Хмельницький національний університет

ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Лабораторний практикум
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
інженерних спеціальностей

Затверджено на засіданні кафедри
трибології, автомобілів
та матеріалознавства.
Протокол № 3 від 25.10.2025

Хмельницький 2025

Технологія конструкційних матеріалів : лабораторний практикум для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерних спеціальностей / В. А. Гончар, І. В. Драч, П. В. Каплун, С. В. Морозов. Хмельницький : ХНУ, 2025. 114 с.

Укладачі: Гончар В. А., канд. техн. наук, доц.;
Драч І. В., д-р техн. наук, проф.;
Каплун П. В., д-р техн. наук, проф.
Морозов С. В., зав. лаб. МННЕ ХНУ.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук. проф.

Випусковий редактор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Чопенко О. В.

Макетування та друк здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. до друку 30.12.2025. Зам. № 114/25, тир. 75 прим., 2025.

© ХНУ, 2025

Вступ

Навчальна дисципліна «Технологія конструкційних матеріалів» є обов'язковим освітнім компонентом загальної підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерних спеціальностей – G8 «Матеріалознавство», G9 «Прикладна механіка», G11 «Машинобудування» (Технологічні машини та обладнання харчових виробництв), G11 «Мехатронні системи в технологічних машинах та обладнанні», H7 «Агроінженерія», J8 «Автомобільний транспорт» і спрямована на поглиблення теоретичної та практичної підготовки здобувачів з основ виробництва та обробки металевих і неметалевих матеріалів для виготовлення деталей машин та інших металоконструкцій.

Мета дисципліни – сформувати у здобувачів системні теоретичні знання та практичні вміння і навички, необхідні для розв'язання технологічних завдань у виробництві металів, фасонних заготовок та металоконструкцій, включно з розрахунком шихтових матеріалів і заготовок, визначенням режимів технологічних процесів та проєктуванням технологічного оснащення ливарного, ковальсько-пресового, зварювального й механообробного виробництв.

Завдання дисципліни – формування навичок характеризувати хімічні та фізичні основи добування і обробки металевих і неметалевих конструкційних матеріалів, сутність ливарного, ковальсько-пресового, зварювального, механооброблюваного виробництв і переробки неметалевих конструкційних матеріалів у технічні вироби; оцінювання технологічних можливостей, переваг та недоліків формоутворення і відновлення фасонних виробів відомими методами лиття, тиском, зварюванням, механічної та іншими видами обробки; здійснювати оцінювання механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей конструкційних матеріалів, виявлення дефектів та причин їх утворення, розробки креслень і технологічних процесів виготовлення і відновлення пошкоджених і спрацьованих деталей.

Виконання завдань лабораторних робіт поглиблює засвоєння програмного матеріалу відповідної теми, надає практичних навичок розрахунків, основ проєктування заготовок і технологічного оснащення різних способів формотворення, є надійним ґрунтом для виконання курсових та дипломних робіт і проєктів. Контроль та оцінка результатів індивідуальних завдань дає можливість виявити здібності здобувача до самостійного розв'язання поставлених задач і вміння приймати правильні рішення.

Лабораторні роботи з дисципліни носять практичний характер, в кожній з них стисло викладені необхідні для її виконання основні теоретичні положення, методика проведення і завдання для самостійного виконання практичної частини, приклади виконання типового завдання, вимоги до оформлення звіту з проведеної роботи та контрольні питання для самоконтролю знань.

Після вивчення дисципліни здобувач має пояснювати хімічні, фізичні й технологічні основи добування, структурування та обробки металевих і неметалевих конструкційних матеріалів; класифікувати та характеризувати методи лиття, обробки тиском, зварювання, механічної та інших видів обробки, визначати їх можливості, переваги та обмеження для формоутворення виробів; застосовувати типові методи розрахунку шихтових матеріалів, заготовок, технологічних режимів і параметрів основних процесів ливарного, ковальсько-пресового, зварювального та механообробного виробництв; проєктувати елементи технологічного оснащення, технологічні маршрути виготовлення і відновлення деталей, використовуючи нормативно-технічні вимоги та сучасні методи моделювання; визначати та оцінювати механічні, технологічні й експлуатаційні властивості конструкційних матеріалів, ідентифікувати дефекти та установлювати причини їх утворення; інтерпретувати результати розрахунків, експериментальних досліджень і моделювання, робити обґрунтовані висновки щодо придатності матеріалу або технології для конкретного виробництва; шукати, відбирати та використовувати науково-технічну інформацію, довідкові дані, нормативну документацію та сучасні інформаційні ресурси для розв'язання типових і складних інженерних задач у галузі технології конструкційних матеріалів.

Загальні методичні поради. Завдання лабораторних робіт здобувачі виконують після засвоєння лекційного матеріалу з відповідної теми дисципліни. Методика розрахунків ґрунтується на знаннях, отриманих ними при вивченні математики, хімії, фізики та основ креслення. Завдання виконують в окремому зошиті або на аркушах паперу ф. А4. Зміст текстової частини має містити тему завдання, умову задачі та її розв'язання подібно до наведених у практикумі прикладів. Рисунки та схеми виконують олівцем або комп'ютерною графікою у масштабі за вимогами машинобудівного креслення.

За результатами виконання лабораторної роботи складається звіт, який має містити: назву і мету роботи, вихідні дані, детальний розрахунок необхідних показників, результати та висновки з виконаної роботи. Здобувач, який не підготував звіт з лабораторної роботи, до її захисту не допускається.

Захист лабораторної роботи здійснюється на наступному занятті у формі усного опитування, що дає змогу найбільш об'єктивно виявити якість засвоєних знань та здатність здобувача до критичного мислення. Під час захисту здобувач повинен:

– виявити розуміння сутності поставленого завдання з теми;

– обґрунтувати фізико-хімічні процеси і закономірності та математичні залежності розрахункових величин, які використовують і визначають при виконанні завдання;

– характеризувати принципи і правила маркування та визначення наближеного хімічного складу і технологічних властивостей сплавів чорних та кольорових металів;

– показати вміння просторового уявлення форми деталі за її робочим кресленням і проаналізувати технологічність деталі з урахуванням можливостей заданого способу формоутворення;

– пояснити основні принципи проєктування та розрахунку фасонних заготовок і формотворних поверхонь технологічного оснащення;

– знати методику розрахунку площі, поверхні та об'єму заданої деталі та заготовки для її виготовлення;

– визначати основні принципи розрахунку енергетичних, кінематичних та геометричних параметрів формоутворення фасонних заготовок і деталей машин та зварних з'єднань;

– вибрати оптимальну послідовність і зобразити принципові схеми основних технологічних операцій заданого способу формоутворення заготовок деталей;

– оцінити ефективність цього способу формоутворення заготовок і деталей за критерієм коефіцієнта корисного використання матеріалу.

Здобувачі, які успішно виконали всі заплановані лабораторні роботи та захистили їх, допускаються до підсумкового семестрового контролю з дисципліни.

Оцінювання лабораторних робіт здійснюється за інституційною чотирибальною шкалою. Оцінки «відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно» виставляються викладачем в електронному журналі групи. Оцінка за лабораторний практикум є складовою підсумкової семестрової оцінки здобувача.

Розподіл балів за лабораторні роботи і критерії оцінювання визначаються робочою програмою дисципліни.

Перед допуском до виконання лабораторних робіт здобувачі проходять інструктаж з техніки безпеки та охорони праці з фіксацією їх підписів у журналі, який зберігається у відповідальної особи лабораторії.

Лабораторна робота 1

Розрахунок шихтових матеріалів для плавлення сплавів чорних і кольорових металів

***Мета*:** набути навичок визначення виду та хімічного складу металевого сплаву за відомою його маркою й освоїти спрощену методику розрахунку шихтових матеріалів для виплавляння металевих сплавів в умовах ливарного виробництва.

Матеріали, обладнання, прилади: завдання лабораторної роботи виконуються засобами табличного процесора Microsoft Excel або системи комп'ютерної алгебри MATHCAD.

Короткі теоретичні відомості

Різні матеріали, що використовуються для виробництва деталей машин, приладів та іншої техніки називаються конструкційними. Деталі машин виготовляють різними способами за допомогою різноманітних інструментів – прес-форм, штампів, різального інструменту тощо. Для виготовлення інструментів застосовують інструментальні матеріали.

