10555
	z'	13,8	13,8	16,2

З табл. 4.1 видно, що розходження в залишкових деформаціях при різній послідовності складальних і зварювальних операцій зумовлено тільки різницею в характеристиках тих перерізів, на які накладалися зварні шви.

Тому тільки такі розходження послідовності складання і зварювання можуть позначатися на деформаціях, при яких змінюються характеристики перерізу деталей, що зварюються.

Якщо ж при різних послідовностях складання і зварювання характеристики перерізу не змінюються, то залишкові деформації матимуть однакову величину.

Так, наприклад, у випадку виготовлення розглянутої вище балки з поперечними ребрами по верхньому поясу (рис. 4.2, *a*) ці ребра можна встановити при загальному складанні перед зварюванням, але можна й після того, як сама балка буде вже зварена. Оскільки в обох випадках геометричні характеристики перерізу балки не змінюються, то залишкові деформації балки, виготовленої обома методами, будуть однакові. Щоб виключити деформації балки від швів, що приварюють поперечні ребра, необхідно або до загального складання приварити поперечні ребра до верхнього поясного листа, або складання верхнього поясного листа зі стінкою виконувати на еластичних прихватках.

4.3. Вплив послідовності накладення зварних швів на деформації конструкції

Різна послідовність накладення зварних швів на той чи інший елемент конструкції призводить до різного напруженого стану цього елемента, а отже, і до різних залишкових деформацій. Однак, як показав досвід, часто з достатньою для практики точністю можна застосовувати розрахунки, що не враховують початкового напруженого стану, викликаного попередніми швами. У цьому випадку порядок накладення зварних швів не буде робити впливу на залишкові деформації, якщо конструкція зібрана на жорстких прихватках.

Виникає питання, у яких випадках можна вести розрахунок за спрощеними формулами без обліку початкового напруженого стану і, отже, не зв'язуючи послідовність виконання окремих швів якими-небудь вимогами. Через складність процесів, що викликають деформації, і численності факторів, що впливають на їхню величину, важко вибрати прості критерії, що дозволяють установити, чи потрібно враховувати початкові напруження при розрахунках деформацій чи початковими напруженнями можна нехтувати. Однак для грубого орієнтування можна скористатися такими міркуваннями.

Очевидно, що застосовувати більш точні розрахунки й уточнювати послідовність накладення окремих швів необхідно лише тоді, коли очікувані деформації перевершують припустиму величину. Однак і в цьому випадку використовувати послідовність накладення

зварних швів для зменшення загальних деформацій можна лише тоді, коли створюваний попередніми швами напружений стан призводить до помітних змін деформацій від наступних швів у порівнянні з деформаціями, одержуваними за розрахунками, які не враховують початкових напружень.

Спробуємо оцінити, у яких випадках при застосуванні спрощених розрахунків (без обліку початкового напруженого стану) можна чекати значних зварювальних деформацій. При цьому будемо розглядати лише деформації вигину елемента, тому що, з огляду на послідовність накладення швів, можна регулювати головним чином ці деформації.

Стрілка прогину елемента f , що виникає від накладення того чи іншого поздовжнього чи поперечного шва, становить:

$$f = C \frac{l^2}{8},$$

де C – кривизна елемента, викликана поздовжніми чи поперечними швами;

l – довжина елемента.

При поздовжньому шві

$$C = \mu q_n \frac{z'}{J},$$

при поперечних швах

$$C = \mu' q_n \frac{z'}{J} \cdot \frac{B}{a},$$

де q_n – погонна енергія зварювання;

B – довжина поперечного шва;

a – відстань між поперечними швами по довжині елемента;

$\mu = -0,335 \frac{\alpha}{c\gamma}$ (для низьковуглецевих сталей $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ та

$c\gamma = 1,14 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

$\mu' = (1...3)\mu$.

Якщо на елемент накладається один поздовжній шов, то

$$f = \mu q_n \frac{z'}{J} \cdot \frac{l^2}{8},$$

чи

$$\frac{f}{l} = \mu q_n \frac{z'}{J} \cdot \frac{l}{8}. \quad (4.1)$$

Для того щоб прогин не перевершував заданої величини, повинно бути:

$$q_n \leq 2,26 \cdot 10^6 \frac{f}{l} \cdot \frac{J}{z'l}. \quad (4.2)$$

Якщо прийняти, як це встановлено деякими технічними умовами й нормами, припустиму величину

$$\frac{f}{l} = \frac{1}{750},$$

то

$$q_n \leq \frac{3000}{z'} \cdot \frac{J}{l}. \quad (4.3)$$

З наведеного виразу видно, що чим більше погонна жорсткість елемента і чим менша відстань швів від центра ваги перерізу, тим легше при великих значеннях погонної енергії зберегти необхідну точність елемента.

При застосуванні q_n значно меншої величини, чим зумовлена за формулами (4.2) чи (4.3), очевидно, нема потреби не тільки робити уточнені розрахунки, але і взагалі перевіряти деформації, тому що вони не будуть перевищувати припустимих величин.

При значеннях q_n близьких до критичних варто перевірити, яке значення можуть мати початкові напруження, якщо на елемент накладають кілька швів.

При великих значеннях $\frac{q_n}{F}$ питання про використання уточнених розрахунків повинне вирішуватися залежно від абсолютної величини q_n і ступеня задоволення нерівностей (4.2) та (4.3).

Для складних профілів із багатьма поздовжніми швами у виразах (4.2) та (4.3) замість z' варто підставити середнє значення відстані центра ваги швів, розташованих по одну та по іншу сторону від центра ваги перерізу, а при поздовжніх і поперечних швах – суму середньої величини $z'_{\text{сер.пов.}}$ поздовжніх швів і подвоєної середньої величини $z'_{\text{сер.пос.}}$ поперечних швів:

$$z' = z'_{\text{сер.пов.}} + 2z'_{\text{сер.пос.}} \frac{B}{a}.$$

Тут коефіцієнтом 2 враховується підвищене значення коефіцієнта μ для поперечних швів, а відношенням $\frac{B}{a}$ – довжина поперечних швів і відстань між ними.

При складанні на еластичних прихватках ігнорувати послідовністю накладення зварних швів не можна, незалежно від того, чи буде розрахунок вестися за наближеними чи уточненими формулами. Дійсно, якщо стосовно до конструкції, наведеної на рис. 4.2, б, першим накласти поясний шов, що з'єднує верхній поясний лист із вертикальною стінкою, то весь ефект застосування еластичних прихваток пропаде. Тому для одержання бажаного ефекту від еластичних прихваток, необхідно насамперед виконати шви, що прикріплюють поперечні ребра до верхнього поясного листа, а вже потім виконувати поясні шви в такій послідовності, яка була б найкращою для балки без поперечних ребер.

Крім послідовності виконання зварних швів, у багатьох випадках необхідно враховувати й напрямок зварювання при виконанні окремих швів. Так, якщо при наплавленні ряду валиків на смугу (рис. 4.3) усі їх виконувати в одному напрямку, то смуга зігнеться по кривій 3-2-1-0-1'-2'-3'.

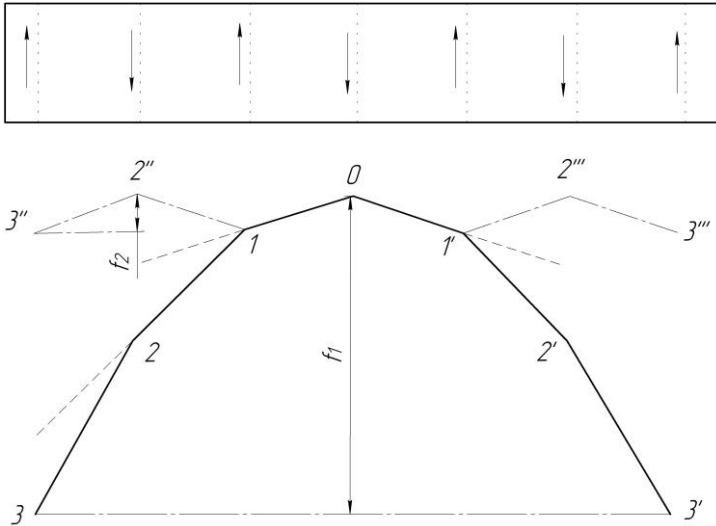


Рисунок 4.3 – Схема деформацій смуги при наплавленні на неї поперечних валиків

Якщо ж чергувати напрямки зварювання окремих швів, як показано стрілками на рис. 4.3, то деформації вигину значно зменшаться, а характер скривлень буде наближатися до ламаної лінії 3''-2''-1-0-1'-2'''-3'''.

4.4. Вплив конструктивного оформлення зварних елементів на залишкові деформації від зварювання

Поряд із технологічними засобами підвищення точності зварної конструкції дуже велике значення має конструктивне оформлення окремих елементів і сполучень. Не зупиняючись тут на вимогах, пропонуваніх до вибору загальних конструктивних форм (які передусім диктуються експлуатаційними розуміннями, умовами міцності та необхідної працездатності конструкції), варто розглянути вплив на точність конструкції форми, розмірів та розташування зварних швів і таких деталей, що вибирають звичайно за конструктивними розуміннями.

Вплив погонної енергії при виконанні кутових швів пропорційний квадрату катета кутового шва. Отже, будь-яка зміна катета шва вище за необхідний за умовами міцності значення призведе до підвищення

погонної енергії (при однопрохідних швах) і до збільшення деформацій від цього шва. Якщо за умовами міцності потрібний розрахунковий катет $k_{роз}$, а буде прийнятий катет $k_{np} > k_{роз}$, то деформації f , викликані виконанням шва з катетом k_{np} , зростуть проти f_0 , що були б при катеті $k_{роз}$, у відношенні

$$\frac{f}{f_0} = \frac{k_{np}^2}{k_{роз}^2} = \left(\frac{k_{np}}{k_{роз}} \right)^2.$$

При цьому необхідно мати на увазі, що через відсутність належного контролю за дотриманням плюсових допусків, катети кутових швів на виробництві виконуються переважно завищеними в порівнянні з проектними. Це стосується головним чином малокаліберних швів. Так, обстеження декількох заводів показало, що при проектних розмірах катета в 3 мм – дійсні катети становлять у середньому 5,6 мм, тобто їхні розміри перевищують проектні приблизно в 1,9 раза. При $k_{np} = 4$ мм – перевищення становить 1,8, при $k_{np} = 5$ мм – 1,5, а при $k_{np} = 6$ і 8 мм – не перевищує 1,03. Таким чином, ще на етапі проектування катети кутових швів можуть бути завищені, а надалі на виробництві вони зростають ще більше, що призводить до значного збільшення деформацій конструкції. Тому при проектуванні необхідно приймати мінімальні катети кутових швів, зумовлені розрахунками міцності чи встановлювані за технологічними можливостями того чи іншого методу зварювання.

Розміри швів по довжині також не повинні бути завищеними, тому що поздовжні укорочення і вигин елемента, що зварюється, залежать від довжини як поздовжніх, так і поперечних швів.

У тих випадках, коли розташування швів може в деяких межах варіюватися, варто розташовувати шви таким чином, щоб їхній центр ваги був якомога ближче до центра ваги перерізу.

При приварюванні елементів набору чи нерозрахованих конструктивних деталей, коли застосовуються мінімальні технологічно здійсненні шви, варто обмежуватися одnobічними кутовими швами. Застосування двосторонніх швів того ж мінімального калібру призведе до підвищення деформацій. Водночас, якщо за розрахунками міцності потрібний одnobічний шов значного катета, то може виявитися більш вигідним застосування двостороннього шва.

Припустимо, що мінімальний катет дорівнює 4 мм, а сумарна погонна енергія q_{n2} при двосторонніх швах перевищує погонну енергію q_{n1} одностороннього шва того ж катета на 25 % ($q_{n2} = q_{n1}$). Тоді погонна енергія, яка витрачається на виконання двостороннього шва мінімального катета, становитиме:

$$q_{n_{\min}} = 1,25 \cdot \theta \cdot 0,4^2 = 0,2 \cdot \theta,$$

де θ – коефіцієнт пропорційності, який залежить від способу дугового зварювання.

Погонна енергія при виконанні одностороннього шва катетом k становитиме:

$$q_n = \theta \cdot k^2.$$

Для того щоб погонна енергія при виконанні одностороннього шва не перевищувала мінімальну погонну енергію при двосторонніх швах, необхідно витримати рівність:

$$\theta \cdot k^2 = 0,2 \cdot \theta,$$

звідки

$$k = 0,45 \text{ см.}$$

Отже, якщо з розрахунку потрібні односторонні шви катетом менше ніж 5 мм, їх варто виконувати односторонніми. Якщо з розрахунку потрібні односторонні шви з катетами від 5 до 8 мм, їх варто виконувати двосторонніми з катетом 4 мм. Лише в тому випадку, коли за розрахунком потрібні односторонні шви з катетами понад 8 мм, варто застосовувати двосторонні шви з катетами понад 4 мм.

Застосування переривчастих швів з метою зменшення деформацій і підвищення точності можна виправдати лише в тому випадку, якщо катет переривчастого шва не перевищує 5 мм і якщо відстані між швами становлять не менше ніж 10 катетів.

При цьому необхідно враховувати, що найвигіднішим з погляду зменшення деформацій є однобічний переривчастий (ланцюговий) шов. Дійсно, стрілка прогину f тавра, викликана переривчастим швом, становить:

$$f = C \frac{l^2}{8} = \frac{\mu z'}{8J} l^2 q_n \frac{m}{t},$$

де l – довжина тавра;

m – довжина провареної ділянки;

t – крок переривчастого шва.

При постійних розмірах тавра його прогин залежить від умовної погонної енергії $q_n \frac{m}{t}$, тобто при постійному катеті кутового шва від

показника переривчастості шва $\frac{m}{t}$. Тому при тих самих розмірах

проварених ділянок, але при двосторонньому переривчастому шві умовна погонна енергія зростає на 20-40 % (як при двосторонніх швах). Якщо ті ж проварені ділянки двостороннього шва розташувати в шаховому порядку, то умовна погонна енергія буде виражена величиною $2,0 q_n \frac{m}{t}$, яка в двічі більше за погонну енергію

одностороннього переривчастого шва і при $\frac{m}{t} = \frac{1}{2}$ дорівнює погонній енергії безперервного одностороннього шва.

У зв'язку з тим, що розташування швів дуже впливає на деформації конструкції, довільний вибір розмірів та розміщення конструктивних елементів дозволяє так розташувати зварні шви, які прикріплюють ці елементи, щоб деформації, викликані цими швами, могли компенсувати деформації, викликані основними швами. Так, наприклад, при виготовленні балки несиметричного двотаврового перерізу виникає її вигин з опуклістю з боку широкого поясу. Якщо для підтримки широкого поясу встановлюють косинки (рис. 4.4), то розміри цих косинок повинні підбиратися так, щоб деформації від швів, що їх прикріплюють, могли виправити двотавр.