Конструкційні матеріали поділяють на металеві та неметалеві. Частка металевих матеріалів складає більше 90 % усіх конструкційних матеріалів, що використовуються в машинобудуванні. До них відносять сплави на основі заліза – сталі та чавуни (чорні метали), сплави на основі міді, алюмінію, магнію та титану (кольорові метали). До неметалевих конструкційних матеріалів відносять пластмаси, гуму, картон, дерево, скло, азбест та інші.

Серед металевих конструкційних матеріалів чорні метали мають найбільшого значення. Особливо широко застосовують різні сталі як для виробництва деталей, так і різного інструменту. Сталь – це сплав на основі заліза з вуглецем, що практично містить до 1,5 % вуглецю. Залежно від хімічного складу сталі поділяють на вуглецеві та леговані.

Вуглецеві сталі крім заліза та вуглецю завжди містять домішки, які потрапляють у сталь у процесі її виробництва. Це марганець (≤ 0,8 %), кремній (≤ 0,4 %), фосфор (≤ 0,05 %) і сірка (≤ 0,05 %). Марганець і кремній не погіршують властивостей сталі й їх вважають корисними, а фосфор та сірка різко зменшують міцність та пластичність сталі й є шкідливими домішками.

Суттєвий вплив на властивості сталі має вуглець, тому залежно від його вмісту сталі поділяють на низько- (0,3 %), середньо- (0,3–0,5 %) та високовуглецеві (> 0,5 %).

За призначенням вуглецеві сталі поділяють на конструкційні та інструментальні.

Конструкційні вуглецеві сталі застосовують для виготовлення помірно навантажених деталей і залежно від механічних властивостей їх поділяють на сталі звичайної якості (ДСТУ 8539:2015) та сталі якісні вуглецеві (ДСТУ 7809:2015).

Сталі звичайної якості залежно від показників, регламентованих державними стандартами, поставляють трьох груп. У сталях групи А завод-виробник гарантує механічні властивості (міцність, пластичність), в сталях групи Б – хімічний склад, а в сталях групи В – механічні властивості і частково хімічний склад. Сталі звичайної якості маркують таким чином:

Ст 0, Ст 1, Ст 2, Ст 3, Ст 4, Ст 5, Ст 6 (група А);
Б Ст 0, Б Ст 1, Б Ст 2, Б Ст 3, Б Ст 4, Б Ст 5, Б Ст 6 (група Б);
В Ст 0, В Ст 1, В Ст 2, В Ст 3, В Ст 4, В Ст 5 (група В).

Цифра у марках таких сталей є умовним позначенням і не визначає ні їх механічних властивостей, ні їх хімічного складу. Так, наприклад, міцність сталі Ст.0 більше 310 МПа, а сталь БСт.0 містить менше 0,25 %. Ці сталі добре обробляються, але вони не зміцнюються термічною обробкою і з них виготовляють другорядні деталі машин.

Вуглецеві якісні сталі відповідно до ДСТУ 7809:2015 поставляються таких марок: сталь 08, сталь 10, сталь 15, сталь 20,…, сталь 65. Число в марці цих сталей вказує на вміст вуглецю у ***сотих*** частках відсотка. Так, наприклад, широко відома з цього класу сталь 45 містить 0,45 % С. Середньо- та високовуглецеві якісні сталі зміцнюються термічною обробкою. Їх застосовують для виготовлення помірно навантажених деталей.

Інструментальні вуглецеві сталі поставляються якісними та високоякісними. Якісні сталі виготовляють марок У7, У8, У9,…, У13, де число вказує на вміст вуглецю в ***десятих*** частках відсотка. Так, наприклад, сталь У10 містить 1 % С. Високоякісні сталі У7А, У8А,…, У13А відрізняються тим, що в них вміст таких шкідливих домішок, як сірка і фосфор, обмежений у порівнянні з якісними сталями. Якщо в сталі У7 вміст фосфору 0,03–0,05 % і сірки 0,03–0,05 %, то в сталі У7А вміст кожної з цих домішок не повинен перевищувати 0,03 %. Інструментальні вуглецеві сталі застосовують для виготовлення штампів і прес-форм, слюсарного, деревообробного та інших інструментів.

Леговані сталі на відміну від вуглецевих з метою поліпшення їх механічних або надання їм спеціальних властивостей сталі містять спеціально введені елементи. Такі елементи називаються легуючими і до них відносяться хром, нікель, титан, марганець (> 0,8 %), кремній (> 0,5 %), кобальт, вольфрам, молібден, ванадай та інші. За вмістом легуючих елементів ці сталі поділяються на низьколеговані (до 5 %), середньолеговані (5–10 %) і високолеговані (більше 10 %). За призначенням леговані сталі поділяють на конструкційні, інструментальні та спеціальні.

Для маркування легованих сталей у вітчизняній практиці прийнята система (ДСТУ 7806:2015), згідно з якою кожному легуючому елементу відповідає певна літера, а цифра після літери вказує вміст цього елемента у відсотках. Якщо після літери цифра відсутня, то вміст елементу до 1 %. Легуючі елементи позначають: хром – Х, нікель – Н, титан – Т, марганець – Г, кремній – С, кобальт – К, вольфрам – В, молібден – М, ванадій – Ф, мідь – Д, алюміній – Ю.

У марках конструкційних легованих сталей відповідно до ДСТУ 7806:2015 перші цифри (до букви) вказують на вміст вуглецю в ***сотих*** частках відсотка, а в інструментальних сталях – у ***десятих*** частках відсотка. Якщо перед літерами цифра відсутня, то вміст вуглецю близько 1 %.

***Приклади*:**

1) 18Х2Н4Т – конструкційна сталь, що приблизно містить 0,18 % C, 2 % Cr, 4 % Ni, 1 % Ti;

2) 30ХГСА – конструкційна високоякісна сталь, що приблизно містить 0,30 % C, 1 % Cr, 1 % Mn, 1 % Si;

3) 5ХНВ – інструментальна штампова сталь, що приблизно містить 0,5% C, 1 % Cr, 1 % Ni, 1 % W;

4) Х12М – інструментальна сталь, що приблизно містить 1 % C, 12 % Cr, 1 % Mo.

Сталі з особливими властивостями. Марки деяких широко вживаних сталей є винятком із загального правила. Зокрема, це стосується шарикопідшипникових та інструментальних швидкорізальних матеріалів. У ***підшипникових*** сталях міститься хром, вміст якого вказується в десятих частках відсотка, а не в цілих відсотках як у марках інших сталей, наприклад, сталь ШХ15 містить 1 % C і 1,5 % Cr, а інструментальна сталь Х9 містить біля 1 % C і 9 % Cr. У марках ***швидкорізальних*** сталей (ДСТУ 7304:2013) завжди міститься вольфрам, вміст якого у відсотках визначається числом після літери Р, наприклад: Р18 –

швидкорізальна інструментальна сталь, що містить біля 1 %С, 18 % W; Р6М5 – сталь швидкокорізальна, що містить ~1 % С, 6 % W, 5 % Мо.

Чавуни. Залізовуглецеві сплави, які практично містять від 2,5 до 4 % вуглецю і до 3 % кремнію, що сприяє частковому виділенню вуглецю у формі графітових включень, називають ***сірими*** чавунами. Залежно від конфігурації графітових включень сірі чавуни поділяють на звичайні, ковкі та високоміцні. У будові звичайних сірих чавунів включення графіту проявляються у вигляді вузьких гострокінцевих пластинок, у ковких чавунів – у вигляді грудок (платівок) довільної форми, а у високоміцних – у кулястій формі. Форма графітових включень, а не вміст вуглецю, є визначальним чинником, який впливає на механічні властивості чавуну і які позначаються у марках сірих чавунів. Так, наприклад, звичайному сірому чавуну, який має міцність при стисканні 250 МПа, відповідає марка СЧ 25 (ДСТУ 8833:2019), ковкому чавуну міцністю 600 МПа і відносним видовженням при розтягуванні до 3 % – марка КЧ 60-3, а високоміцному міцністю 1000 МПа і відносним видовженням до 4 % – марка ВЧ 1000-4 (ДСТУ 3925–99).

Сірі чавуни на відміну від вуглецевих сталей наділені кращими ливарними, антикорозійними та антифрикційними властивостями, здатні гасити механічні вібрації і коливання, але вони не піддаються пластичній деформації і не придатні для обробки тиском, обмежено зварюються. Єдиним способом виготовлення деталей з сірих чавунів є ливарне виробництво, яке виготовляє переважно корпусні та інші деталі складної форми.

Сплави на основі міді. Окрім вуглецевих та легованих сталей і сірих чавунів як конструкційні матеріали використовують сплави на основі кольорових металів. Серед них значне місце займають – бронза і латунь.