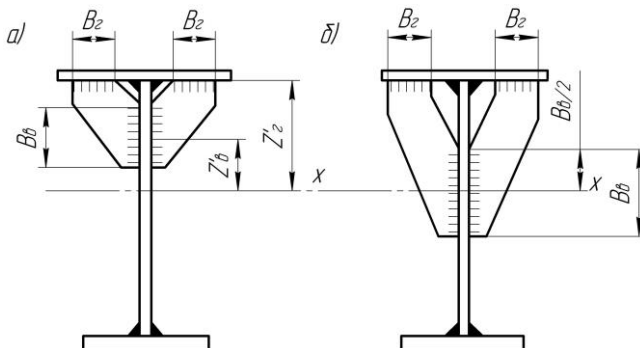


Рисунок 4.4 – Варіанти конструктивних форм і розмірів косинок

Для цього можна вибрати такі розміри косинок і швів, щоб кривизна, яка ними викликається, дорівнювала залишковій кривизні C_0 балки від основних поясних швів, тобто

$$\mu'_6 q_n \frac{z'_6}{J} \cdot \frac{B_6}{a} + \mu'_z q_n \frac{z'_z}{J} \cdot \frac{2B_z}{a} = C_0,$$

де μ'_6 і μ'_z – коефіцієнти для поперечних швів;

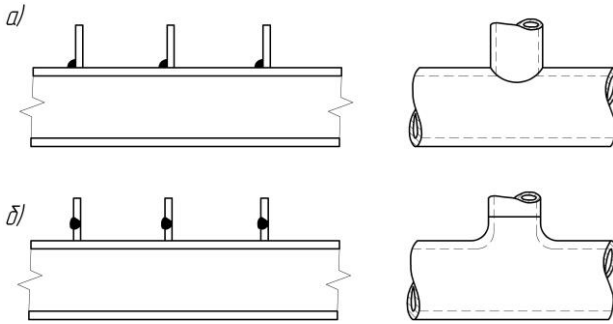
a – відстань між косинками;

z'_6, z'_z, B_6, B_z – відстані від центрів ваги горизонтальних і вертикальних швів до центра ваги перерізу та їхньої довжини відповідно до рис. 4.4, а.

Якщо кривизна від вертикальних і горизонтальних швів, що прикріплюють косинки, перевищить величину C_0 , то, змінюючи розміри швів і величину погонної енергії, можна зменшити вплив окремих швів. На рис. 4.4, б показаний обрис косинок, при якому вертикальні шви не викликають деформацій вигину, тому що їхній центр ваги сполучений із центром ваги перерізу, і отже, деформації викликаються тільки горизонтальними поперечними швами. При цьому варто пам'ятати, що, незначно змінюючи катет кутового шва, можна помітно змінювати величину погонної енергії, що пропорційна квадрату катета.

Таким чином, належним вибором розмірів, форми й розташування конструктивних елементів і швів, що прикріплюють, можна у широких межах регулювати деформації конструкції, забезпечуючи їй необхідну точність.

Варто також звернути увагу ще на одну деталь конструктивного оформлення, що може значно зменшити деформації і підвищити точність конструкції. Якщо, наприклад, до якогось елемента конструкції повинні бути прикріплені окремі дрібні деталі, що не змінюють моменту інерції перерізу елемента, то їх безпосереднє приварювання викликає вигин елемента (рис. 4.5, а). Для запобігання або зменшення вигину доцільно приварювати ці деталі до відповідних виступів на елементі (рис. 4.5, б).



а – безпосередньо до елемента; б – до виступів на основному елементі

Рисунок 4.5 – Схеми приварювання додаткових деталей до основного елемента

Тоді деформації значною мірою будуть погашені в межах виступу й не перейдуть на елемент. Аналогічну дію можуть зробити виточки при сполученнях масивних конструкцій з тонкостінними (рис. 4.6).

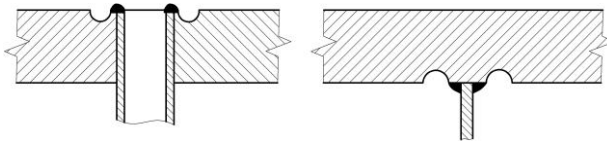


Рисунок 4.6 – Застосування виточок при з'єднанні тонкостінних деталей з масивними конструкціями

Зрештою, одна з істотних умов одержання мінімальних залишкових деформацій конструкції – максимальне скорочення кількості зварних швів. Ця вимога рівносильна вимозі зменшення кількості окремих деталей у зварних конструкціях. Є різноманітні

можливості виконання цих вимог: насамперед заміна зварних ребристих елементів гофрованими; застосування гнутих тонкостінних профілів замість зварних; виготовлення зварних конструкцій із литих, кованих, штампованих і гнутих просторових заготовок. Використання всіх цих можливостей дозволяє одночасно скоротити обсяг зварювальних робіт і зменшити величину залишкових деформацій.

4.5. Вибір оптимального варіанта технологічного процесу виготовлення зварної конструкції

Для того щоб вибрати найбільш раціональний технологічний процес виготовлення зварної конструкції, необхідно розробити декілька його варіантів і зіставити їхні позитивні й негативні сторони. Критеріями для оцінки варіантів повинні служити трудомісткість і зручність робіт, можливість застосування механізованих і автоматизованих методів зварювання і інші. Але, як було відзначено вище, найбільш загальним критерієм оцінки різних варіантів технологічного процесу складання і зварювання є точність конструкції. Від досягнутої точності окремих заготовок, елементів, вузлів і конструкції загалом залежить можливість використання механізованих методів зварювання без підрублювання кромки при складанні і без виправлення покорблених при зварюванні елементів і цілих конструкцій.

Якщо зручність робіт із різних варіантів технологічного процесу можна оцінити лише на підставі суб'єктивної думки технолога-проектувальника, то точність конструкції, що досягається при різних варіантах, об'єктивно можна установити на підставі розрахункового визначення деформацій.

Розглянемо варіанти технологічного процесу виготовлення зварної балки, переріз якої складається зі швелера та горизонтального листа, підкріпленого вертикальними косинками (рис. 4.7, *a*). Припустимо, що обрані режими зварювання дозволяють вести розрахунок деформацій за спрощеними формулами без обліку напруженого стану від попередніх швів. Тоді, при складанні на жорстких прихватках всіх елементів перерізу, кінцеві деформації не будуть залежати від того, які шви будуть виконуватися в першу чергу.

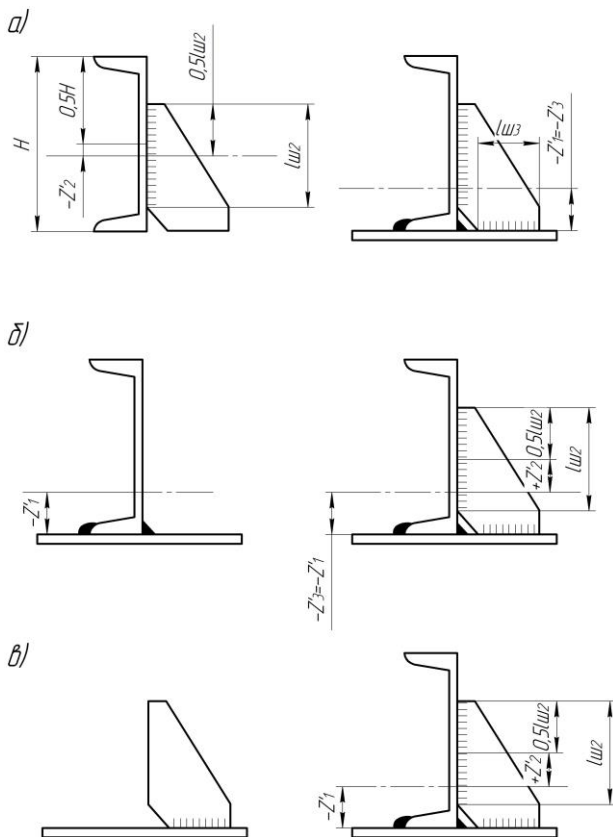


Рисунок 4.7 – Варіанти послідовності складання і зварювання балки

Оскільки довжина елемента в усіх варіантах залишається незмінною, то деформації можна характеризувати не стрілкою прогину, а величиною кривизни, викликану тим чи іншим швом.

Кривизну елемента, викликану накладенням по всій його довжині поздовжнього шва на режимі, що характеризується величиною погонної енергії q_n , можна виразити за допомогою залежності:

$$C = \mu q_n \frac{z'}{J},$$

і, відповідно, кривизну від поперечних швів – за допомогою виразу:

$$C = \mu' q_n \frac{z'}{J} \cdot \frac{l_w}{a},$$

де μ і μ' – коефіцієнти, що залежать від теплофізичних властивостей матеріалу, причому $\mu' = (1 \dots 3)\mu$;

z' – відстань від центра ваги шва до лінії центрів ваги перерізу, причому величина z' вважається позитивною, якщо центр ваги шва розташований між центром ваги перерізу та кромкою, на якій визначається прогин; в інших випадках величина z' вважається негативною;

J – момент інерції перерізу елемента;

l_w – довжина поперечного шва;

a – відстань між поперечними швами.

Якщо в першу чергу приварити до швелера вертикальні ребра, то вертикальні поперечні шви викликають вигин швелера, зумовлений кривизною

$$C_2 = \mu'_2 q_{n_2} \frac{-z'_2}{J_{шв}} \cdot \frac{l_{w_2}}{a},$$

де $J_{шв}$ – момент інерції одного швелера.

Наступне приварювання швелера й косинки до горизонтальної плити викликає вигин швелера, зумовлений кривизною (рис. 4.7, а)

$$C_1 + C_3 = \left(\mu q_{n_1} \frac{-2z'_1}{J_1} + \mu'_3 q_{n_3} \frac{-z'_3}{J_1} \cdot \frac{l_{w_3}}{a} \right),$$

де J_1 – момент інерції перерізу, складеного зі швелера й горизонтальної плити.

Сумарна кривизна балки від виконання усіх швів становитиме:

$$\Sigma C = C_1 + C_2 + C_3 = - \left(\mu q_{n_1} \frac{2z'_1}{J_1} + \mu'_2 q_{n_2} \frac{z'_2}{J_{шв}} \cdot \frac{l_{w_2}}{a} + \mu'_3 q_{n_3} \frac{z'_3}{J_1} \cdot \frac{l_{w_3}}{a} \right).$$

Кривизна від усіх трьох швів позитивна, оскільки коефіцієнти μ і μ' мають знак мінус, тому верхня полиця швелера одержить опуклість.

У випадку, коли швелер приварюють до горизонтального листа в першу чергу, а потім встановлюють і приварюють вертикальні ребра (рис. 4.7, б), z'_1 і z'_3 мають знак мінус, а z'_2 – знак плюс, тому що в результаті приварювання швелера до листа центр ваги всього перерізу змістився вниз. У зв'язку з цим центр вертикального поперечного шва виявився по іншу сторону від лінії центрів ваги елемента. У результаті сумарна кривизна буде мати величину

$$\begin{aligned} \Sigma C &= C_1 - C_2 + C_3 = \mu q_{n_1} \frac{-2z'_1}{J_1} + \mu'_2 q_{n_2} \frac{+z'_2}{J_1} \cdot \frac{l_{w_2}}{a} + \mu'_3 q_{n_3} \frac{-z'_3}{J_1} \cdot \frac{l_{w_3}}{a} = \\ &= \frac{1}{J_1} \left(-2\mu q_{n_1} z'_1 + \mu'_2 q_{n_2} z'_2 \frac{l_{w_2}}{a} - \mu'_3 q_{n_3} z'_3 \frac{l_{w_3}}{a} \right), \end{aligned}$$

тобто буде менше, ніж при складанні за варіантом, наведеним на рис. 4.15, а.

Якщо ж спочатку приварити до горизонтального листа вертикальні ребра (рис. 4.7, в), то таке приварювання не викликає деформацій швелера, тому що він ще не встановлений. Наступне приварювання швелера до горизонтального листа і ребер призведе до того, що кривизна від горизонтальних швів буде протилежна за знаком кривизні від вертикальних поперечних швів, тобто сумарна кривизна становитиме:

$$\Sigma C = C_1 - C_2.$$

Якщо тими чи іншими засобами зрівняти значення C_1 і C_2 , то сумарна кривизна буде дорівнювати нулю, і швелер буде прямолінійним. Можливість досягнення рівності $C_1 = C_2$ стане явною, якщо представити її в розгорнутому вигляді, використовуючи для цього наведені вище формули. Після підстановки виразів для кривизни від поздовжнього і від поперечного шва одержимо наступну умову прямолінійності верхньої поверхні швелера:

$$\mu q_{n_1} \frac{2z'_1}{J_1} = \mu'_2 q_{n_2} \frac{z'_2}{J_1} \cdot \frac{l_{w_2}}{a}.$$

Як видно з цього виразу, для досягнення нульових деформацій можна використовувати і технологічні, і конструктивні заходи. Величиною погонної енергії можна варіювати у широких межах при порівняно невеликих змінах катетів кутових швів, оскільки погонна енергія пропорційна квадрату катета кутового шва.

Змінюючи висоту вертикального ребра, можна змінювати довжину вертикального шва l_{w2} і відповідно величину z'_2 , у той час як величина z'_1 залишається при заданих розмірах швелера і листа незмінною. Крім того, можна в деяких межах змінювати відстань a між ребрами. Отже, варіюючи розмірами й розміщенням ребер, можна забезпечити прямолінійність швелера.

Таким чином, у результаті аналізу декількох варіантів технологічного процесу складання і зварювання можна вибрати такий, що призводить би до мінімальних деформацій. Однак якщо за тими чи іншими виробничими міркуваннями більш бажаним виявиться інший варіант, то і його шляхом внесення деяких конструктивних змін можна довести до придатного стану. Так, наприклад, у конструкції, що розглядалася вище, найбільш бажаним за виробничими міркуваннями є варіант виготовлення, при якому спочатку складають усю конструкцію, а потім зварюють її. Нескладно побачити, що цей варіант технології призведе до таких же деформацій, що і розглянутий вище варіант на схемі рис. 4.7, в. Зменшивши до допустимої величини сторону ребра, якою воно спирається на горизонтальний лист, і відповідно змінивши вертикальний розмір косинки, можна домогтися того, що величина деформації не буде перевищувати її значення при варіанті технології, наведеному на рис. 4.7, в.

Отже, використовуючи розрахунковий метод визначення деформацій, можна проаналізувати різні варіанти технології складання та зварювання і вибрати такий з них, що буде прийнятний як за виробничими та економічними міркуваннями, так і за міркуваннями точності й не вимагатиме застосування яких-небудь спеціальних заходів усунення зварювальних деформацій.

При спільному конструкторсько-технологічному проектуванні зварних конструкцій розрахунки підвищення точності конструкції не викликають ускладнень і не вимагають значного часу, оскільки багато

даних про геометричні характеристики перерізів можна взяти готовими з розрахунків на міцність. Крім того, при декількох варіантах зазвичай досить розрахувати один-два варіанти, тому що при оцінці інших можна використовувати вже раніше виконані розрахунки.

На рис. 4.8, *a* показаний загальний вид плоскої палубної секції, набір якої складається зі шпангоутів таврового перерізу й поздовжніх ребер жорсткості. Виготувати секцію можна за трьома схемами складання і зварювання: I – повне складання, після чого виконують усі зварні шви; II – складання і зварювання шпангоутів з обшивкою, після чого заводять і приварюють поздовжні ребра (рис. 4.8, *b*); III – складання і зварювання поздовжніх ребер з обшивкою, після чого встановлюють і приварюють шпангоути (рис. 4.8, *в*).