Бронза – це сплав міді з різними елементами, вміст яких також можна визначити за маркою сплаву. У марках бронзи завжди стоять літери «Бр», за якими ідуть позначення легуючих елементів (О – олово, А – алюміній, Ф – фосфор, Б – берилій, Мц – марганець, К – кремній, С – свинець, Ж – залізо і Ц – цинк), а потім вказується цифрами вміст легуючих елементів у відсотках відповідно до порядку розміщення букв. Наприклад, БрА5 – бронза, що містить 5 % алюмінію і 95 % міді; БрБ2 – бронза, що містить 2 % берилію і 98 % міді; БрОФ10-1 – бронза, що містить 10 % олова, 1 % фосфору і 89 % міді. Бронза характеризується низьким коефіцієнтом тертя, стійка проти зношування, з них виготовляють підшипники ковзання.

Латунь – це сплав міді з цинком та іншими елементами (ДСТУ EN 1982:2022). За хімічним складом їх поділяють на прості та

складні. В марках простої латуні перша літера «Л», а число після неї визначає процентний вміст міді. Наприклад, Л63 – латунь проста, що містить 63 % міді, решта 37 % – цинк. У марках складних латуней вказуються легуючі елементи так само, як і в марках бронзи, а вміст легуючих елементів позначають цифрами через дефіс після числа, що вказує вміст міді. Наприклад, ЛКС80-3-3 – латунь, що містить 80 % міді, 3 % кремнію і 3 % свинцю, решта 14 % цинку. Латуні наділені антикорозійними властивостями, з них виготовляють різні деталі та вироби, що працюють у контакті з водою, водяною парою.

Сплави на основі алюмінію та магнію вигідно вирізняються тим, що виготовлені з них деталі та вироби в 2,5–3 рази легші ніж сталеві та латунні, але поступаються міцністю. За технологічними властивостями ці сплави поділяють на ливарні (АЛ, МЛ) і, які деформуються (АК, МА), що вказується в марках цих сплавів, наприклад, АЛ-2, АЛ-4, АК-6, МЛ-2, МА-9 та ін. Цифра або число в марці цих сплавів є умовним позначенням і визначити хімічний склад за маркою не можна. Для цього користуються відповідними стандартами. Так, наприклад, алюмінієві ливарні сплави поставляються за ДСТУ EN 1706:2022.

Нормалізовані позначення марок матеріалів країн Західної Європи, США та інших держав і відповідність цих позначень стандартам України наведена у спеціальних довідниках. Так, наприклад, марці сталі 45 ДСТУ 7809:2015) відповідають марки 1045 (США, AIS/SAE), 1.0503 (Німеччина, Werkstoff), C45 (Німеччина, DIN), 080M46 (Англія, BS), CC45 (Франція, AFNOR).

Металеві сплави отримують шляхом сплавлення металу-основи з іншими металами. Для цього в умовах ливарного виробництва використовують металобрухт чорних і кольорових металів, а також спеціальні сплави – лігатури, за допомогою яких доводять сплав до потрібного хімічного складу. Для виплавляння легованих сталей як лігатури використовують сплави на основі заліза з різними легуючими елементами, наприклад ферохром Fe(Cr), феронікель Fe(Ni), феровольфрам Fe(W) та ін.

Методичні рекомендації

Методика розрахунку необхідної маси шихтових матеріалів на прикладах

Розрахунок необхідної маси шихтових матеріалів виконують за умови забезпечення матеріального балансу, яка ґрунтується на законі збереження маси і описується виразом:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + \ldots + m_n, \qquad (*)$$

де m – маса потрібного сплаву (продукту);

m_1, m_2, m_3, m_4, …, m_n – маси вихідних матеріалів.

Оскільки як вихідні матеріали, в більшості випадків, використовують металеві сплави, які містять різні елементи, то необхідно також врахувати вміст кожного елемента, який входить до складу вихідних матеріалів та продукту за виразами:

$$m \cdot \omega(E) = m_1 \cdot \omega_1(E) + m_2 \cdot \omega_2(E) + \ldots + m_n \cdot \omega_n(E), \qquad (**)$$

де $\omega(E)$ – масова частка елемента в сплаві (продукті), %;

$\omega_1(E)$, $\omega_2(E)$,…, $\omega_n(E)$ – масові частки елемента у відповідних вихідних матеріалах, %.

Таким чином отримують систему лінійних рівнянь, розв'язок якої дозволяє визначити необхідні маси кожного з вихідних матеріалів для виплавляння заданої маси металевого сплаву потрібного складу.

Обчислені маси шихтових матеріалів завантажують у відповідні плавильні печі. Для виплавляння вуглецевих та легованих сталей у ливарних цехах використовують переважно електричні індукційні і рідше дугові печі.

Ливарні чавуни отримують у печах шахтного типу – вагранках і як паливо використовують кокс. Мідні та алюмінієві ливарні сплави виплавляють в електроіндукційних печах з металевим осердям та у печах з високоомними нагрівальними елементами, виготовленими у вигляді спіралей та термоелектричних нагрівників (ТЕН).

Приклад 1

Для плавлення легованої сталі Х12М використовують металобрухт сталі У8, ферохром Fe(Cr), що містить 30 % Cr, феромолібден Fe(Mo), що містить 5 % Mo.

Скільки потрібно металобрухту, ферохрому, феромолібдену та інших матеріалів, щоб виплавити 500 кг сталі Х12М?

Послідовність розрахунку

Запишемо умову задачі у формі таблиці:

Продукт	m, кг	Вихідний матеріал				Додаткова умова
		m_1	m_2	m_3	m_4	
Сталь Х12М	500	Сталь У8	Fe(Cr)	Fe(Mo)	X_4^{**} –?	30 % Cr* 5 % Mo*
Відповідь						

У таблиці прийняті такі примітки: *міститься у відповідних феросплавах; **невідомий матеріал, який необхідно ввести до складу шихти.

За марками вихідних матеріалів та продукту наближено визначаємо їх хімічний склад. Запишемо масові частки вуглецю і легуючих елементів у цілих % до відповідної таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Масові частки хімічних елементів у складі сплавів, %

Хімічний елемент	ω	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
	Х12М	У8	Fe(Cr)	Fe(Mo)	X_4 (кокс)
Cr	12	–	30	–	–
Mo	1	–	–	5	–
C	1	0,8	–	–	? (100)

Аналізуючи таблицю 1.1 приходимо до висновку, що загальна кількість вуглецю в стовпчиках шихтових (вихідних) матеріалів (ω_1 – ω_3) є меншою ніж в продукті (стовпчик ω), котрий потрібно виплавити. Відповідно, саме вуглець є тим невідомим матеріалом X_4, котрий необхідно ввести додатково до складу шихтових, наприклад, у вигляді коксу, що містить 100 % С.

Виходячи з умови матеріального балансу складаємо рівняння скориставшись виразом (*):

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4. \qquad (1.1)$$

Враховуючи масові частки вуглецю і легуючих елементів отримаємо додаткові рівняння, необхідні для однозначного розв'язку задачі. Позначимо масові частки елементів у продукті ω(C) = 1 %, ω(Cr) = 12 %, ω(Mo) = 1 %, а у вихідних матеріалах, відповідно:

ω_1(C) = 0,8 %, ω_2(Cr) = 30 %, ω_3(Mo) = 5%, ω_4(C) = 100 %.

Скориставшись виразом (**) складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} m \cdot \omega(\mathrm{C}) = m_1 \cdot \omega_1(\mathrm{C}) + m_4 \cdot \omega_4(\mathrm{C}) \\ m \cdot \omega(\mathrm{Cr}) = m_2 \cdot \omega_2(\mathrm{Cr}) \\ m \cdot \omega(\mathrm{Mo}) = m_3 \cdot \omega_3(\mathrm{Mo}) \end{cases}. \qquad (1.2)$$

Підставимо значення масових часток ω_2(Cr), ω_3(Mo), ω(Cr) та ω(Mo), а також значення m = 500 кг у 2- і 3-тє рівняння системи (1.2) масових часток вмісту хрому та молібдену і визначимо:

$$m_2 = \frac{m \cdot \omega(\mathrm{Cr})}{\omega_2(\mathrm{Cr})} = \frac{500 \cdot 12}{30} = 200 \text{ кг};$$

$$m_3 = \frac{m \cdot \omega(\mathrm{Mo})}{\omega_3(\mathrm{Mo})} = \frac{500 \cdot 1}{5} = 100 \text{ кг}.$$

Підставимо значення m, m_2, і m_3 в рівняння матеріального балансу (1.1) і у перше рівняння (1.2) масових часток вуглецю. Отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 500 = m_1 + 200 + 100 + m_4; \\ 500 \cdot 1 = m_1\omega_1(\mathrm{C}) + m_4\omega_4(\mathrm{C}) \end{cases}$$

Розв'язуємо отриману систему рівнянь:

$$\begin{array}{l|l|l} 200 = m_1 + m_4 & \times 0{,}8 & -\ 160 = 0{,}8m_1 + 0{,}8m_4 \\ 500 = 0{,}8m_1 + 100m_4 & & \quad 500 = 0{,}8m_1 + 100m_4 \\ & & \hline & & -\ 340 = -\ 99{,}2m_4 \end{array}$$

$m_4 = 3{,}43$ кг; $\rightarrow m_1 = 200 - m_4$

$m_1 = 200 - 3{,}43 = 196{,}57$ кг.