Якщо оцінювати три схеми складання і зварювання за деформаціями шпангоутів, то нескладно бачити, що при другому варіанті (рис. 4.8, *b*) шпангоути одержать прогин і від приварювання їх до обшивки, і від приварювання ребер до обшивки. При цьому прогини будуть додаватись, тому що вони одного знака $f_{II} = f_1 + f_2$.

При застосуванні третього варіанту складання і зварювання (рис. 4.8, *в*) перша операція складання і зварювання ребер з обшивкою не викликає прогину шпангоутів, і лише на другому етапі складання і зварювання шпангоути одержать прогин f . Таким чином, при третьому варіанті складання і зварювання сумарний прогин шпангоутів становитиме:

$$f_{III} = 0 + f_1 = f_1.$$

При першому варіанті – повному складанні і наступному зварюванні – сумарний прогин буде той же, що і при другому варіанті:

$$f_I = f_1 + f_2.$$

Таким чином, за величиною деформацій шпангоутів третій варіант найвигідніший.

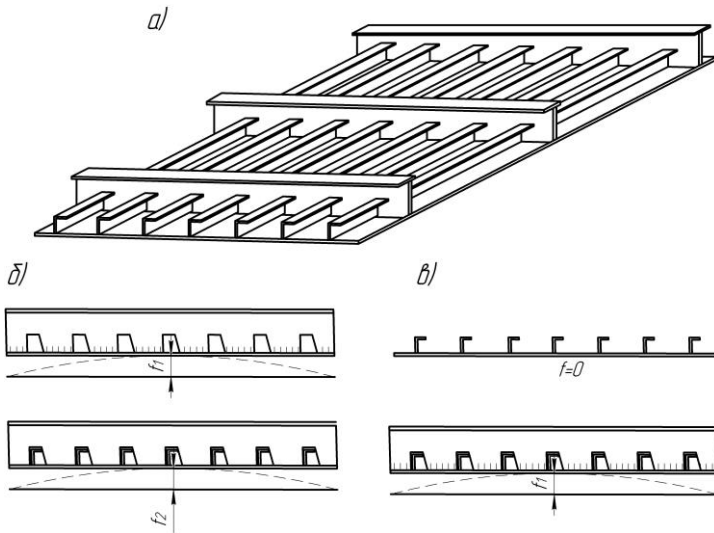
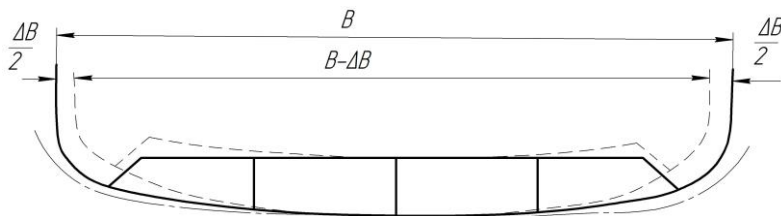


Рисунок 4.8 – Варіанти складання та зварювання палубної секції

З наведеного випливає, що, визначивши розрахунком деформації f_1 і f_2 , можна оцінити всі три варіанти послідовності складання і зварювання та вибрати найбільш раціональний.

У багатьох конструкціях, наприклад, при виготовленні днищевих секцій корпусу судна, деформації вигину можуть призвести до зменшення ширини корпусу, що знизить водотоннажність судна (рис. 4.9).



————— проєктний обрис; - - - - - попередній розвал;
 - - - - - обрис секції після зварювання без попереднього розвалу

Рисунок 4.9 – Забезпечення проєктної форми днищевій секції шляхом попереднього розвалу

Якщо відповідним вибором послідовності складання і зварювання не можна запобігти зменшенням ширини корпусу, то слід при складанні секції заздалегідь додати їй великі розміри по ширині (дати розвал), з відповідною зміною розмірів «постілі», у якій складається секція (на рис. 4.9 змінений обрис «постілі» показаний пунктиром із крапками). Припуск по ширині й обрису шаблонів для виготовлення «постілі» повинні бути визначені розрахунком деформацій секції.

Аналогічно деформації поздовжнього укорочення секції повинні бути компенсовані припуском по довжині.

Таким чином, розрахунок деформацій дозволяє шляхом вибору відповідного варіанта складання і зварювання витримувати розміри конструкції в заданих допусках меж.

У певних випадках може виявитися, що варіант технологічного процесу, що задовольняє вимогам точності виготовлення, неприйнятний за іншими міркуваннями: унаслідок більшої трудомісткості, через неможливість застосування автоматичних методів зварювання тощо. У цих випадках вдаються до різних штучних прийомів підвищення точності, щоб навіть при неоптимальній послідовності складання і зварювання забезпечити необхідну точність конструкції.

Питання для самоперевірки

1. Пояснити взаємозв'язок мінімальних витрат праці, мінімальних термінів виготовлення, максимальної механізації та автоматизації виробництва з точністю виготовлення конструкції.
2. Вплив порушення нормальних технологій складання на деформації зварних конструкцій.
3. Вплив послідовності складання на залишкові деформації від зварювання.
4. Поняття про жорсткі та еластичні прихватки.
5. Характеристики перерізів та величини, які впливають на величину деформацій від зварювання.
6. Визначення моменту інерції складеного перерізу.

7. Значення погонної енергії зварювання, при якому послідовність накладення зварних швів не має впливу на залишкові деформації від зварювання.
8. Вплив напрямку накладення зварних швів на залишкові деформації від зварювання.
9. Вплив погонної енергії при виконанні кутових швів на величину зварювальних деформацій.
10. Принципи вибору розміру та форм додаткових елементів, які приварюються до основного перерізу.
11. Конструктивні прийоми зменшення величини деформації основного перерізу, до якого приварюються додаткові елементи.
12. Принципи вибору оптимального варіанта технологічного процесу виготовлення зварної конструкції.

РОЗДІЛ 5. ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

5.1. Засоби зменшення деформацій, що виникають при зварюванні конструкцій

У теперішній час достатньо поширене уявлення, що за допомогою різних прийомів можна запобігти виникненню деформацій незалежно від того, яка послідовність складання та зварювання застосована при виготовленні конструкцій. До числа таких заходів боротьби з деформаціями належать різного роду закріплення, навантаження зовнішніми силами, зворотний вигин елемента, що зварюється, тощо. Усі ці заходи вимагають застосування тих або інших пристосувань, спеціальних пристроїв, які повинні бути погоджені із пристосуваннями, що використовуються для складання або зварювання конструкції. Таким чином, оснащення, яке розробляється для виготовлення тих чи інших конструкцій, повинне створюватися з урахуванням використання його, у тому числі і для боротьби з деформаціями. У деяких випадках це призводить до значного ускладнення оснащення і його подорожчання.

Водночас різні заходи боротьби з деформаціями виявляються ефективними лише при певних розмірах конструкції, а застосування їх в інших умовах може виявитися не тільки марним, але в деяких випадках навіть шкідливим. Так, наприклад, для запобігання грибоподібності поясних листів двотаврових і таврових перерізів деякий час вдавалися до зворотного вигину поясного листа за допомогою спеціальної скоби (рис. 5.1). Однак досвід застосування цього прийому показав, що при тонких листах зворотний вигин не знижував грибоподібності, тому що після зварювання та звільнення від скоби лист приймав форму, показану на рис. 5.1 пунктирними лініями. При великій товщині поясу зворотний вигин створював пластичні деформації, які не виправлялися зварними швами, і після зварювання пояс залишався таким, яким його вигнули скобою. Лише при деякому досить обмеженому діапазоні товщин поясного аркуша грибоподібність усувалася.

Таким чином, щоб правильно використати ті або інші заходи боротьби з деформаціями, необхідно мати можливість оцінювати ефективність обраного способу в тих конкретних умовах, у яких

передбачено його застосувати. Застосування заходів боротьби з деформаціями без попередньої оцінки їхньої ефективності може у випадку малого їхнього впливу на деформації в конкретних заданих умовах привести не тільки до марних витрат праці й коштів на виготовлення пристосувань, але й до ускладнення технології, пов'язаного зі встановленням пристосувань. А в остаточному підсумку зварна конструкція виявляється покоробленою і доводиться вдаватися до досить трудомісткої ручної операції виправлення.

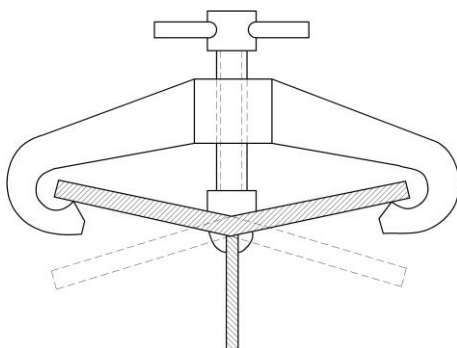


Рисунок 5.1 – Використання скоби для усунення грибоподібності

Попередньо оцінити ефективність способів боротьби з деформаціями можна за допомогою розрахунків залишкових деформацій з урахуванням впливу різних видів закріплень, зворотних вигинів та інших прийомів підвищення точності виготовлення зварних конструкцій. Однак слід зазначити, що залежно від конструктивного оформлення пристосувань їхній вплив на деталь, що зварюється, буде різним. Тому ефект від пристосування, що використовується, залежить не тільки від схеми пристосування, але й від її конструктивного оформлення і якості виготовлення. Оскільки в розрахунках не можна в загальному вигляді врахувати останні дві умови, то доводиться приймати різні допущення, які знижують точність розрахунків і роблять їх наближеними. Проте вони дають можливість із достатньою для практики точністю встановити, наскільки доцільне застосування в кожному конкретному випадку того чи іншого способу боротьби з деформаціями, і дозволяють, таким чином, уникнути в технологічному процесі використання марних пристосувань і непродуктивної витрати праці на виготовлення малоефективного оснащення.

5.2. Закріплення деталей, що зварюються

У деяких випадках для запобігання деформацій у процесі зварювання вдаються до закріплення деталі, що зварюється, яке викликає появу в процесі зварювання залишкових деформацій розтягу і тому може понизити загальні деформації звареної деталі.

Закріплення деталі, що зварюється, може здійснюватися шляхом притиснення її зовнішнім навантаженням до основи, яка не деформується, шляхом кріплення її за допомогою прихваток, струбцин або болтів до жорсткого оснащення або шляхом спарювання двох однакових деталей для надання їм більшої жорсткості.

Прогин елемента, зварювання якого виконувалося в умовах закріплення його зовнішнім навантаженням

$$f_{закр} = \frac{J_0}{J} f, \quad (5.1)$$

де J_0 – момент інерції перерізу, із площі якого виключена площа зони пружно-пластичних деформацій F_m .

Наприклад, якщо шов збігається з однією з головних осей, F_m можна знайти за виразом:

$$F_m = \frac{1}{\frac{1}{F} + \frac{(z')^2}{J} + \frac{340}{q_n}}. \quad (5.2)$$

Як видно з виразу (5.1), ефект від закріплення може бути значним лише при малих співвідношеннях $\frac{J_0}{J}$, і тому використання цього методу боротьби з деформаціями при зварюванні елементів значної жорсткості, коли J_0 близьке до J , недоцільне.

Оскільки J_0 залежить від відносного розміру площі F_m , яка, у свою чергу, визначається погонною енергією, то відношення $\frac{J_0}{J}$ можна виразити через характеристики перерізу та режиму зварювання:

$$\frac{J_0}{J} = 1 - \frac{1}{\frac{F}{F_m} - 1} \cdot \frac{F(z')^2}{J}. \quad (5.3)$$

Наближено величину F_m для жорстких перерізів можна прийняти:

$$F_m = \frac{1}{\frac{1}{F} - \frac{\varepsilon_m}{\mu q_n}}. \quad (5.4)$$

Тоді

$$\frac{J_0}{J} = 1 - \frac{\mu q_n}{\varepsilon_m F} \cdot \frac{F(z')^2}{J}, \quad (5.5)$$

де ε_m – величина пружної деформації.

Величина $\frac{F(z')^2}{J}$ є геометричною характеристикою перерізу.

Як показують дослідження, навіть при дуже великих значеннях погонної енергії (або при малих значеннях площі поперечного перерізу двотавра) відношення $\frac{J_0}{J}$ не опускається нижче за 0,5 при $\frac{F(z')^2}{J} = 1,2$.

При звичайних значеннях погонної енергії (до $50F$) відношення $\frac{J_0}{J}$ має значення, яке перевищує 0,8. Таким чином, навантаження елемента, що зварюється, зовнішніми силами не може знизити деформації від зварювання більше, ніж на 20 %.

Відповідно при виготовленні досить жорстких конструкцій ($F > 100 \text{ см}^2$) завантаження елемента, що зварюється, зовнішніми силами не може розглядатися як ефективний засіб зниження деформацій і підвищення точності виготовлення зварних конструкцій.

У багатьох випадках для зменшення деформацій виробу, що зварюються, прикріплюють до більш жорсткого, чим виріб, технологічного оснащення. Залежно від способів кріплення виробу до оснащення (за допомогою прихваток, гвинтових або ексцентрикових і пневматичних притискачів тощо) ступінь жорсткості кріплення буде різна. Найбільш жорстке кріплення досягається при застосуванні прихваток.

Жорстке кріплення виробу до оснащення здебільшого виключає будь-які переміщення зварної конструкції щодо оснащення. Це призводить до того, що виконання зварних швів на конструкції викликає спільні зварювальні деформації, які визначаються не тільки геометричними розмірами конструкції, але й розмірами оснащення.

Встановлено, що сума залишкових пластичних деформацій укорочення ν ($\nu = \mu q_n$, $см^2$) при деякому діапазоні значень $\frac{q_n}{F}$ за своєю величиною не залежить від геометричних характеристик поперечного перерізу зварного виробу. Отже, і закріплення, якщо знехтувати тепловідводом у процесі зварювання виробу в технологічне оснащення, не повинне впливати на величину ν .

Однак площа F_m пружно-пластичної зони й положення її центра ваги залежать від геометричних характеристик поперечного перерізу зварного виробу.

Тому при зварюванні елемента, прикріпленого до оснащення, площа F_m пружно-пластичної зони буде відрізнятися за величиною і розташуванням від площі F_m того ж елемента, але звареного у вільному стані. Відповідно різними будуть і відстані z' від центра ваги ν до центра ваги перерізу, незважаючи на однакові значення ν в обох випадках.

Отже, зварювання виробу в закріпленому стані з наступним звільненням від нього в основному може впливати на залишкові деформації вигину (на кривизну C); поздовжні деформації зварного виробу залишаються незмінними.

Тому закріплення виробів, у яких шви розташовуються по лінії центрів ваги, даремне.

Малоефективним є закріплення виробів із симетричними перерізами при симетричному розташуванні швів.