Перевірка умови матеріального балансу:

$$196{,}57 + 200 + 100 + 3{,}43 = 500.$$

Відповідь. Для виплавляння 500 кг сталі Х12М потрібно 196,6 кг, сталі У8, 200 кг ферохрому, 100 кг феромолібдену і 3,4 кг коксу.

Приклад 2

Для виплавляння бронзи Бр ОЦСН3-7-5-1 використовують металобрухт латуні ЛС59-1. Скільки потрібно металобрухту та інших складових шихтових матеріалів для виплавляння у ливарному цеху 500 кг бронзи Бр ОЦСН3-7-5-1 за умови, що цинк окремо до складу шихти не вводиться?

Послідовність виконання

1. Запишемо умову задачі у формі таблиці:

Продукт	m, кг	Вихідний матеріал					Додаткова умова
		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	
БрОЦСН 3-7-5-1	500	ЛС59-1	X_2	X_3	X_4	X_5	Цинк*
Відповідь							

Примітка. *Знаходиться у складі металобрухту латуні.

2. Для визначення інших складових шихтових матеріалів X_2, X_3, X_4 і X_5 аналізуємо наближений хімічний склад бронзи БрОЦСН 3-7-5-1 і металобрухту заданої латуні ЛС59-1.

Бронза містить біля 3 % олова, 7 % цинку, 5 % свинцю, 1 % нікелю і решта – 84 % міді. Латунь містить біля 59 % міді, 1 % свинцю і решта – 40 % цинку.

3. Запишемо масові частки хімічних елементів у цілих у відсотках продукту та шихтових матеріалів до відповідної таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Масові частки хімічних елементів у складі сплавів, %.

Хімічний елемент	ω	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
	БрОЦСН 3-7-5-1	ЛС59-1	X_2	X_3	X_4	X_5
Sn	3	–				
Zn	7	40				
Pb	5	1				
Ni	1	–				
Cu	84	59				

Очевидно, для забезпечення хімічного складу заданої бронзи до складу шихтових матеріалів окрім металобрухту латуні ЛС59-1 додатково необхідно ввести технічно чисті олово, свинець, нікель і мідь, оскільки вміст олова і нікелю у металобрухті відсутній, а вміст свинцю та міді у металобрухті недостатній для виплавляння 500 кг бронзи БрОЦСН3-7-5-1 за умови, що вміст цинку забезпечується масою латуні (за умовою задачі).

4. Позначимо необхідні маси олова – m_2, свинцю – m_3, нікелю – m_4 і міді – m_5.

Масові частки елементів у сплаві – продукті БрОЦСН3-7-5-1:

$$\omega(Sn) = 3\ \%,\ \omega(Zn) = 7\ \%,\ \omega(Pb) = 5\ \%,\ \omega(Ni) = 1\ \%,\ \omega(Cu) = 84\ \%.$$

Масові частки елементів у шихтових матеріалах:

$$\omega_1(Cu) = 59\ \%,\ \omega_1(Pb) = 1\ \%,\ \omega_1(Zn) = 40\ \%;$$

$$\omega_2(Sn) = 100\ \%;\ \omega_3(Pb) = 100\ \%;$$

$$\omega_4(Ni) = 100\ \%;\ \omega_5(Cu) = 100\ \%.$$

Враховуючи масові частки кожного з елементів у хімічному складі сплаву-продукту і шихтових матеріалах за умови забезпечення вмісту цинку у складі бронзи БрОЦСН3-7-5-1 його вмістом у латуні ЛС59-1 запишемо систему рівнянь (1.3).

$$\begin{cases} m \cdot \omega(\text{Zn}) = m_1 \cdot \omega_1(\text{Zn}) \\ m \cdot \omega(\text{Sn}) = m_2 \cdot \omega_2(\text{Sn}) \\ m \cdot \omega(\text{Pb}) = m_1 \cdot \omega_1(\text{Pb}) + m_3 \cdot \omega_3(\text{Pb}) \\ m \cdot \omega(\text{Ni}) = m_4 \cdot \omega(\text{Ni}) \\ m \cdot \omega(\text{Cu}) = m_1 \cdot \omega(\text{Cu}) + m_5 \cdot \omega_5(\text{Cu}) \end{cases} \quad (1.3)$$

З розв'язку 1-, 2- та 4-го рівнянь системи (1.3) визначаємо:

$$500 \cdot 7 = m_1 \cdot 40 \Rightarrow m_1 = \frac{500 \cdot 7}{40} = 87{,}5 \text{ кг},$$

$$500 \cdot 3 = m_2 \cdot 100 \Rightarrow m_2 = \frac{500 \cdot 3}{100} = 15 \text{ кг},$$

$$500 \cdot 1 = m_4 \cdot 100 \Rightarrow m_4 = \frac{500 \cdot 1}{100} = 5 \text{ кг}.$$

Підставимо значення m_1 у 3- та 4-те рівняння системи (1.3) і отримаємо рівняння:

$$500 \cdot 5 = 87{,}5 \cdot 1 + 100 m_3 \Rightarrow 2412{,}5 = 100 m_3 \Rightarrow m_3 = 24{,}125 \text{ кг},$$

$$500 \cdot 84 = 87{,}5 \cdot 59 + 100 m_5 \Rightarrow 36837{,}5 = 100 m_5 \Rightarrow m_5 = 368{,}375 \text{ кг}.$$

5. Перевірка умови матеріального балансу:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 =$$

$$= 87{,}5 + 15 + 5 + 24{,}125 + 368{,}375 = 500.$$

Відповідь. Для виплавляння 500 кг бронзи БрОЦСН 3-7-5-1 потрібно 87,5 кг латуні ЛС59-1, 15 кг олова, 24,125 кг свинцю, 5 кг нікелю і 368,375 кг міді.

Склад індивідуального завдання

Відповідно до варіанта (табл. 1.3) визначити маси шихтових матеріалів m_1, m_2, m_3, m_4 для виплавляння потрібного сплаву відомої маси m.

Невідомі складові шихти x_i визначити, виходячи з хімічного складу сплаву. Домішками у сплаві нехтувати.