Іноді виріб прикріплюється до технологічного оснащення нескінченної жорсткості за допомогою еластичних закріплень. У цьому випадку виключені тільки деформації вигину; поздовжні деформації можливі та можуть бути визначені за площею поперечного перерізу зварного виробу і режимами зварювання. Пружно-пластичну зону зварного виробу при цьому можна знайти як у випадку зварювання вільного виробу, у якого зварні шви збігаються з лінією центрів ваги

$\left(\frac{(z')^2}{J} = 0 \right)$. Тоді величину площі пружно-пластичної зони при

еластичних закріпленнях $F_{m\text{ез}}$ можна знайти за формулою:

$$F_{m\text{ эз}} = \frac{1}{\frac{1}{F} - \frac{\varepsilon_m}{\mu q_n}}, \quad (5.6)$$

де F – переріз елемента без врахування поперечного перерізу оснащення.

Площа $F_{m\text{ эз}}$ перерізу зварного елемента, прикріпленого до оснащення за допомогою еластичних закріплень, займає проміжне положення між F_m і площею пружно-пластичної зони при жорсткому закріпленні $F_{m\text{ жз}}$ ($F_m < F_{m\text{ эз}} < F_{m\text{ жз}}$).

Тому всі висновки, які були зроблені на підставі розгляду деформацій при зварюванні виробу в жорсткому закріпленні, будуть певною мірою справедливі й у випадку застосування еластичних закріплень.

У тих випадках, коли з метою збільшення жорсткості два однакові вироби перед зварюванням з'єднують між собою за допомогою жорстких закріплень (спарюють), площу пружно-пластичної зони $F_{m\text{ сп}}$ можна визначити, якщо в розрахункові формули підставити геометричні характеристики перерізу, складеного із двох спарених виробів. У цьому випадку також $F_m < F_{m\text{ сп}} < F_{m\text{ жз}}$.

Отже, найбільш ефективним є жорстке закріплення зварного виробу до технологічного оснащення нескінченної жорсткості.

Досвід показує, що навіть найбільш жорстке закріплення в процесі зварювання більшості зварних конструкцій (якщо не враховувати тепловідвід у технологічне оснащення) не дає належного ефекту. Тому розрахунок залишкових деформацій елементів, що зварюються закріпленими, можна вести за тими ж формулами, що й елементів, які зварюються у вільному стані. Закріплення буде тим більш марним, чим менше відношення погонної енергії q_n до площі поперечного перерізу F зварної конструкції.

Якщо відношення $\frac{q_n}{F}$ мале, то застосування в розрахунках деформацій елементів конструкції або всієї конструкції при зварюванні без закріплень величини z' , визначеної за відстанню від центра ваги перерізу до центрів зварних швів, а не до центрів ваги сум залишкових пластичних деформацій стиску ν , не вносить помітних погрешностей.

Зварювання виробів у закріпленні можуть супроводжуватися посиленням тепловідводом у технологічне оснащення, що не враховувався в раніше розглянутих схемах. У цьому випадку пружно-пластична зона F_m у виробі зменшиться, а отже, зменшаться і залишкові деформації виробу.

Однак тепловідвід в оснащення може бути забезпечений лише у випадку щільного прилягання виробу до оснащення без зазорів, щілин і навіть без повітряних прошарків. Виконати такі вимоги у виробничих умовах надзвичайно важко. Останнім часом зроблені пропозиції проєктувати оснащення так, щоб навколошовні зони основного металу виробу піддавалися примусовому охолодженню (зрошувалися струменями води – компактними і розбризканими, обкладалися пористими матеріалами зі скло- чи мінераловати, просоченими водою), внаслідок чого значно зменшувалася величина сум залишкових пластичних деформацій укорочення v і істотно знижувалися залишкові деформації.

На підставі всіх наведених даних можна зробити такий загальний висновок: закріплення не можуть помітно знизити зварювальні деформації, якщо спеціальними засобами не забезпечити посилений тепловідвід із виробу, що зварюється, в оснащення, а тому їхнє застосування в більшості випадків є недоцільним.

5.3. Застосування зворотних вигинів

Недостатня ефективність закріплення як засобу боротьби з деформаціями призвела до застосування зворотних вигинів виробу перед зварюванням. Для того щоб після зварювання виріб виявився недеформованим, він повинен перед зварюванням мати деяку початкову кривизну протилежного знаку, у порівнянні зі знаком кривизни, яка виникає при зварюванні.

Початкова кривизна елемента може бути отримана різними засобами, від яких залежить чисельне її значення. Так, початкова кривизна елемента, що зварюється, може бути отримана шляхом вирізки не прямолінійних, а криволінійних заготовок. У цьому випадку кривизна й початкова стрілка вигину повинні бути за величиною рівними кривизні та стрілці вигину, що виникає при зварюванні. Знак стрілки вигину повинен бути зворотним знаку прогину, створюваного зварюванням.

Початкова кривизна може бути створена і шляхом пружного вигину елемента перед зварюванням із наступним закріпленням елемента.

Усунути прогин елемента, викликаний зварюванням, можна також вигином його зовнішніми силами після зварювання. Для усунення деформації від зварювання потрібно прикласти або перед зварюванням або після зварювання згинальний момент тієї ж самої величини (якщо не враховувати вплив початкового напруженого стану). Оскільки при прикладенні моменту зовнішніх сил до зварювання створюється корисний напружений стан, то необхідний початковий прогин буде меншим за прогин, який створюється після зварювання, як це видно з виразу:

$$\frac{f_{z_0}}{f} = \frac{1}{\frac{J}{J_0} - 1 + \frac{Cz'}{\varepsilon_m}}, \quad (5.7)$$

де C – кривизна елемента при зварюванні у вільному стані;

ε_m – величина пружних деформацій.

Початковий напружений стан може бути отримано й за допомогою попереднього розтягу елемента, що зварюється. При цьому потрібні складні пристрої та більші зовнішні сили, ніж у випадку попереднього напруження елемента вигином. Однак в окремих випадках може бути застосований і розтяг для створення початкових напружень.

За наявності початкових напружень розтягу сума залишкових пластичних деформацій укорочення v' порівняно із сумою залишкових пластичних деформацій укорочення без початкових напружень розтягу v буде визначатися за виразом:

$$v' = m_\sigma v, \quad (5.8)$$

де m_σ – коефіцієнт, який показує, як впливає початковий напружений стан на суму залишкових пластичних деформацій укорочення і, відповідно, на залишкові зварювальні деформації та напруження.

Впливом початкового напруженого стану пояснюється та обставина, що при симетричному розташуванні швів у двотаврових балках їх прямолінійність після зварювання не зберігається. Дійсно, перший поясний шов накладають на ненапружений елемент, але після

виконання шва елемент згинається, і пояс, протилежний звареному, виявляється розтягнутим. Після накладення на розтягнутий пояс другого шва на тому ж режимі, що і при виконанні першого шва, елемент розпрямляється тільки частково й не змінює знаку прогину, отриманого від першого шва. Оскільки сума залишкових пластичних деформацій укорочення v'_2 від другого шва, накладеного на попередньо розтягнутий пояс, менше, ніж v_1 від першого шва, накладеного на ненапружений елемент, то другий шов не може компенсувати вплив першого шва, і елемент зберігає той знак прогину, який був отриманий від першого шва.

Для зручності аналізу вводиться коефіцієнт $\beta = \frac{\Delta_{поч}}{\varepsilon_m} = \frac{\sigma_{поч}}{\sigma_m}$, який

характеризує початковий напружений стан.

Залежність $m_\sigma = f(\beta)$ в інженерних розрахунках має вигляд:

$$\text{при } 0 \leq \beta \leq 1 \quad m_\sigma = 1 - \beta;$$

$$\text{при } -0,5 \leq \beta \leq 0 \quad m_\sigma = 1 - 2\beta;$$

$$\text{при } -0,8 \leq \beta \leq -0,5 \quad m_\sigma = -4\beta.$$

Так, зі збільшенням попередніх напружень розтягу $\sigma_{поч}$, тобто зі збільшенням коефіцієнта β , площа пружно-пластичної зони залишається практично постійною, попри те, що v' зменшується. Це свідчить про те, що в межах пружно-пластичної зони залишкові зварювальні напруження не дорівнюють границі текучості σ_m і зменшуються зі зростанням коефіцієнта β .

Якщо перед зварюванням виробу надати попередні деформації розтягу $\Delta_{поч} = \varepsilon_m$, то після зварювання і вивільнення від навантаження залишкові зварювальні деформації і напруження всіх поздовжніх волокон будуть рівні нулю.

Таким чином, попередні напруження розтягу можуть бути ефективним засобом запобігання чи зменшення зварювальних деформацій та напружень. Початковий напружений стан, який створюється примусовим складанням, може суттєво змінити величину очікуваних загальних деформацій, які виникають при наступному зварюванні. Особливо несприятливі попередні напруження стиску, які можуть значно підвищити деформації від зварювання. Крім того, натяг конструкцій при

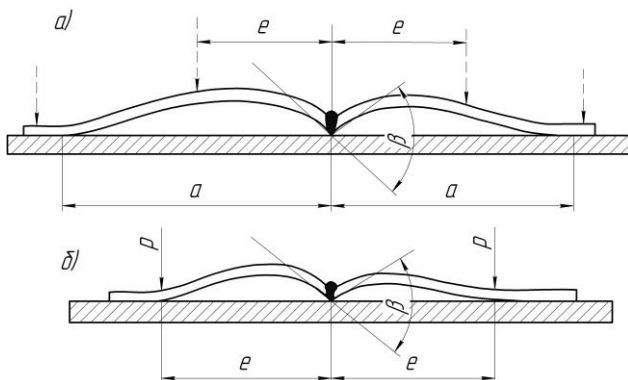
складанні, створюючи в різних місцях напруження з різними значеннями, призводить до нерівномірних деформацій від зварювання, при яких боротьба з коробленням зварних конструкцій малоефективна. Тому необхідно підвищувати точність заготовок, адже тільки при високій їх точності можливе складання без примусових натягів.

5.4. Заходи боротьби з місцевими деформаціями

Для запобігання місцевого випинання металу, викликаного кутовими деформаціями або втратою стійкості тонких листів, застосовуються ті ж самі прийоми, що й для боротьби із загальними деформаціями: закріплення та зворотні вигини. Закріплення для запобігання місцевих деформацій можуть здійснюватися за різними схемами із застосуванням технологічних вантажів, талрепів або струбцин, із постановкою додаткових елементів жорсткості та шляхом тимчасової приварки елемента до плити.

Технологічні вантажі необхідно розташовувати так, щоб у кутовому шві, що викликає кутову деформацію β , у результаті закріплення виникли пластичні деформації, унаслідок чого ріст кутових деформацій припиниться. Для цього необхідно вантажі розташовувати якомога ближче до шва, а вагу їх вибирати так, щоб лист під вантажем не відставав від плити. Однак деякий поворот листів, що зварюються, все-таки може відбутися. Так, якщо без застосування вантажів зварюються листи й отримують хвилястість, характер якої показаний на рис. 5.2, *a*, то при постановці вантажів деформації будуть залежати від розташування цих вантажів від осі шва.

Розташування вантажів на відстані від осі шва більшій, ніж a , марне, тому що ніякої зміни кута β при цьому не відбудеться. Постановка вантажів на відстані від шва $e < a$ викликати зменшення кутових деформацій. Однак зменшення кута до величини β' (рис. 5.2, *б*) може відбутися або внаслідок пружних деформацій у шві (як у місці закладення консолі, навантаженою силою P), або внаслідок пластичних деформацій. У першому випадку після видалення вантажів деформації набудуть такого ж вигляду, як і при зварюванні без постановки вантажів. У другому випадку кутова деформація зменшиться на величину, що відповідає пластичним деформаціям, які відбулися.



a – без використання вантажу; *б* – при постановці вантажу
 Рисунок 5.2 – Характер деформації листів при стиковому шві

Найбільший кут β_{max} , що виникне при прикладенні вантажу P на відстані a від осі шва, можна визначити за графіком, представленим на рис. 5.3, де суцільними лініями нанесені залежності $\beta_{max} = f(a)$ для листів різної товщини. При цьому вага вантажів повинна становити (у кілограмах на погонний сантиметр) величину не менше тієї, яка визначається залежностями $P = f(a)$, показаними на тому ж графіку рис. 5.3 пунктирними лініями.

Так, наприклад, нехай при зварюванні листів товщиною 10 мм обрано режим, що викликає кут $\beta = 200'$. Для зменшення стрілки випучини на відстані 30 см по обидві сторони від осі шва встановлені вантажі. Найбільший кут, що виникне при такому розташуванні вантажів, становить $60'$ або на обидві сторони – $\beta_{max} = 120'$ (див. рис. 5.3). Однак при цьому вага вантажів повинна бути не менше 18,4 кг/см. Якщо ж для зменшення ваги вантажів збільшити їх відстань від осі шва, наприклад, до 50 см, то за графіком одержимо:

$$\beta_{max} = 2 \cdot 100' = 200',$$

тобто ніякого зменшення кутових деформацій при цьому не буде.

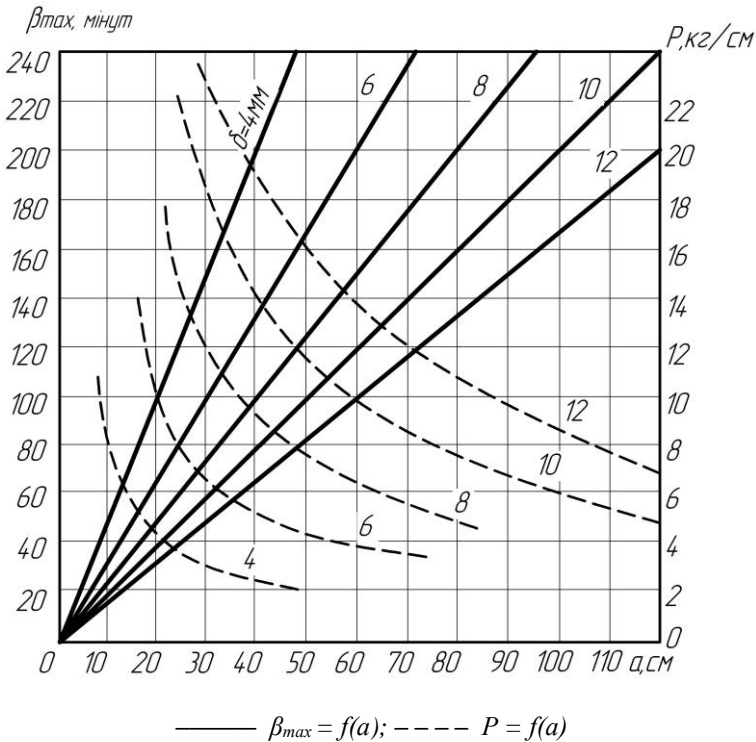
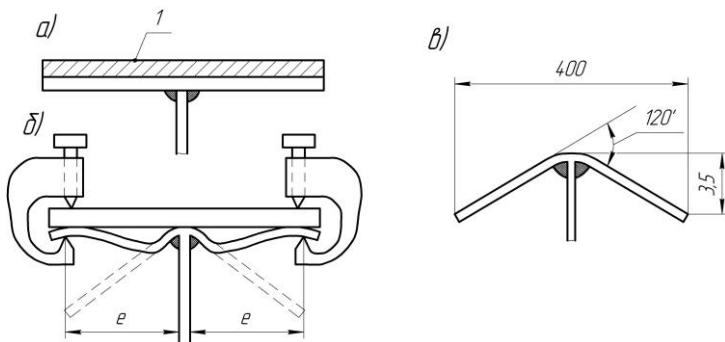


Рисунок 5.3 – Залежність найбільшої величини кута β від величини вантажу P та його відстані a від осі шва

Цим графіком можна скористатися і для оцінки ефективності деяких заходів боротьби із грибоподібністю при зварюванні елементів таврових перерізів. Так, грибоподібність зменшується зі зростанням товщини поясного листа. Тому для зниження деформацій поясів доцільно на час зварювання збільшувати товщину поясного листа шляхом прикріплення до нього струбцинами накладного листа (рис. 5.4, а). Однак такий захід може бути ефективним тільки у випадку, якщо обидва листи будуть деформуватися сумісно. Якщо ж обидва листи будуть скріплені один з одним на великій відстані від кутових швів, то тонкий аркуш зможе деформуватися незалежно від накладного листа згідно зі схемою на рис. 5.4, б, і після зняття накладного листа грибоподібність матиме таку саму величину, що й при зварюванні без накладного листа.



*а – при потовщенні листа; б – при кріпленні накладного листа
струбцинами; в – деформації поясного листа;
1 – тимчасовий накладний лист*

Рисунок 5.4 – Схеми запобігання грибоподібності

Використовуючи графік на рис. 5.3, можна встановити ту найбільшу відстань e до місця скріплення з накладним листом, при якій можна одержати необхідне зменшення грибоподібності.

Так, наприклад, з розрахунку кутових деформацій при прийнятих розмірах кутових швів θ_{1+2} становить $120'$ (рис. 5.4, в), що дає прогин кромки поясу шириною $400 \text{ мм} - 3,5 \text{ мм}$. Допустимий прогин – $1,5 \text{ мм}$. Отже, найбільший кут β_{\max} не повинен перевищувати

$$\beta_{\max} = \frac{1,5}{200} = 0,0075, \text{ або } 26'.$$

З графіка на рис. 5.3 знаходимо, що при товщині поясного листа в 10 мм цей кут досягається при $a_{\max} = 130 \text{ мм}$, а при листах товщиною 8 мм – при $a_{\max} = 104 \text{ мм}$.

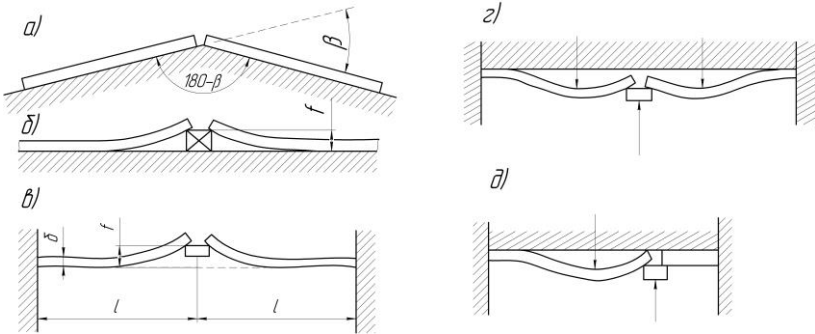
Таким чином, користуючись графіком на рис. 5.3, можна вирішувати різні завдання, пов'язані зі зменшенням місцевих кутових деформацій.

Найбільш надійним засобом зменшення величини випинання, спричиненого втратою стійкості, є зменшення розміру кутових швів (зниження погонної енергії) і правильне розміщення ребер жорсткості.

При виконанні стикових швів полотниць або поясних листів боротися з кутовими деформаціями можна шляхом застосування зворотного вигину. Цього можна досягти або шляхом похилого розташування листів, що зварюються (рис. 5.5, а), або шляхом відгину кромки (рис. 5.5, б).

В останньому випадку необхідну стрілку вигину можна визначити за таким виразом:

$$f = 128\sqrt[3]{\delta^2 \beta^4}.$$



a – розташування листів під нахилом один до одного;
b – пружний відгин кромки вільних листів; *в, г, д* – пружний відгин кромки зі звільненням поясів від вертикальної стінки на довжину *l*

Рисунок 5.5 – Різні способи запобігання кутових деформацій

У стиках поясів елементів таврових і двотаврових перерізів, щоб одержати можливість відгину крайок, необхідно недоварювати шви на деяку величину *l* (рис. 5.5, *в*). Ця величина повинна задовольняти умові

$$\frac{l}{\delta} \geq 417 \cdot \beta,$$

але не повинна бути менше ніж 10.

У стиках нижнього поясу при схемі вигину за рис. 5.5, *г*

$$\frac{l}{\delta} \geq 1000 \cdot \beta,$$

але не менше ніж 25.

Якщо відгин обох кромки неможливий, і вигинають тільки одну з них за схемою на рис. 5.5, *д*, то

$$\frac{l}{\delta} \geq 2000 \cdot \beta,$$

але не менше ніж 50.

Питання для самоперевірки

1. Засоби зниження деформацій при зварюванні конструкцій та оцінка їхньої ефективності.
2. Способи закріплення виробів при зварюванні для боротьби зі зварювальними деформаціями.
3. Ефективність закріплень як засобу боротьби з деформаціями.
4. Способи забезпечення посиленого тепловідводу при зварюванні конструкцій у закріпленні.
5. Способи створення зворотних вигинів для боротьби зі зварювальними деформаціями.
6. Ефективність використання початкового напруженого стану для боротьби зі зварювальними деформаціями.
7. Вплив на величину деформації при зварюванні початкових напружень розтягу та стиску.
8. Поняття про місцеві деформації.
9. Способи боротьби з місцевими деформаціями при зварюванні листових конструкцій.

РОЗДІЛ 6. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

6.1. Шляхи підвищення працездатності зварних конструкцій

Працездатність зварних конструкцій визначається двома основними факторами – напруженим станом і властивостями застосованих матеріалів. Впливаючи тими чи іншими способами на обидва ці фактори, можна змінювати працездатність зварної конструкції.

Найбільшими можливостями в цьому відношенні володіє конструктор, який у процесі проектування належним вибором найбільш придатного основного та зварювального матеріалів і найбільш раціональних конструктивних розмірів і форм може забезпечити необхідну працездатність окремих елементів і всієї зварної конструкції загалом.

Однак технологія виготовлення робить свій вплив і на властивості застосованих матеріалів, і на напружений стан готової зварної конструкції. Тому, використовуючи різні технологічні засоби, можна змінювати працездатність зварної конструкції. При цьому основне значення мають ті засоби, що дозволяють підвищувати працездатність зварної конструкції без додаткової витрати матеріалу й без значного підвищення витрат праці на її виготовлення.

Усі технологічні засоби підвищення працездатності зварної конструкції впливають на існуючі в ній неоднорідності або пом'якшуючи, або підсилюючи їх. Так, у процесі виготовлення зварної конструкції в основному металі поблизу шва виникає хімічна і структурна неоднорідність, що викликає неоднорідність властивостей різних ділянок металу навколошовної зони. Одночасно в результаті зварювання в конструкції створюється неоднорідний напружений стан. Зміною режиму зварювання можна в деяких межах регулювати як властивості, так і розміри окремих ділянок навколошовної зони. Те ж саме можна здійснити за допомогою різних видів термообробки. Термообробкою можна змінювати й напружений стан конструкції, викликаний процесом зварювання. Однак варто мати на увазі, що *працездатність зварної конструкції визначається напруженим станом, що існує при дії навантаження, тобто сумарним напруженим станом від зварювання і від зовнішніх сил. Для того щоб впливати на цей*

напружений стан, у багатьох випадках недостатньо регулювати лише напруження, викликані зварюванням. Необхідно накладати додаткове поле напружень, створюване додатковими зварними валиками, місцевим точковим нагріванням, місцевим пластичним обтисненням чи іншими способами. Це додаткове поле напружень створює такий початковий напружений стан, при якому кінцевий напружений стан (під навантаженням) є більш сприятливим для роботи зварної конструкції, ніж стан без додаткового поля напружень.

З наведеного вище видно, що існують досить різноманітні технологічні можливості регулювання властивостей матеріалу й напруженого стану зварної конструкції. Серед цих можливостей створення поля додаткових напружень виявляється одним із найбільш ефективних засобів підвищення працездатності зварних конструкцій.

Поле додаткових напружень, яке створене зварюванням чи місцевим нагрівом, відрізняється від поля напружень, створеного зовнішніми силами.

Величина залишкових напружень розтягу, що виникають у зонах, де в процесі нагріву з'явилися пластичні деформації стиску, здебільшого досягає границі текучості. Це означає, що в зонах, де в процесі нагріву чи зварювання створювалися пластичні деформації стиску, при охолодженні виникають пластичні деформації розтягу. Відповідно до цього найбільші напруження розтягу, які рівні границі текучості, розподілені в зонах, де в результаті зварювання чи місцевого нагріву з'явилися пластичні деформації та наклеп металу і де, відповідно, підвищені його механічні характеристики (границя текучості і дещо границя міцності). Таким чином, найбільші залишкові напруження розтягу, як правило, діють в зонах з підвищеними міцнісними характеристиками, якими є наволошовні зони.

З наведеного випливає, що, оцінюючи вплив напруженого стану, викликаного зварюванням, на працездатність зварних конструкцій, необхідно одночасно враховувати як зміни властивостей матеріалу в зонах дії найбільших напружень розтягу, так і зміни поля залишкових напружень, що відбуваються від докладання та зняття зовнішнього навантаження.

Крім того, в окремих випадках необхідно враховувати зміни форми і розмірів конструкції у зв'язку з тими деформаціями, що викликані процесом зварювання.

Варто підкреслити, що дуже часто, оцінюючи працездатність зварних конструкцій, розглядають роль залишкових зварювальних напружень, зовсім не враховуючи впливу інших факторів, викликаних такими ж причинами, що і залишкові напруження.

Такий підхід може призвести, і у більшості випадків призводить, до неправильних висновків.

У наступних підрозділах буде показано, як ті чи інші технологічні засоби можна використовувати для підвищення працездатності зварних конструкцій: міцності, витривалості та стійкості.

6.2. Підвищення міцності зварних конструкцій при статичному й ударному навантаженнях

Працездатність зварного з'єднання, у якому є ділянки з різними властивостями металу, визначається не тільки абсолютними значеннями механічних характеристик металу зразків, вирізаних з різних ділянок, але і *співвідношенням властивостей і розмірів цих ділянок*.

Уявимо собі зварне з'єднання встик із досить широким швом, метал якого має знижену границю текучості в порівнянні з основним металом. У цьому випадку при дії розтягуючого навантаження пластичні деформації насамперед виникнуть у шві, де вони будуть продовжувати концентруватися і, зрештою, призведуть до руйнування шва з утворенням шийки. Однак, змінюючи ширину шва, можна підвищити руйнівне навантаження. Так, зменшення співвідношення ширини шва до його товщини приведе до того, що дотичний зі швом більш міцний основний метал ускладнить розвиток пластичних деформацій і утворення шийки, у зв'язку з чим шов зможе витримати більш високе навантаження. На рис. 6.1 схематично показана залежність границі текучості й поперечного звуження металу шва від

відношення $\frac{b}{h}$ – ширини шва до його товщини.

У міру зменшення ширини шва границя текучості металу шва і, отже, міцність зварного з'єднання зростає і при деякому значенні $\frac{b_1}{h}$ – міцність з'єднання може виявитися рівною міцності основного металу. Однак при цьому пластичні властивості металу шва виявляються низькими.

Таким чином, змінюючи ширину шва, виконаного з менш міцного металу, ніж основний метал, можна забезпечити рівномірність зварного з'єднання основному металу.

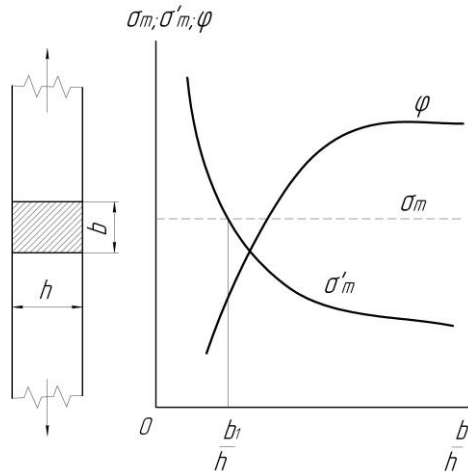
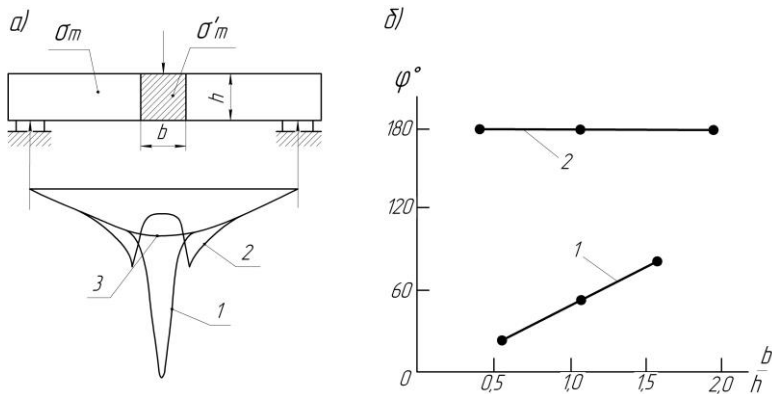


Рисунок 6.1 – Залежність границі текучості й відносного звуження металу шва від його розмірів

Те саме можна сказати і про шви елементів, що згинаються. На рис. 6.2, а показаний розподіл відносних деформацій подовження нижнього волокна при границі текучості металу шва σ'_m меншій границі текучості σ_m основного металу ($\sigma'_m < \sigma_m$ – крива 1 на рис. 6.2, а), при $\sigma'_m > \sigma_m$ (крива 2) і при рівних значеннях границі текучості металу шва й основного металу ($\sigma'_m = \sigma_m$ – крива 3).

Як видно з графіка, при низькому значенні границі текучості металу шва виникає різка концентрація деформацій у шві. При $\sigma'_m > \sigma_m$ концентрація деформацій переходить в основний метал, у

зони, прилеглі до шва. Однак при цьому концентрація деформацій набагато менше, тому що втягується в роботу значно більший обсяг основного металу. З наведеного випливає, що для запобігання руйнування по шву треба вибирати такі зварювальні матеріали, що забезпечували б метал шва з вищою границею текучості, ніж в основного металу. У тих випадках, коли з тих чи інших причин це виявляється неможливим, і доводиться застосовувати зварювальні матеріали, що дають метал шва з границею текучості, яка є меншою границі текучості основного металу, можна підвищувати несучу здатність елемента, що згинається, шляхом зменшення ширини шва. Однак при цьому необхідно враховувати, що зі зменшенням ширини шва зменшується кут загину зварного з'єднання.



a – розподілення відносного подовження;

б – залежність кута загину від відношення розмірів зварного шва;

1 – при $\sigma'_m < \sigma_m$; 2 – при $\sigma'_m > \sigma_m$; 3 – при $\sigma'_m = \sigma_m$

Рисунок 6.2 – Вплив неоднорідності властивостей на відносне подовження та кут загину

На рис. 6.2, б наведені значення кутів загину стикових з'єднань з $\sigma'_m > \sigma_m$ і при $\sigma'_m < \sigma_m$. Як видно з графіків, у випадку $\sigma'_m > \sigma_m$ кути загину практично рівні тим, що дає основний метал. У тих випадках, коли $\sigma'_m < \sigma_m$, кути загину виявляються сильно зниженими, зростаючи зі збільшенням ширини шва.