Таблиця 1.3 – Варіанти завдань до самостійного виконання

Варіант	Сплав – продукт	m, кг	Вихідний матеріал				Додаткова умова
			m_1	m_2	m_3	m_4	
1	ЛА67-2,5	200	БрА5	x_2 – ?	x_3 – ?	x_4 – ?	Al*
2	БрО5Ц5С5	300	ЛС59-1	x_2 – ?	x_3 – ?	x_4 – ?	Zn*
3	БрО4Ц4С17	200	ЛС64-2	x_2 – ?	x_3 – ?	x_4 – ?	Zn*
4	Сталь 30	1000	Сталь 08	Сталь 20	Сталь 45	–	m_1:m_2 = 0,6
5	Сталь 20Г	500	10Г2	Сталь 15	x_3–?		–
6	Сталь 45ХН	500	10Х18Н9	Fe(Ni)	Сталь 10	x_4–?	20 % Ni**
7	Сталь 7Х3	1000	3Х12	СтальУ7	x_3 – ?	–	–
8	Сталь 12Х	500	ШХ15	Сталь 45	x_3 – ?	–	Інструмент
9	Чавун (3,2 % С)	1000	Сталь У12	Чавун (4 % С)	–	–	–
10	Сталь 38Х2Ю	300	15Х5	Сталь 30	x_3–?	x_4–?	–
11	Сталь 6ХС	500	40Х13	10С3	Сталь 30	x_4–?	–
12	Сталь У10	500	Сталь 10	Сталь У12	Сталь 20	–	m_3:m_1 = 0,4
13	Сталь 20Х13	1000	Сталь 20	Fe(Cr)	x_3–?	–	30 % Cr**
14	Сталь Г13	500	Сталь 50	Fe(Mn)	x_3 – ?	–	70 Mn**
15	БрО8Ц4	200	Л68	x_2 –?	x_3 – ?	–	Zn*
16	Л80	250	Л63	Л80	Л90	x_4–?	m_1:m_2 = 0,5
17	Чавун (4,3 % С)	500	Сталь 10	Сталь 20	Сталь У8	x_4–?	m_1, m_2, m_3 = 1:2:3
18	Сталь 15ХФ	1000	3Х12	Fe(V)	Сталь 20	x_4–?	6 % V**
19	Сталь 30ХС	1000	Х12	Fe(Si)	Сталь 10	x_4–?	12 % Si**
20	ЛО70-1	250	ЛО62-1	x_2 – ?	x_3 – ?	–	Zn*
21	Сталь У8	500	Сталь 20	Сталь 08	Чавун (4 % С)	x_4–?	m_1, m_2, m_3 = 2:7:1
22	Сталь ШХ15	1000	Х12	Сталь У10	x_3 – ?	–	–
23	Сталь Р18	500	Сталь У8	Fe(W)	x_3 – ?	–	28 % W**
24	Сталь 25	1000	Сталь 10	Сталь У10	–	–	–
25	Л80	250	Л63	Л90	x_3 – ?	–	–
26	Сталь Х12М	500	Сталь У8	15Х28	Fe(Mo)	x_4 – ?	9 % Mo**
27	Сталь 45	1000	Сталь 10	Сталь 30	x_3 – ?		m_1:m_2 = 2
28	Сталь Р6М5	200	Сталь У10	Fe(W)	Fe(Mo)	x_4 – ?	28 % W, 5 % Mo**
29	Сталь 65	500	Сталь 20	Сталь 45	x_3 – ?	–	m_1:m_2 = 4
30	Сталь ШХ9	700	Сталь 10	Fe(Cr)	x_3 – ?	–	30 % Cr**

***Примітки*:**

*знаходиться у складі сплаву; **вміст елемента у феросплаві.

Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Завдання відповідного варіанта.
3. Результати проміжних розрахунків.
4. Висновки.

Тестові завдання

Виберіть одну правильну відповідь.

1. Яка складова залізних руд містить найменшу кількість заліза?

а) $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$; б) $FeCO_3$; в) Fe_2O_3; г) Fe_3O_4.

2. Виробництво якої сталі вимагає як складової шихти ферованадію?

а) Р6М5; б) Р6Ф5; в) Х12М; г) 45ХНВ.

3. Виробництво якої сталі вимагає як складової шихти феровольфраму?

а) Р6М5; б) ШХ9; в) Х12М; г) 5ХНМ.

4. Виробництво якої сталі вимагає як складової шихти ферохрому?

а) Р6М5; б) Р6Ф5; в) Х12М; г) У10.

5. Виробництво якої сталі вимагає алюмінію як складової шихти?

а) Р6М5; б) Р6Ф5; в) Х12М; г) 38ХМЮ.

6. Що застосовують для зменшення вмісту в сталі фосфору?

а) Fe(Si); б) Fe(Mn); в) кокс; г) $CaCO_3$.

7. Що застосовують для зменшення вмісту в сталі сірки?

а) Fe(Si); б) Fe(Mn); в) кокс; г) $CaCo_3$.

8. Який спосіб виробництва сталі не вимагає застосування палива?

а) киснево-конверторний; в) мартенівський;
б) пірометалургійний; г) кожний спосіб.

9. Який спосіб забезпечує виробництво найдешевшої сталі звичайної якості?

а) електродуговий; в) електроіндукційний;
б) киснево-конверторний; г) мартенівський.

10. Який спосіб виробництва сталі вимагає застосування природного газу?

а) мартенівський; в) киснево-конверторний;
б) дуговий; г) індукційний.

11. Який спосіб виробництва сталі вимагає використання не менше 70 % рідкого чавуну в складі шихтових матеріалів?

а) електродуговий; в) електроіндукційний;
б) мартенівський; г) киснево-конверторний.

***Література*: [2**, с. 91–118; **3**, с. 9–12; **4**, с. 6–8, 45–52; **5**, с. 11–21]

Лабораторна робота 2

Визначення твердості металів і сплавів

***Мета*:** опанувати основні методи та прилади для визначення твердості та набути практичних навичок визначення твердості за методами Брінеля і Роквелла.

Матеріали, обладнання, прилади: твердоміри ТШ-2 і ТК-2 з набором інденторів; мікроскоп МПБ-2, штангенциркуль; зразки матеріалів: сірий чавун, сталь вуглецева відпалена, сталь вуглецева загартована, сталь інструментальна загартована, мідь, алюміній.

Короткі теоретичні відомості

Твердість – одна з найважливіших механічних властивостей чорних та кольорових металів, яка визначає здатність металу чинити опір проникненню в нього іншого, більш твердого тіла певної форми та певних розмірів. Таке тіло називається індентором і має форму кульки, конуса або чотирикутної піраміди. Індентори виготовляють з інструментальної сталі, твердого сплаву або алмазу, які при проникненні в досліджуваний метал під дією певної сили не отримують залишкової пластичної деформації. Відомо декілька методів визначення твердості, але більшість з них ґрунтуються на тому, що індентор залишає на досліджуваній поверхні відбиток, розміри якого є мірою твердості матеріалу. Очевидно, чим менший відбиток за однакових інших умов, тим більша твердість металу.

Визначення твердості – один з найбільш поширених методів дослідження металів, який в більшості випадків без руйнування деталі дає змогу оцінити інші властивості. Так, наприклад, чим вища твердість вуглецевої конструкційної сталі, тим більші її міцність і зносостійкість, менша здатність до пластичної деформації. На практиці твердість контролюють з метою оцінки оброблюваності заготовки різанням або тиском, а також для оцінки міцності, зносостійкості та інших експлуатаційних характеристик уже готових деталей після їх термічної обробки. У виробничих умовах широко використовують два основних методи визначення твердості: методи Брінеля і Роквелла.

Для наукових досліджень, а також в умовах спеціального виробництва застосовують метод Віккерса та метод визначення мікротвердості, що дає змогу визначити твердість тонкого поверхневого шару та незначних об`ємів дослідного матеріалу. Для оцінки твердості деталей великих розмірів користуються методом Шора.

Правильний вибір того чи іншого методу ґрунтується на розумінні його суті, умов досліджень та умов застосування.

Вимірювання твердості втисканням сталевої кульки (*метод Брінеля*)

Твердість за методом Брінеля визначають шляхом втискання сталевої загартованої кульки діаметром 10, 5 або 2,5 мм в досліджувану плоску поверхню під дією певного навантаження протягом визначеного часу. Діаметр кульки, сила навантаження і час витримки під дією сили вибирають залежно від матеріалу і товщини досліджуваного матеріалу або зразка.

В таблиці 2.1 наведені встановлені стандартом норми дослідження твердості за методом Брінеля.

Таблиця 2.1 – Умови випробувань за методом Брінеля

Товщина, мм	Діаметр кульки D, мм	Сила $P = K D^2$	Коефіцієнт матеріалу K	Час випробування, τ, с
$t > 6$	10	3000	$K = 30$ сталі і чавуни;	10
$3 < t < 6$	5	250	$K = 10$ бронзи латуні;	30
$2 < t < 3$	2,5	15,625	$K = 2,5$ алюміній	60

Число твердості за цим методом визначають як відношення сили P до сферичної поверхні відбитку і позначають літерами НВ (див. рис. 2.1):

$$\text{НВ} = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}, \qquad (2.1)$$

де D – діаметр кульки, мм; d – діаметр відбитку, мм; P – навантаження на кульку, кгс; НВ – твердість, кгс/мм^2.

Діаметр відбитка вимірюють за допомогою спеціального мікроскопа, що має шкалу з ціною поділки 0,05 мм (див. рис. 2.2). Щоб запобігти складних обчислень числа твердості для кожного відбитка на практиці користуються готовими таблицями (див. табл. 2.2). Найбільш поширеними стандартними умовами при дослідженні твердості є навантаження 3000 кгс, діаметр кульки 10 мм і тривалість витримки 10 с. Для таких умов відповідають значення діаметрів відбитків, наведені в таблиці 2.2. Якщо ж умови досліджень інші, то результати вимірювань діаметра відбитка збільшують в 2 або 4 рази залежно від того, яка використовувалась кулька.