У деяких випадках у зварних з'єднаннях з'являється прошарок зі зниженими властивостями. Змінюючи розміри прошарку чи властивості оточуючого металу, можна в значних межах регулювати працездатність зварного з'єднання. Якщо необхідно підвищити міцність з'єднання зі слабким (м'яким) прошарком, то варто зменшувати його ширину. Якщо необхідно підвищити деформаційну здатність з'єднання із крихким прошарком, то варто оточити його металом із дещо зниженою границею текучості, щоб концентрувати пластичні деформації в сусідніх пластичних зонах і виключити крихкий прошарок з роботи.

Небезпека крихких прошарків зростає при роботі конструкції в умовах низьких температур. Температура переходу із крихкого стану у в'язкий залежить від характеру напруженого стану, створюваного в зварних конструкціях процесом зварювання і дією зовнішнього навантаження. Регулюючи у відомих межах режим зварювання, а отже, і напружений стан, що виник у результаті зварювання, можна змінювати опірність зварної конструкції крихким руйнуванням. Однак можливості впливу на опірність крихким руйнуванням за допомогою режиму зварювання дуже обмежені. Значно великі можливості створює накладення поля додаткових напружень, за допомогою яких можна як знижувати, так і підвищувати опірність зварних конструкцій крихким руйнуванням. У зв'язку зі складністю оцінки крихкої міцності та опірності конструкцій крихким руйнуванням обмежимося тут лише вказівкою на можливість підвищення працездатності зварних конструкцій при низьких температурах за допомогою накладення поля додаткових напружень. Методику використання поля додаткових напружень розглянемо на прикладі підвищення витривалості зварних конструкцій при циклічному навантаженні.

Дослідження роботи зварних конструкцій при дії ударних навантажень показали, що в тих випадках, коли забезпечена їхня статична міцність, ударна міцність також забезпечується. Тому всі засоби підвищення статичної міцності зварних конструкцій можна використовувати і з метою підвищення ударної міцності. Для підвищення ударної міцності є особливо важливим, щоб у зварних конструкціях метал зварних швів не мав знижені в порівнянні з основним металом механічні властивості.

При застосуванні для зміцнення слабких зон зварних з'єднань звуження цих зон більшу увагу слід приділяти пластичним властивостям, не допускаючи значного їх зниження, тому що при ударі міцність конструкції суттєво залежить від характеристик пластичності порівняно зі статичним навантаженням. При роботі зварних конструкцій в умовах низьких температур і ударних навантажень усі наведені вище розуміння набувають ще більшого значення.

6.3. Підвищення витривалості зварних конструкцій при циклічних навантаженнях

Витривалість зварних конструкцій залежить від характеристики циклу і величини найбільших та найменших напружень. Оскільки величина найбільших та найменших напружень, що діють у зварній конструкції, являє собою суму напружень від зварювання і від зовнішнього навантаження, то при оцінці витривалості не можна не враховувати вплив зварювальних напружень. Однак *через особливість поля напружень, створеного зварюванням одночасно з виникненням поля напружень відбувається і підвищення міцнісних характеристик (зокрема, границь текучості та витривалості) у зонах дії найбільших зварювальних напружень розтягу.* Тому одночасно з напруженнями, викликаними зварюванням, необхідно враховувати й ті зміни у властивостях матеріалу, що відбулися в зонах дії тих чи інших напружень від зварювання.

Крім того, необхідно рахуватися з тим впливом, який здійснює зовнішнє навантаження на величину залишкових зварювальних напружень.

У результаті проведених досліджень встановлено, що *в разі відсутності концентраторів напружень, викликаних зварюванням і діючих у зонах матеріалу із властивостями, які не змінилися у процесі зварювання (реактивні напруження), можуть підвищити чи понизити витривалість зварного елемента залежно від знака напружень. Залишкові реактивні напруження розтягу знижують, а залишкові реактивні напруження стиску підвищують витривалість.*

Водночас *найбільші зварювальні напруження розтягу, що досягають границі текучості й діють у навколошовних зонах із підвищеними міцнісними характеристиками металу, зазвичай не*

змінюють витривалості зварного елемента, тому що негативний вплив напружень розтягу компенсується позитивним впливом підвищеної границі витривалості металу навколошовної зони. На рис. 6.3 наведено залежність відношення границь текучості металу навколошовної зони (σ'_m) та основного металу (σ_m) від припустимої

величини залишкових напружень $\sigma_{зал}$ і відношення $a = \frac{\sigma_{зал}}{\sigma_s}$, при

якому витривалість у найбільш небезпечній зоні зварного елемента дорівнює витривалості основного металу.

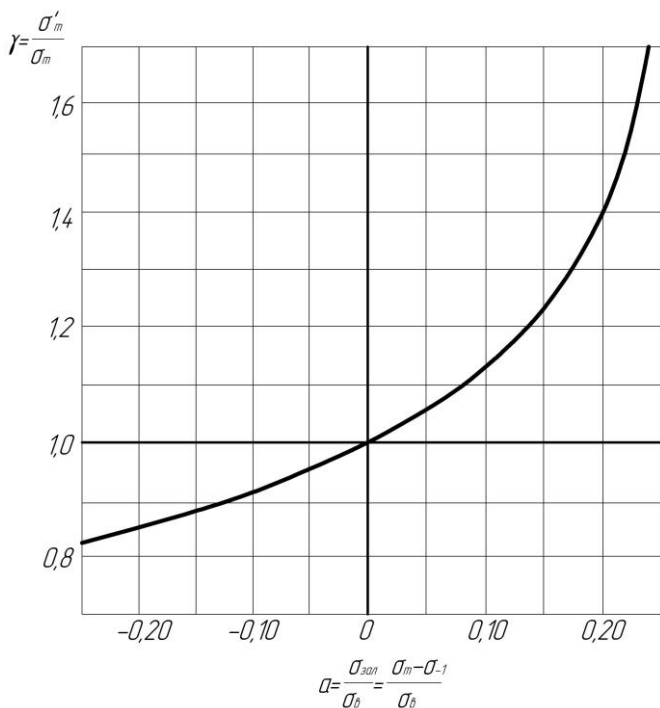


Рисунок 6.3 – Залежність величини $a = \frac{\sigma_{зал}}{\sigma_s}$ від відношення $\gamma = \frac{\sigma'_m}{\sigma_m}$

При значеннях $\gamma = \frac{\sigma'_m}{\sigma_m}$, розташованих вище кривої на рис. 6.3,

витривалість у зоні дії зварювальних напружень розтягу вище за витривалість основного металу. Область, розташована нижче кривої, охоплює випадки, коли витривалість зони дії найбільших зварювальних напружень нижче за витривалість основного металу.

Цей зв'язок між властивостями навколошовної зони та її витривалістю дозволяє використовувати поле зварювальних напружень як засіб підвищення витривалості будь-яких елементів, що мають концентратори напружень. Так, наприклад, якщо в стержні (рис. 6.4, а) є надрізи, які призводять до нерівномірного розподілу напружень по перерізу з надрізами (рис. 6.4, б), то шляхом наплавлення валика по осі стержня (пунктир на рис. 6.4, а) можна створити поле додаткових напружень, при якому розподіл напружень у перерізі по надрізах зобразиться пунктирною лінією, приведеною на рис. 6.4, в. Розподіл сумарних напружень від наплавлення валика й зовнішнього навантаження показаний на рис. 6.4, г. У результаті наплавлення валика напруження в корені надрізу понизилися, а напруження по осі стержня підвищилися. Зниження напружень у корені надрізів підвищує витривалість цих точок перерізу, що до наплавлення валика визначали витривалість усього стержня.

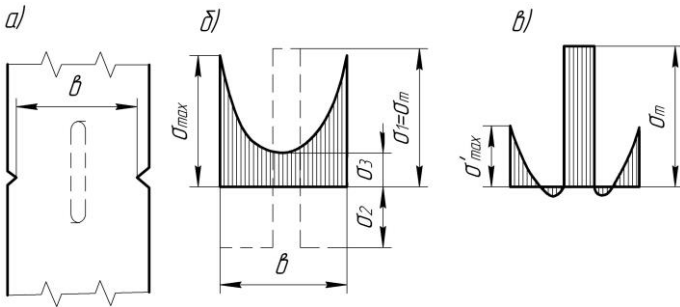


Рисунок 6.4 – Схема зміни напруженого стану елемента з концентраторами від накладення поля додаткових напружень

Підвищення ж напружень по осі стержня не відображається на витривалості, оскільки ці напруження діють у зоні основного металу, що підвищила в процесі наплавлення валика свою границю текучості та границю витривалості. У результаті витривалість усього стержня підвищується.

Для найбільшої ефективності поля додаткових напружень валик треба розташовувати так, щоб у корені надрізів діяли якомога вищі напруження стиску, а напруження розтягу розташовувалися там, де напруження від корисного навантаження мінімальні (для того, щоб зниження напружень розтягу та стиску від прикладення і зняття корисного навантаження було мінімальним).

Як відзначалося вище, поле додаткових напружень можна створити не тільки наплавленням валика, але й іншими засобами. На рис. 6.5 показані епюри розподілу напружень у перерізі стержня, де зроблено обрив двох поясних аркушів. Якщо витривалість σ_R стержня, що не піддавався якому-небудь зміцненню, прийняти за 100 %, то при напавленні валика, при застосуванні місцевого точкового нагрівання чи при виконанні пластичного обтиснення в двох точках, розташованих поблизу концентраторів, витривалість підвищується в 1,5-2,0 рази.

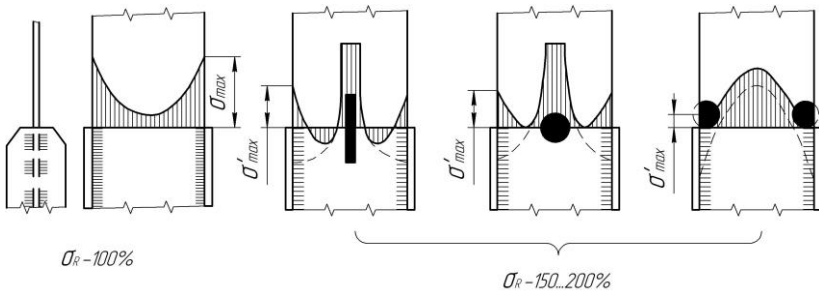


Рисунок 6.5 – Підвищення витривалості σ_R у результаті створення поля додаткових напружень різними засобами

Крім накладення додаткового поля напружень, підвищення витривалості можна досягти й іншими технологічними засобами. До числа таких засобів належать, зокрема, розтяг статичним

навантаженням, що викликає напруження, близькі до границі текучості. При розтягу (рис. 6.6, а) виникають пластичні деформації подовження, які після зняття навантаження створюють напруження стиску, що здійснює позитивний вплив, а також підвищену границю текучості металу в корені надрізу. Крім того, у результаті розтягу і пластичних деформацій гострота надрізу пом'якшується, що у свою чергу призводить до підвищення витривалості.

Слід зазначити, що попередній стиск зразка призводить до зниження витривалості, тому що при цьому збільшується гострота надрізу і створюються залишкові напруження розтягу (рис. 6.6, б).

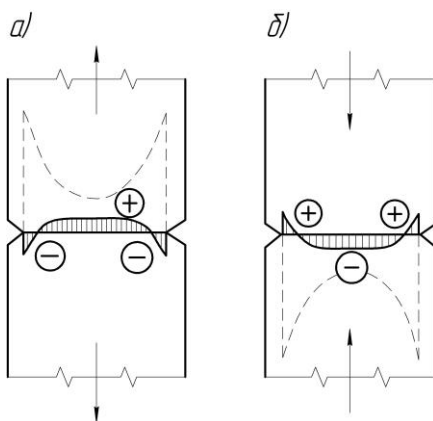


Рисунок 6.6 – Залишкові напруження, які створюються розтягом (а) та стиском (б) надрізаного елемента

Дуже часто для підвищення витривалості без достатніх основ рекомендують термообробку конструкцій після зварювання, що знижує напруження, створені зварюванням. При цьому не враховується та обставина, що термообробка знімає наклеп металу навколошовної зони, який має позитивний вплив, і розміщує основний метал, знижуючи його границю текучості, а, отже, і границю витривалості. На підставі досліджень, проведених різними авторами, можна вважати встановленим, що термообробка після зварювання конструкцій із невисокою концентрацією напружень призводить до зниження їхньої витривалості. Лише при дуже значній концентрації напружень термообробка дещо підвищує витривалість зварних конструкцій.

Для порівняння ефективності деяких конструктивних прийомів підвищення витривалості з технологічними – накладенням додаткового поля напружень (зокрема, створеного місцевим точковим нагріванням) – на рис. 6.7 за даними досліджень наведена витривалість стержня з фасонкою (σ), виконаного різними способами. Границя витривалості стержня – максимальне за абсолютним значенням механічне напруження циклу, при якому ще не відбувається руйнування матеріалу від втоми протягом заданої кількості циклів навантаження, – становить 20,5 МПа (a). Привертає до себе увагу те, що такі заходи, як обробка переходів від стержня до фасонки (b , z), як застосування деконцентраторів (d), не можуть настільки сильно підвищити витривалість, як це досягається при накладенні поля додаткових напружень (e).

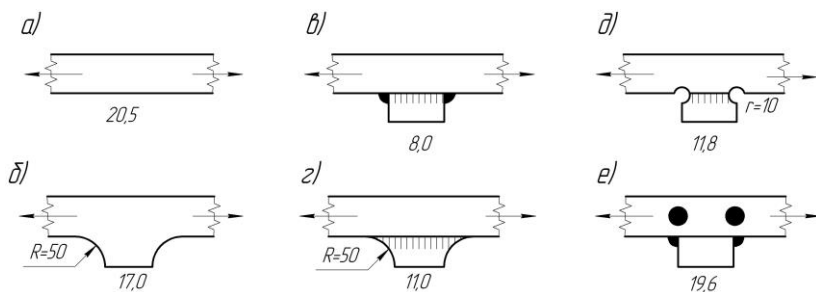


Рисунок 6.7 – Границя витривалості стержня з фасонкою при різному конструктивному оформленні

Відзначаючи різні технологічні засоби підвищення витривалості зварних конструкцій, не можна не згадати про такі найпростіші засоби, як досягнення плавності сполучення металу шва з основним металом. Цієї плавності можна домогтися як відповідним підбором режиму зварювання поверхневих шарів шва, так і додатковою обробкою місць переходу (плазмовим струменем чи аргондуговим зварюванням електродом, що не плавиться), а також іншими засобами, включаючи і механічну обробку зварних швів. Однак плавність сполучення металу стикових і кутових швів з основним металом варто розглядати як обов'язкову вимогу до нормальної технології виготовлення зварних конструкцій, однаково необхідну для конструкцій, що працюють при циклічних навантаженнях і при статичних навантаженнях в умовах низьких температур.

6.4. Підвищення стійкості зварних конструкцій

У стиснутих елементах зварних конструкцій особливого значення набувають *напруження стиску*, що виникають у процесі зварювання. Сумуючись з напруженнями від зовнішньої стискаючої сили вони можуть викликати втрату стійкості елемента, який із розрахунку на одне зовнішнє навантаження повинний бути стійким. Зварювальні напруження стиску можуть призвести до місцевої втрати стійкості навіть при відсутності зовнішньої стискаючої сили. Тому використання засобів підвищення як місцевої, так і загальної стійкості повинне передбачатися при розробці технологічного процесу виготовлення зварної конструкції.

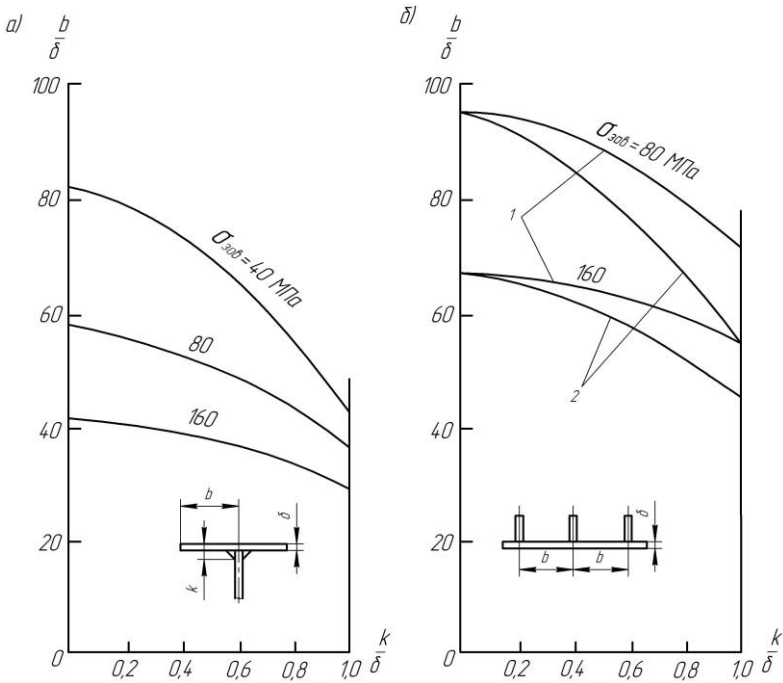
Місцева стійкість пластин, які входять у зварну конструкцію, буде забезпечена, якщо сумарні напруження в пластині від зварювання і від зовнішніх стискаючих сил не будуть перевищувати критичних напружень. Для забезпечення стійкості стиснутих пластин без збільшення їхньої товщини очевидно необхідно знижувати величину зварювальних напружень. Це можна здійснити двома шляхами: зміною режиму зварювання (зменшенням величини погонної енергії) і виконанням зварювання в умовах, що зменшують величину поздовжнього укорочення, а отже, і величину поздовжніх зварювальних напружень стиску.

Перший шлях зв'язаний з розмірами катета тих швів, якими прикріплюються до стиснутої пластини ребра жорсткості. Оскільки погонна енергія залежить від розміру катета кутового шва, то зменшуючи катет будемо знижувати і величину погонної енергії. Як показали проведені дослідження, зі збільшенням відношення катета k до товщини стиснутої пластини стійкість падає, що виражається у зниженні припустимої відстані b між ребрами жорсткості. На рис. 6.8 приведені залежності припустимого відношення $\frac{b}{\delta}$ від відношення

$\frac{k}{\delta}$ для пластин двох типів: для пластин обпертої по трьох сторонах з вільною четвертою стороною (a) і для пластин обпертої по чотирьох сторонах (b).

З наведених залежностей випливає, що неприпустимо при проектуванні збільшувати розміри кутових швів у запас, так само як не можна виконувати їх з перевищенням проектних розмірів.

Другий шлях заснований на тому, що сума залишкових пластичних деформацій укорочення ν , що залишилися, зменшується при створенні у конструкції початкових напружень розтягу. Користуючись відповідними залежностями, наведеними в п. 5.3, можна встановити відношення m_σ зменшеного значення ν' (за умови попереднього розтягу) до величини ν , коли немає початкових напружень. У такому ж відношенні зменшаться зварювальні напруження стиску, що призведе до підвищення місцевої стійкості зварної конструкції.



1 – при однібічних швах; 2 – при двосторонніх швах

Рисунок 6.8 – Залежність припустимих значень $\frac{b}{\delta}$ від відношення $\frac{k}{\delta}$

при різних напруженнях від зовнішнього навантаження σ_{zov}

Цей шлях є більш дієвим, тому що при фактичному катеті k стійкість буде така, якби катет становив $k' = m_\sigma \cdot k$, де m_σ менше за одиницю. Для створення початкового напруженого стану можна використовувати власну вагу конструкції. Так, наприклад, для запобігання випинанню тонкої стінки двотаврової балки від виконання поясних швів можна зібрану балку поставити на дві опори, унаслідок чого під дією власної ваги в нижньому поясі й нижній кромці стінки виникнуть початкові напруження розтягу, що легко можна підрахувати. Знаючи початкові напруження $\sigma_{поч}$, за відношенням $\frac{\sigma_{поч}}{\sigma_m}$ знаходимо величину m_σ , що визначає приведений катет $k' = m_\sigma \cdot k$.

З графіків на рис. 6.8 щодо $\frac{k'}{\delta}$ знаходимо припустиму величину $\frac{b}{\delta}$.

Приблизно такий самий результат можна одержати, якщо зварену конструкцію піддати розтягу силою, що викликає напруження $\sigma_{зав.р.}$. У цьому випадку приведений катет k' можна визначити за формулою:

$$k' = k \sqrt{\frac{\sigma_m - \sigma_{зав.р.}}{\sigma_m}}$$

Подальший хід визначення стійкості залишається таким самим, як і при розтягу перед зварюванням.

Загальна стійкість стиснутого зварного стержня, як показали дослідження, *залежить не стільки від величини зварювальних напружень стиску, скільки від розташування у поперечному перерізі зон зварювальних напружень розтягу*. Чим далі від центру ваги перерізу розташовані зони напружень розтягу, тим сильніше вони підвищують загальну стійкість стержня. Тому одним із засобів підвищення загальної стійкості стиснутих зварних стержнів є створення в них якомога більш віддалених від центра ваги перерізу зон із напруженнями розтягу.

На рис. 6.9, *а* приведено двотавровий переріз стиснутої зварної колони. Якщо на вільні кромки поясних аркушів наплавити поздовжні валики, то загальна стійкість колони підвищується. Це зумовлено тим,

що замість напружень стиску (рис. 6.9, б) на вільних кромках будуть напруження розтягу (рис. 6.9, в). Характерно, що при квадратному перерізі колони з розташуванням зварних швів, показаним на рис. 6.9, з, випинання при втраті стійкості відбувається завжди тільки в напрямку осі $I-I$, що пояснюється різною величиною напружень розтягу на поверхні колони, як це видно з рис. 6.9, д.

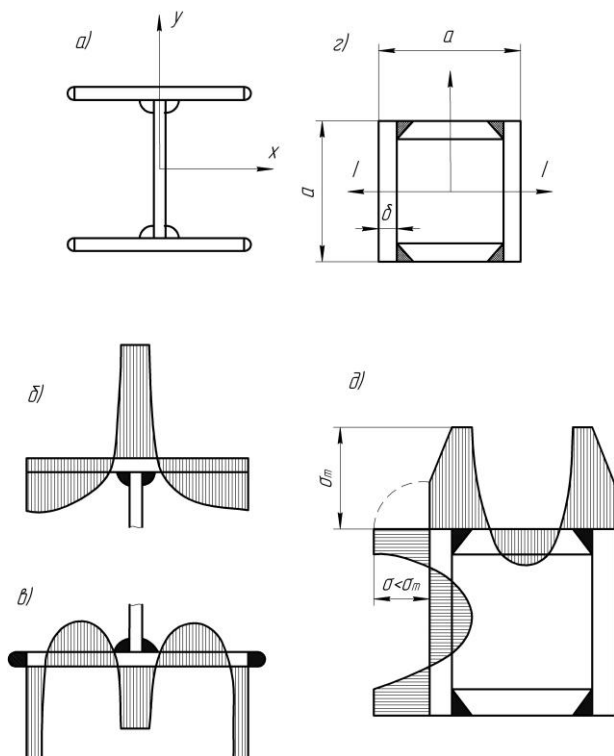


Рисунок 6.9 – Перерізи стиснутих елементів та схеми епюр зварювальних напружень

Для підвищення загальної стійкості стиснутих стержнів необхідно розташовувати зварні шви так, щоб вони знаходились якомога далі від тієї осі стержня, щодо якої є найбільш ймовірною втрата стійкості.

З наведених прикладів видно, що при розробці технологічного процесу можна передбачити ряд технологічних заходів, що підвищують міцність, витривалість і стійкість зварних конструкцій.

Питання для самоперевірки

1. Фактори, що визначають працездатність зварних конструкцій.
2. Використання додаткового поля напружень для підвищення працездатності.
3. Вплив поля напружень від зварювання на зміну властивостей металу зварної конструкції.
4. Способи підвищення статичної міцності зварних з'єднань зі зварними швами, що мають знижену границю текучості порівняно з основним металом.
5. Способи підвищення деформаційної здатності з'єднань з крихкими прошарками.
6. Способи підвищення ударної міцності зварних з'єднань.
7. Засоби створення у конструкціях поля додаткових напружень.
8. Використання поля зварювальних напружень для підвищення витривалості конструкцій із концентраторами напружень.
9. Використання статичного розтягу для підвищення витривалості конструкцій з концентраторами напружень.
10. Використання термообробки для підвищення витривалості конструкцій.
11. Ефективність використання конструктивних прийомів для підвищення витривалості конструкцій.
12. Способи забезпечення місцевої стійкості конструкцій.
13. Фактори, які впливають на загальну стійкість стиснутих елементів.
14. Способи забезпечення загальної стійкості стиснутих зварних елементів.

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА КОНСТРУКЦІЙ

Кожне проєктне рішення технологічного процесу виготовлення конструкцій є варіантним. Згідно з вимогами експлуатації, надійності та довговічності головним критерієм при виборі матеріалів, вузлів, конструкцій та компоновання є їх економічність.

Тому однією з основних задач на етапі проєктування є вибір найбільш економічно ефективних рішень конструкцій, які рівною мірою задовольняють умовам експлуатації, надійності та довговічності.

При розробці технологічних процесів виробництва конструкцій серед наявних варіантів проєктних рішень обирають методи отримання заготовок та їх обробки, виготовлення деталей та зміцнення їхніх поверхонь, складання вузлів, види та специфікації оснащення, умови організації технологічного процесу. Для цього використовують методи техніко-економічного аналізу.

При проведенні техніко-економічного аналізу технологічних процесів займаються виявленням залежності між технічними характеристиками та економічними результатами виробництва. Зазвичай зустрічається декілька ситуацій, у кожній з яких використовується окремий критерій ефективності:

1. Розглядаються варіанти обробки виробу на однаковому обладнанні й з однаковим оснащенням, але з різною технологічною послідовністю операцій. У такому випадку змінюється трудомісткість, тому критерієм, за яким оцінюється ефективність технологічного процесу, є *мінімум трудомісткості*.

2. Зіставляються варіанти проєктних рішень з різними поточними витратами, але без капітальних вкладень в основні засоби виробництва. Критерієм ефективності при цьому є *собівартість*. Собівартість розраховується поелементним (за статтями калькуляції) або нормативним методом (із застосуванням величини відхилень від чинних норм).

3. Порівнюються варіанти, що потребують зміни не лише поточних, а й капітальних (одноразових) затрат. Критерієм при цьому

рекомендується використовувати показник річних *приведених затрат* Z_n :

$$Z_n = C_p + E_n \cdot K, \quad (7.1)$$

де C_p – собівартість річного випуску виробів;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

K – капітальні вкладення в основні засоби.

4. Розглядаються варіанти з різними умовами та технологією виробництва, що призводять до зміни показників якості виробу. При цьому можлива зміна ціни виробника. У такому випадку критерієм може прийматися *прибуток* виробника, який дозволяє врахувати зміни в поточних та капітальних витратах, цінах, обсягах випуску та продажів.

Надалі в розділі зосередимо свою увагу на перших двох ситуаціях і зупинимось детальніше на таких економічних показниках ефективності технологічних процесів, як трудомісткість та собівартість виготовлення конструкцій.

7.1. Залежність трудомісткості виготовлення виробів від конструктивних форм та технології виготовлення

Вплив конструктивних форм. Конструктивна форма металевих конструкцій з погляду впливу її на трудомісткість описується *виробничими показниками*, під якими розуміються вагові показники, кількість елементів (деталей) або однойменних операцій.

Показники проекту конструкцій, які характеризують його якість з погляду трудомісткості, можна поділити на дві групи:

- показники, які характеризують споруду загалом;
- показники, які характеризують окремий конструктивний елемент.

До першої групи показників належать: кількість конструкцій, ступінь типізації та стандартизації; вага споруди, віднесена до геометричного вимірника (наприклад, до 1 м^2 площі будівлі).

Друга група показників містить: кількість деталей, складальних марок, отворів, зварних швів, а також показники, що характеризують трудомісткість різання, стругання тощо.

Одним з основних показників *першої групи*, що визначає трудомісткість виготовлення споруди, є кількість конструкцій. Вона залежить від компоувального рішення. При зменшенні кількості конструкцій знижуються затрати праці на складання та зварювання і скорочується кількість деталей, які визначають трудомісткість конструкції.

Вибір оптимальних розмірів кожної конструкції повинен здійснюватися з урахуванням ваги, трудомісткості та вартості виготовлення.

Необхідно зазначити, що зменшення кількості конструкцій та пов'язане з цим зниження затрат праці вступає в деяку суперечність із показником, що характеризує серійність виготовлення. Однак вплив серійності, незважаючи на його важливість, не є визначальним для трудомісткості виготовлення, і тому напрям до зменшення кількості конструкцій повинен залишатися головним.

Іншим важливим фактором, що призводить до зниження трудомісткості виготовлення конструкції, є застосування типових конструкцій. Крім того, за рахунок типізації та стандартизації підвищується і серійність (тобто повторюваність) виготовлення.

Типізацією називається створення конструкцій однакового типу з модульованими параметрами, з використанням уніфікованих конструктивних елементів деталей та вузлів. При цьому зниження трудомісткості виготовлення відбувається за рахунок можливості вдосконалення стаціонарних типових технологічних процесів із застосуванням кондукторів та пристосувань, скорочення обсягів проектування, і головне, завдяки збільшенню повторюваності виготовлення однотипних конструктивних елементів.