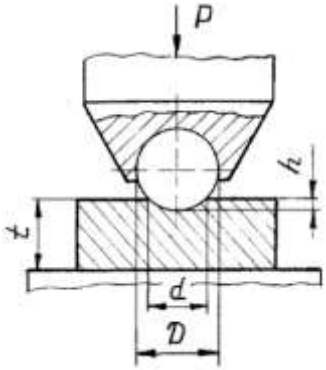


Рис. 2.1 – Схема втиснення індентора за методом Брінеля

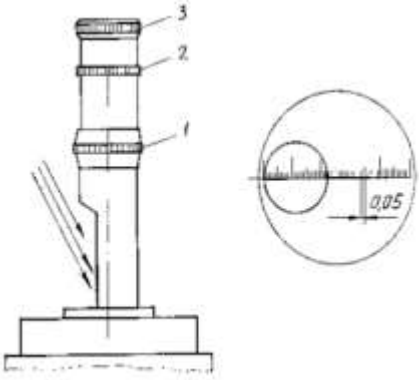


Рис. 2.2 – Схема вимірювання діаметра сферичного відбитка за методом Брінеля

Таблиця 2.2 – Значення твердості металів, визначених за методом Брінеля

Діаметр відбитка D_{10}, (або $2d_5$, або $4d_{2,5}$)	Значення твердості при силі P, кгс			Діаметр відбитка D_{10}, (або $2d_5$, або $4d_{2,5}$)	Значення твердості при силі P, кгс		
	$30D^2$	$10D^2$	$2{,}5D^2$		$30D^2$	$10D^2$	$2{,}5D^2$
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
2.00	945	315	78.8	3.00	201	67.1	16.8
2.05	899	300	74.9	3.05	197	65.5	16.4
2.10	856	285	71.4	3.10	192	63.9	16.0
2.15	817	272	68.1	3.15	187	62.4	15.6
2.20	780	260	65.0	3.20	183	60.9	15.2
2.25	745	248	62.1	3.25	179	59.5	14.9
2.30	712	237	59.4	3.30	174	58.1	14.5
2.35	682	227	56.8	3.35	170	56.8	14.2
2.40	653	218	54.4	3.40	167	55.5	13.9
2.45	627	209	52.2	3.45	163	54.3	13.6
2.50	601	200	50.1	3.50	159	53.0	13.3
2.55	578	193	48.1	3.55	156	51.9	13.0
2.60	555	185	46.3	3.60	152	50.7	12.7
2.65	534	178	44.5	3.65	149	49.6	12.4

Продовження таблиці 2.2

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
2.70	514	171	42.9	3.70	146	48.6	12.1
2.75	495	165	41.3	3.75	143	47.5	11.9
2.80	477	159	39.8	3.80	140	46.5	11.6
2.85	461	154	38.4	3.85	137	45.5	11.4
2.90	444	148	37.0	3.90	134	44.4	11.2
2.95	429	143	35.5	3.95	131	43.7	10.9
4.00	415	138	34.6	5.25	128	42.8	10.7
4.05	401	134	33.4	5.30	126	41.9	10.5
4.10	388	129	32.3	5.35	123	41.0	10.3
4.15	375	125	31.2	5.40	121	40.2	10.1
4.20	363	121	30.3	5.45	118	39.4	9.86
4.25	352	117	29.3	5.50	116	38.6	9.66
4.30	341	114	28.4	5.55	114	37.9	9.46
4.35	331	110	27.5	5.60	111	37.1	9.27
4.40	321	107	26.7	5.65	109	36.4	9.10
4.45	311	104	25.9	5.70	107	35.7	8.93
4.50	302	101	25.2	5.75	106	35.0	8.76
4.55	293	97.7	24.4	5.80	103	34.4	8.59
4.60	285	95.0	23.7	5.85	101	33.7	8.43
4.65	277	92.3	23.1	5.90	99.2	33.1	8.26
4.70	269	87.2	21.8	5.95	97.3	32.4	8.11
4.75	262	87.2	21.8	6.00	95.5	31.8	7.96
4.80	255	84.9	21.2	6.05	93.7	31.2	7.81
4.85	248	82.6	20.6	6.10	92.0	30.7	7.67
4.90	241	80.4	20.1	6.15	90.3	30.1	7.52
4.95	235	78.3	19.6	6.20	88.7	29.6	7.39
5.00	229	76.3	19.1	6.25	87.1	29.0	7.25
5.05	223	74.3	18.6	6.30	85.5	28.5	7.12
5.10	217	72.4	18.1	6.35	84.0	28.0	7.00
5.15	212	70.6	17.6	6.40	82.5	27.5	6.87
5.20	207	68.8	17.2	6.45	81.0	27.0	6.75
				6.50	79.6	25.5	6.63

Якщо при дослідженні сталевого зразка використовували кульку діаметром 5 мм і отримали відбиток діаметром 1,65 мм, то значення твердості для приведеного діаметра $3{,}3 = 1{,}65 \cdot 2$ ($2d_5$) = d_{10} мм

при навантаженні $30D^2$ становить 341 кгс/мм^2. Для тих же значень діаметрів відбитка твердість міді визначають при навантаженні $10D^2$ і вона дорівнює 141 кгс/мм^2, а алюмінію при навантаженні $2{,}5D^2$ відповідно, 28,4 кгс/мм^2.

Значення твердості вказують в технічних вимогах на кресленні деталі та в картах технологічного процесу її виготовлення. При цьому для стандартних умов дослідження значення твердості за Брінелем позначають літерами НВ і наступним числом твердості, наприклад, НВ 341. Якщо користуються іншими умовами, то їх вказують в позначенні твердості в певному порядку, наприклад НВ 5/750/10-341. Це означає, що число твердості становить 341 кгс/мм^2 (3410 МН/м^2) і отримано при дослідженні кулькою 5 мм при навантаженні $P = 30 \cdot 5^2 = 750$ кгс тривалістю 10 с.

Для визначення твердості за методом Брінеля користуються твердоміром типу ТШ (рис. 2.3), який являє собою механічний прес важільного принципу дії.

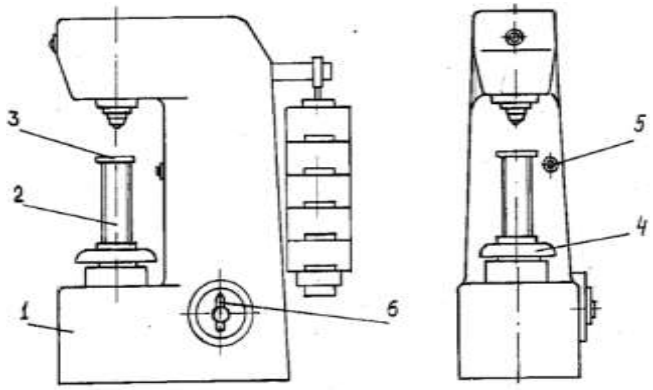


Рис. 2.3 – Твердомір Брінеля типу ТШ-2

Він складається з станини *1*, в нижній частині якої розташований гвинт *2* з змінними столиками *3* для розміщення зразків. Переміщення гвинта здійснюють вручну штурвалом *4*. В верхній частині знаходиться шпиндель з змінними наконечниками, в які вставляються індентори – кульки. Основне навантаження діє на зразок через систему важелів і створюється комбінацією вантажів.

Навантаження здійснюється автоматично з допомогою електродвигуна, який знаходиться в станині, шляхом натискання кнопки *5*. Для встановлення потрібної витримки навантаження слугує перемикач *6*.

Метод Брінеля відрізняється від інших методів визначення твердості простотою і є єдиним способом вимірювання твердості таких структурно неоднорідних матеріалів, якими є сірі чавуни. До недоліків цього методу слід віднести: неможливість дослідження металів, які мають твердість НВ > 450, тому що при цьому можлива деформація індентора (кульки) і вимірювання не будуть точними; неможливість дослідження твердості тонких пластин та поверхневих шарів менших за 2 мм, тому що кулька буде наскрізь деформувати поверхневий шар зразка; після вимірювань залишаються глибокі сліди на поверхні деталі; значна тривалість проведення досліджень.

Вимірювання твердості втисканням алмазного конуса (метод Роквелла)

Метод Роквелла передбачає визначення твердості за глибиною проникнення в досліджувану поверхню сталевої кульки діаметром 1.588 мм (1/16″) при навантаженні 100 кгс або алмазного конуса з кутом при вершині 120° при навантаженні 60 і 150 кгс. При проведенні досліджень спочатку прикладають початкову силу P_0, яка дорівнює 10 кгс, а потім нормальну силу P, яка залежно від умов вимірювання дорівнює 60, 100 і 150 кгс. Різниця глибин проникнення індентора $\Delta h = h - h_0$ під дією сил P і P_0 характеризує твердість матеріалу (рис. 2.4).