Ведучими проектними організаціями постійно проводиться робота з типізації металевих конструкцій. На сьогодні створені типові проекти підприємств металургійної промисловості: доменних комплексів, мартенівських та конвертерних цехів тощо. Типізовано багато спеціальних конструкцій і споруд: резервуари об'ємом до 10 тис. м³, газгольдери об'ємом до 30 тис. м³, опори ліній електропередач, радіо- та телевежі та щогли. При цьому роботи по типізації конструкцій продовжуються.

Вищим ступенем типізації є *нормалізація* та *стандартизація* конструкцій. При цьому конструктивні рішення найбільш ретельно

проробляються в напрямку максимального задоволення вимог технологічності та зниження трудомісткості. Застосування стандартних або нормалізованих конструкцій створює максимальну повторюваність однакових конструкцій і деталей, що дозволяє виготовляти їх великими серіями і створює передумови для переходу до потокового способу виготовлення конструкцій. З конструкцій промислових будівель типізовані ферми, ліхтарі, підкранові балки, зв'язки тощо. При роботі над такими конструкціями значно знижено кількість типорозмірів.

Як зазначалося вище, основним результатом застосування типових і нормалізованих конструкцій є підвищення серійності, що, у свою чергу, приводить до скорочення трудозатрат за рахунок зменшення часу на виконання підготовчого етапу (тривалість якого на одну конструкцію чи деталь зменшується пропорційно збільшенню серії), скорочення тривалості перерв між партіями, що виготовляються, набуття навичок робітників для виготовлення даних виробів і конструкцій, застосування пристосувань, які тим досконаліші, чим більш серійна партія. При певному обсязі серії стає рентабельним перехід до виготовлення на поточкових лініях.

Ще одним виробничим показником трудомісткості виготовлення споруди є його *вага*, яка визначає обсяг операцій, пов'язаних із переміщенням конструкцій та деталей у процесі виготовлення (подача до установки, укладання в робоче положення, вилучення з установки та переміщення до іншої установки тощо). Вага характеризує також розміри конструкцій і деталей та впливає на трудомісткість процесів різання, складання та ін. Зменшення ваги без ускладнення конструкції завжди призводить до зниження трудомісткості виготовлення виробу.

Кількість деталей – один із головних показників другої групи, що визначають трудомісткість виготовлення конструкцій. Від кількості деталей залежить обсяг багатьох технологічних операцій: розмітки, намітки, різання, стругання, вторинної правки, складання. Опосередковано від кількості деталей також залежить трудомісткість зварювання і формування отворів. Конструктивна форма, розміри, вага та технологія виготовлення основних і допоміжних деталей неоднакова, і, відповідно, їхній вплив на трудомісткість також різний. Причому питома трудомісткість допоміжних деталей (на одиницю ваги) значно вище за питому трудомісткість основних деталей.

Очевидним є той факт, що при зменшенні загальної кількості деталей знижується трудомісткість виготовлення вузлів та всієї конструкції. Таке зменшення може бути реалізоване переважно за рахунок допоміжних деталей, кількість яких значною мірою залежить від проектувальника. Кількість основних деталей може бути зменшена завдяки застосуванню в конструкціях мірного прокату та при зміні конструктивної форми: спрощенні геометричної схеми конструкції, заміні складених перерізів цілісними і т. ін.

Кількість деталей тісно пов'язана з кількістю складальних одиниць. У табл. 7.1 для наочності наведено відношення кількості деталей до кількості складальних марок у деяких конструкціях. Це відношення є досить постійним, тому визначення впливу цього показника на трудомісткість можна сумістити з показником кількості деталей.

Наступний показник другої групи виробничих показників – це *кількість операцій*. У зварних конструкціях кількість операцій невелика, але вплив кожної з них на трудомісткість обробки є суттєвим, оскільки навіть за наявності невеликої кількості отворів у деталях є потреба в значних затратах додаткового часу на встановлення деталей для свердління і пробиття отворів. Тому у проектах за можливості потрібно особливо запобігати одинарних отворів у деталях.

Кількість зварних швів (або кількість наплавленого металу) – ще один з основних виробничих показників зварної конструкції. Він визначає трудомісткість зварювання, яка становить 30-35 % від суми всіх трудозатрат на виготовлення конструкцій. Кількість зварних швів залежить від навантажень, основного геометричного параметра (прольоту, висоти), конструктивного рішення (суцільна або ґратчаста конструкція), типу швів, форми обробки кромки та способу зварювання.

Показники, що характеризують трудомісткість різання, стругання та інших операцій виготовлення, визначаються обсягами робіт, які складаються в результаті конструювання. Вирішальне значення для трудомісткості цих операцій має вага конструкції.

Таким чином, із наведеного аналізу видно, що всі виробничі показники можуть бути зведені до декількох основних:

- по першій групі – вага, кількість конструкцій та серійність;
- по другій групі – вага, кількість деталей, отворів та зварних швів.

Таблиця 7.1 – Кількість деталей та складальних марок на 1 т конструкцій

Конструкція	Виробничі показники на 1 т		
	Кількість деталей	Кількість складальних марок	Відношення кількості деталей до кількості складальних марок
<i>Колони зварні листові:</i>			
- постійного перерізу	32	14	2,3
- змінного перерізу	24	8	3
<i>Колони з ґратчастою та листовою підкрановою частиною</i>	26	9	2,9
<i>Ферми:</i>			
- кроквяні з кутників	34	17	2
- кроквяні із гнутих замкнених профілів із типовою геометричною схемою	22	10	2,2
- кроквяні зі спрощеною схемою	18	8	2,2
- кроквяні із трубчатих профілів	20	9	2,2
<i>Ліхтарі з кутників</i>	33	16	2,1
<i>Зв'язки</i>	35	6	2,1
<i>Фахверк (у середньому)</i>	18	3	5,8

Вплив технології виготовлення. Розмір трудових затрат залежить не тільки від конструктивної форми, але й від технології виготовлення. Конструктивна форма і технологія тісно взаємопов'язані. Конструктивна форма визначає технологію, і, навпаки, – прогресивна технологія виготовлення вимагає відповідної конструктивної форми. Так, наприклад, впровадження технології автоматичного зварювання потребувало відповідної зміни конструкції балок та колон, основою яких є зварний двотавр; застосування кондукторного утворення отворів припускає стандартний рисунок отворів, з іншого боку, застосування стандартних конструкцій, що виготовляються великими серіями, припускає перехід на виготовлення їх на потокових лініях.

На заводах металевих конструкцій рівень механізації технологічних процесів та рівень організації праці різний, тому фактична трудомісткість виготовлення конструкції також різниться. Однак ця відмінність не дуже суттєва, особливо на заводах, побудованих за типовими проектами, у яких закладені раціональна схема виготовлення та сучасне обладнання.

Таким чином, визначення трудомісткості виготовлення конструкцій при варіантному проєктуванні повинне враховувати не тільки виробничі показники конструкції, що характеризують конструктивну форму, але й технологію виготовлення. При цьому необхідно передбачати найбільш прогресивну технологію, яка відповідає конструктивній формі конструкції, що аналізується.

Отже, трудомісткість виготовлення, яка визначається для порівняння варіантів, повинна відповідати середньопрогресивним фактичним затратам праці на підприємствах. Показники трудомісткості не є стабільними в часі та мають тенденцію до зменшення за рахунок підвищення рівня механізації технологічних процесів, скорочення невиробничих затрат тощо. У цьому відношенні вони відрізняються від показників ваги та інших виробничих показників, які характеризують конструктивну форму, і тому є більш постійними.

Варто підкреслити, що порівняльний аналіз конструкцій за трудомісткістю виготовлення може відбуватися на будь-якому рівні продуктивності праці, оскільки основна мета такого порівняння – виявити відносну ефективність варіантів, що розглядаються. Для порівняльного аналізу важливий не абсолютний рівень затрат праці, а відносний, що суттєво спрощує розв’язання задачі.

7.2. Собівартість виготовлення зварних конструкцій

Собівартість – це найбільш узагальнюючий економічний показник діяльності промислового підприємства. Він відображає всі затрати, які несе підприємство при виробництві та збуті продукції.

Усі позитивні та негативні сторони роботи підприємства отримують відображення у собівартості, тому вона тісно пов’язана з іншими показниками роботи підприємства, наприклад, виконанням плану, рівнем продуктивності праці, якістю продукції тощо.

За послідовністю формування собівартості на підприємстві вона поділяється на цехову, фабрично-заводську та повну.

До *цехової собівартості* включаються затрати всіх цехів із виготовлення продукції без урахування загальновиробничих (непрямих виробничих) витрат. Якщо до цих затрат додати загальновиробничі витрати, то отримують *фабрично-заводську собівартість*. *Повна*

собівартість складається з фабрично-заводської собівартості та позавиробничих витрат, до яких належать витрати зі збуту продукції, затрати на науково-дослідні роботи тощо.

Розрізняють також *планову* та *фактичну* собівартість.

Планова собівартість показує допустимий рівень затрат на виробництво та реалізацію продукції, *фактична* собівартість характеризує дійсні затрати, які можуть бути нижчими або вищими плановими. У фактичній собівартості відображаються так звані невивиробничі витрати – втрати від браку, штрафи і т. ін.

Затрати на виробництво промислової продукції групуються за *економічними елементами* та *елементами затрат*.

Групування затрат за первинними елементами дозволяє визначити затрати за цими елементами та співвідношення між матеріальними затратами (уречевлена праця) і заробітною платою (жива праця). Таке групування дає можливість пов'язати план собівартості з іншими розділами техпромфінплану – планом заробітної плати та планом матеріально-технічного постачання.

Структура затрат на виробництво за економічними елементами при виготовленні металевих конструкцій щодо загальної собівартості наведена у табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Структура собівартості виготовлення конструкцій за економічними елементами (%)

Вид затрати за економічними елементами	Частка затрат, %
Сировина та основні матеріали, покупні напівфабрикати	66 – 70
Допоміжні матеріали	1,6 – 2,0
Технологічне паливо	0,4 – 0,6
Зовнішня енергія (електроенергія, вода)	1,3 – 1,6
Основна і додаткова заробітна плата всіх категорій робітників промислової групи	19 – 22
Амортизація	3 – 4
Інші грошові витрати	4 – 7

Згідно з даними таблиці 7.2 можна зробити висновок, що матеріальні затрати, включаючи сировину, основні та допоміжні матеріали, паливо, енергію та амортизацію, становлять 78-81 %, а решта – заробітна плата – 19-22 % від всієї собівартості продукції.

Групування затрат за статтями витрат дозволяє бачити їх місце та призначення та знати, скільки коштує підприємству виробництво та реалізація окремих видів продукції. Так складають калькуляцію собівартості окремих видів конструкцій. Калькуляційне групування затрат виконують з огляду на спосіб віднесення їх на продукцію (прямі та непрямі витрати).

Структура собівартості виготовлення металевих конструкцій за окремими статтями затрат щодо загальної собівартості наведена в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Структура собівартості виготовлення конструкцій за статтями затрат (%)

Вид статті затрат	Частка затрат, %
Сировина та основні матеріали	66 – 70*
У тому числі метал	61 – 67*
Основна заробітна плата виробничих робітників	6 – 9*
Цехові затрати	15 – 18**
Загальнозаводські затрати	4 – 6**
Збутові (комерційні) затрати	2 – 3**

* – прямі затрати; ** – непрямі затрати.

Тобто, за даними таблиці 7.3, структура собівартості виготовлення металевих конструкцій змінюється у сторону збільшення матеріальних затрат при одночасному зниженні витрат на заробітну плату, цехових та загальнозаводських витрат.

Варто зауважити, що така зміна структури собівартості на конкретних виробничих підприємствах може бути пов'язана з підвищенням продуктивності праці на заводах та у зв'язку з цим зменшенням питомої ваги заробітної плати; збільшенням вартості сировини за рахунок застосування більш вартісних прогресивних матеріалів та зростанням кількості покупних напівфабрикатів.

У підсумку можна зазначити, що технологічність будь-якої конструкції забезпечується конструктивними рішеннями практично на всіх стадіях та етапах проектування нового продукту. При цьому на кожній стадії необхідно врахувати техніко-економічну ефективність як конструктивних форм, так і технології виготовлення.

Високих результатів у цій галузі можливо досягти лише при координації роботи та співпраці всіх учасників процесу проектування та освоєння виробництва нового продукту: конструкторів, технологів, виробників та менеджерів.

Питання для самоперевірки

1. Сутність техніко-економічного аналізу технологічних процесів.
2. Критерії ефективності технологічного процесу.
3. Фактори, від яких залежить трудомісткість виготовлення конструкції.
4. Поняття «виробничі показники» проекту конструкції.
5. Основні показники проекту конструкцій, які характеризують споруду загалом.
6. Основні показники проекту конструкцій, які характеризують окремий конструктивний елемент.
7. Залежність трудомісткості від конструктивної форми.
8. Залежність трудомісткості від технології виготовлення.
9. Собівартість виготовлення конструкцій та її види.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2391:2010. Система технологічної документації. Терміни та визначення основних понять. – [На заміну ДСТУ 2391-94 ; чинний від 2010-12-09]. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2011. – 38 с.

2. ДСТУ 3278-95. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення. – [Чинний від 1995-12-27]. – Вид. офіц. – Київ : Держстандарт України, 1996. – 63 с.

3. ДСТУ 3321:2003. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять. – [На заміну ДСТУ 3321-96 ; чинний від 2003-12-08]. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2005. – 55 с.

4. ДСТУ 3951.1-2000. Технічні умови та процедура підтвердження відповідності технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Частина 1. Загальні правила для зварювання плавленням (ISO 9956-1:1995). – [Чинний від 2000-04-06]. – Вид. офіц. – Київ : Держстандарт України, 2000. – 12 с.

5. Економічне обґрунтування інженерних рішень. Тексти лекцій / уклад. М. В. Поленкова. – Чернігів : ЧДТУ, 2016. – 71 с.

6. Жидков А. Б. Зниження залишкових деформацій в тонколистових металоконструкціях шляхом примусового тепловідводу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / А. Б. Жидков ; НТУУ “Київський політехнічний інститут”. – К., 2000. – 18 с.

7. Кривов Г. О. Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Г. О. Кривов, К. О. Зворикін. – К. : КВІЦ, 2012. – 896 с.: іл.

8. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник / Л. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький та ін. ; за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв : НУК, 2016. – 248 с.

9. Небава М. І. Економіка та організація виробничої діяльності підприємства. Ч. 2. Організація виробництва : навчальний посібник / М. І. Небава, О. О. Адлер, О. Й. Лесько. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 131 с.

10. Небава М. І. Економіка та організація виробничої діяльності підприємства. Ч. 1. Економіка підприємства: навчальний посібник / М. І. Небава, О. О. Адлер, О. Й. Лесько. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 117 с.

11. David L. Whitman; Ronald E Terry. Fundamentals of Engineering Economics and Decision Analysis. Morgan & Claypool. – 2012.

Навчальне видання

Новомлинець Олег Олександрович,
Олексієнко Сергій Владиславович,
Ющенко Світлана Михайлівна

**ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Навчальний посібник

Підписано до друку 05.07.2023. Формат 60×84/16. Обл.-вид. арк. – 6,0.
Ум. друк. арк. – 7,6. Тираж 100 пр. Замовлення № 15/23.

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.