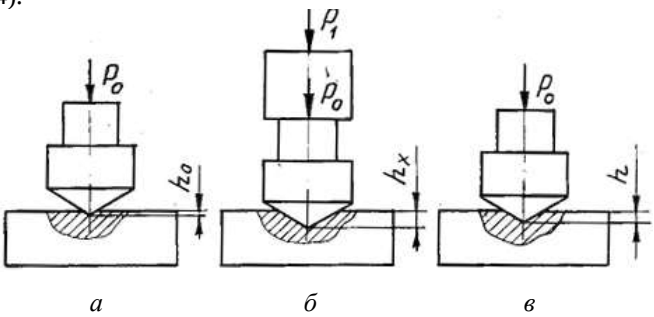


Рис. 2.4 – Схема вдавлювання індентора за методом Роквелла
а) P_0 = 10 кгс (100 Н); б) $P = P_0+P_1$; в) P_0 = 10 кгс

Чим менша ця різниця, тим твердіший матеріал, і, навпаки, чим більша ця різниця, тим менша твердість матеріалу. Число твердості за Роквеллом можна визначити за формулою:

$$\text{НВ} = \frac{k - \left(h - h_0\right)}{c}, \qquad (2.2)$$

де h_0 – глибина проникнення індентора під дією сили P_0; h – глибина проникнення індентора під дією загальної сили; k – стала величина, яка складає для кульки 0,26 і для конуса 0,2; c – ціна поділки циферблата механічного індикатора глибини занурення індентора (індикатор годинникового типу), що вимірює глибину проникнення індентора. Для визначення твердості застосовують твердоміри типу ТК-2 (рис. 2.5).

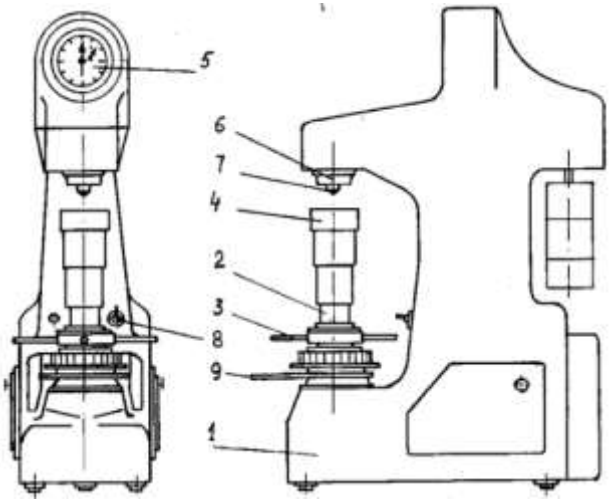
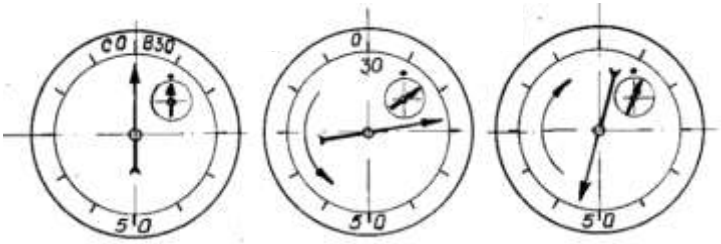


Рис. 2.5 – Твердомір Роквелла типу ТК-2

У нижній частині станини *1* встановлений гвинт *2*, який обертається штурвалом *3* і має столик *4* для розміщення зразків. У верхній частині станини закріплені індикатор *5* і шпиндель *6*, в якому міститься наконечник з індентором *7*. Індикатор являє собою циферблат, на якому є дві шкали – чорна та червона і є дві стрілки – велика та мала (див. рис. 2.6). При користуванні кулькою відлік здійснюють за червоною шкалою В, а при застосуванні алмазного конуса – за чорною шкалою С. Циферблат поділений на 100 поділок, кожна з яких відповідає глибині проникнення індентора 0,002 мм. Нульова поділка чорної шкали співпадає з початковим положенням великої стрілки. Червона шкала В зміщена відносно нульової поділки чорної шкали на 30 поділок. Це зміщення зроблено, щоб компенсувати більшу глибину початкового втискування кульки під попереднім навантаженням 10 кгс. Це забезпечує узгоджені покази між шкалами HRB та HRC, незважаючи на різну форму індентора.



а *б* *в*

Рис. 2.6 – Відхилення стрілок індентора відповідно до схем рис. 2.4

Велика стрілка призначена для зазначення твердості, а мала – для контролю попереднього навантаження зразка силою P_0, яке здійснюється штурвалом *3*. При цьому кінець малої стрілки повинен співпадати з червоною точкою на циферблаті індикатора. Основне навантаження нормальною силою P відбувається при натисканні клавіші *9*, здійснюється автоматично і триває 2–4 с.

Тип індентора і навантаження на зразок при дослідженні за методом Роквелла на приладі ТК-2 можна вибрати залежно від попередньої оцінки твердості матеріалу за методом Брінеля згідно з даними, що містяться в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вибір індентора і навантаження при дослідженні твердості за методом Роквелла

Границя значень твердості НВ	Форма індентора	Навантаження, кгс	Шкала відліку циферблата
60–250	Сталева кулька	100	*B*
250–700	Алмазний (твердосплавний) конус	150	*C*
> 700	Алмазний конус	60	*A*

Твердість на приладі ТК-2 можна виміряти:

а) сталевою кулькою (P_0+P = 100 кгс) при визначенні твердості зразків товщиною від 0,8 до 2 мм з матеріалів, твердість, яких не перевищує НВ230; значення твердості визначають за шкалою *B* і позначають HRB;

б) твердосплавним конусом (P_0+P = 150 кгс) при дослідженні твердості загартованих зразків і деталей, а також поверхневих шарів товщиною більше 0,5 мм; значення твердості визначають за шкалою *C* і позначають HRC;

в) алмазним конусом (P_0+P = 60 кгс) для дослідження надтвердих матеріалів, 0,5 мм; значення твердості також для тонкого листового матеріалу і покриттів товщиною 0,3 визначають за шкалою *C*, але позначають HRA.

На основі дослідних робіт встановлено зв‘язок між числами твердості за методом Роквелла, Брінеля та іншими (табл. 2.4), який дає змогу перевести одні значення в інші. Твердість за методом Роквелла позначають на кресленні деталі, наприклад, 40–42 HRC, 40–42 HRB, 40–42 HRA. Метод Роквелла в порівнянні з методом Брінеля має більш широкі можливості як у відношенні максимальних значень твердості (до HB800), так і мінімальної товщини (0,3–0,5 мм). Крім того, він значно продуктивніший, відрізняється точністю вимірювання і не погіршує якості поверхонь деталей. Його не рекомендують використовувати для дослідження чавунів, а також деталей, які деформуються при навантаженні до 60 кгс.

Таблиця 2.4 – Таблиця відповідності між значеннями твердості за методами Брінеля, Роквелла і Віккерса

Твердість									
HB	HRC	HRA	HRB	HV	HB	HRC	HRA	HRB	HV
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
780	72	89	–	1224	286	30	66	–	285
745	70	87	–	1116	277	29	65	–	278
712	68	86	–	1022	269	28	65	–	272
682	66	85	–	941	262	26	64	–	261
653	64	84	–	868	255	26	64	–	255
627	62	83	–	804	241	24	63	100	240
601	60	82	–	746	235	23	62	99	235
578	58	81	–	694	228	22	62	98	226
555	56	79	–	649	223	21	61	97	221
534	54	78	–	606	217	20	61	97	217
514	52	77	–	587	212	19	60	96	213
495	50	76	–	551	207	18	60	95	209
477	49	76	–	534	202	16	59	94	201
461	48	75	–	502	196	15	58	93	197
444	46	74	–	473	192	15	58	92	190
429	45	73	–	460	187	–	57	91	186
415	44	72	–	435	183	–	56	89	183
409	43	72	–	423	179	–	56	88	177

Продовження таблиці 2.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
401	42	71	–	412	174	–	55	87	174
388	41	71	–	401	170	–	–	86	171
375	40	70	–	390	166	–	–	85	165
363	39	70	–	380	163	–	–	84	162
352	38	69	–	361	159	–	–	83	159
341	37	68	–	344	156	–	–	82	154
331	36	68	–	335	153	–	–	81	152
321	358	67	–	320	149	–	–	80	149
311	34	67	–	312	146	–	–	78	147
302	33	67	–	305	143	–	–	76	144
293	31	66	–	291	140	–	–	76	–
137	–	–	75	–	105	–	–	58	–
134	–	–	74	–	103	–	–	57	–
131	–	–	72	–	101	–	–	56	–
128	–	–	71	–	99	–	–	54	–
126	–	–	69	–	97	–	–	53	–
124	–	–	69	–	92	–	–	49,5	–
121	–	–	67	–	88	–	–	47	–
118	–	–	66	–	84	–	–	43,5	–
116	–	–	65	–	80	–	–	40,5	–
114	–	–	64	–	78	–	–	38,5	–
112	–	–	62	–					
109	–	–	61	–					
107	–	–	59	–					

Вимірювання твердості втисканням алмазної піраміди (*метод Віккерса*)

Твердість за методом Віккерса визначають шляхом втискання в досліджувану поверхню алмазної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136° при навантаженні 100 кгс, що діє протягом 15 с.

Число твердості за методом Віккерса є сила, яка припадає на одиницю поверхні ромбічного відбитку і визначається за такою формулою:

$$HV = \frac{2P}{d^2}\sin\frac{\alpha}{2} = 1{,}8544\frac{P}{d^2}, \qquad (2.3)$$

де P – навантаження на піраміду, кгс; d – середнє арифметичне обох діагоналей відбитка після припинення дії сили, мм; α – кут між протилежними гранями піраміди, град.

Практично твердість HV визначають за величиною приведеної діагоналі відбитка, користуючись відповідними таблицями.

Для вимірювання твердості застосовують твердоміри типу ТП, в яких для навантаження піраміди є важільний механізм, а для вимірювання діагоналей відбитка в прилад вмонтований мікроскоп з 10-кратним збільшенням. Відлік значень здійснюють за допомогою мікрометричного гвинта, одна поділка якого на лімбі відповідає 0,001 мм.

Твердість HV для сталі, яка має твердість до НВ400 приблизно відповідає НВ. При більших значеннях твердості її значення за методом Віккерса дещо більші, ніж за методом Брінеля.

Перевагою приладу типу ТП над приладами ТК і ТШ є те, що ним можна вимірювати великі значення твердості при малій товщині зразків, а також дуже тонких поверхневих шарів після хіміко-термічної зміцнювальної обробки, наприклад азотування або ціанування.

Подібним до методу Віккерса є метод Хрущова–Берковича, призначений для вимірювання мікротвердості при навантаженні алмазної пірамідки силою від 2 до 200 г. Його застосовують для визначення твердості гальванічних покриттів, виробів дуже малих розмірів, окремих структурних складових різних сплавів. Для вимірювання мікротвердості застосовують спеціальні прилади типу ПМТ-3, які практично є мікроскопом з вмонтованим механізмом навантаження.

Вимірювання твердості виробів значних розмірів (*метод Шора*)

Крім методів визначення твердості, які ґрунтуються на втисканні індентора в досліджувану поверхню, відомі способи, для яких застосовують явище відскоку при співударі пружних тіл. Одним з таких пружних тіл є досліджуваний виріб, а другим – сталевий бойок певної маси. До таких способів відноситься метод Шора, який застосовують в тих випадках, коли неприпустимі будь-які відбитки на досліджуваній поверхні, а також для вимірювання твердості виробів значних розмірів, наприклад, станин металорізальних верстатів, пресів тощо.

Мірою твердості за методом Шора є величина відскоку бойка масою 2,5 г, який кидають перпендикулярно до поверхні деталі з певної віддалі і фіксують величину відскоку спеціальним індикатором.

Послідовність виконання

1. Перед визначенням твердості поверхню зразків зачистити, заміряти їхню товщину, оцінити наближено значення твердості і вибрати спосіб та умови вимірювання твердості.

Ознайомитись з будовою і принципом дії та правилами техніки безпеки користування приладами ТШ і ТК.

Для визначення твердості за методом Брінеля залежно від матеріалу та товщини зразків налагодити твердомір ТШ-2 на потрібний режим роботи. Встановити зразок на столик *3* приладу (див. рис. 2.3). Обертаючи штурвал *4* за годинниковою стрілкою підвести зразок до індентора і притиснути до упора, а потім ввімкнути електродвигун приводу кнопкою *5*. Спостерігати за проникненням індентора внаслідок можливого руйнування зразка не рекомендується. Після автоматичної зупинки електродвигуна, яка наступить через встановлену тривалість витримки, опустити столик, зсунути зразок на віддаль, більшу діаметра отриманого відбитка і повторити навантаження другий, а потім третій раз. Далі за допомогою мікроскопа МПБ-2 заміряти діаметр кожного відбитка в двох взаємно перпендикулярних напрямках d_1 і d_2 та вирахувати їх середнє значення $d_c = (d_1 + d_2)/2$, а потім, користуючись таблицею 2.2 визначити НВ в кожній точці і за трьома значеннями обчислити середнє значення твердості, що характеризує матеріал зразка в цілому. Подібним чином провести вимірювання твердості всіх зразків, для яких НВ < 400. Всі вихідні дані та результати досліджень занести в відповідні рядки таблиці 2.5.

Для визначення твердості за методом Роквелла також необхідно попередньо оцінити твердість зразків і визначити умови проведення дослідів – індентор, навантаження та шкалу відліку значень твердості. Далі потрібно налагодити прилад ТК-2 на потрібний режим роботи і ввімкнути електродвигун приводу вимикачем *8* (див. рис. 2.5). Потім встановити зразок на столик *4* і, обертаючи штурвал *3*, підвести зразок до індентора *7* і далі до суміщення маленької стрілки індикатора *5* з червоною точкою на його циферблаті (див. рис. 2.6). При цьому кінець великої стрілки повинен співпадати з нулем чорної шкали.

Далі слід натиснути та відпустити клавішу *9*. В кінці циклу навантаження зафіксувати значення твердості проти кінця великої стрілки на відповідній шкалі. Повторити ще в двох точках на відстані 2–3 мм, знайти середнє значення HR для кожного зразка і за допомогою таблиці 2.4 перевести значення твердості HR у твердість за методом Брінеля.

Всі дані та результати досліджень занести до таблиці 2.6.

Таблиця 2.5 – Вихідні дані та результати визначення твердості зразків за методом Брінеля

Матеріал зразка	Умова дослідження				Номер точки	Діаметр відбитка, мм			Значення твердості	
	t, мм	D, мм	P, кНс	τ, с		d_1	d_2	d_c	НВ	$НВ_С$
Сірий чавун					1 2 3					
Сталь відпалена					1 2 3					
Мідь					1 2 3					
Алюміній					1 2 3					

Таблиця 2.6 – Вихідні дані і результати визначення твердості зразків за методом Роквелла

Матеріал зразка	Умова дослідження			Значення твердості в точках			Середнє значення	
	індентор	P, кНс	шкала	1	2	3	HR	$НВ_С$
Сталь 45 відпалена								
Сталь вуглецева 45 загартована								
Сталь інструментальна загартована Р6М5								

За результатами виконання лабораторної роботи зробити висновки.

2. Обґрунтувати вибір методів та умов проведення досліджень твердості заданих зразків, оцінити твердість різних матеріалів залежно від їх хімічного складу та технології виготовлення зразків.

Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Прилади, інструменти та матеріали, використані при проведенні роботи.
3. Схема втиснення індентора в досліджувану поверхню за методом Брінеля (див. рис. 2.1).
4. Результати дослідження твердості зразків за методом Брінеля (див. табл. 2.5).
5. Схема проникнення індентора в досліджувану поверхню за методом Роквелла (див. рис. 2.4).
6. Результати дослідження твердості зразків за методом Роквелла (див. табл. 2.6).
7. Висновки за результатами досліджень.

Контрольні питання

1. Що є твердість металів? Які методи застосовують для її визначення?
2. Який фізичний зміст визначення твердості за методами Брінеля, Роквелла, Віккерса?
3. Яка розмірність одиниці твердості за методом Брінеля?
4. Які є переваги, недоліки і обмеження методу Брінеля при вимірюванні твердості металів?
5. Які є переваги, недоліки і обмеження методу Роквелла при вимірюванні твердості металів?
6. В яких випадках застосовують для визначення твердості метод Віккерса?
7. Як позначають на кресленні деталі твердість, визначену за методами Брінеля та Роквелла?

***Література*: [2**, с. 34–41]

Лабораторна робота 3

Визначення технологічних властивостей металів, придатних до пластичної деформації

***Мета*:** опанувати методику визначення деформованості металів шляхом осадження зразків круткового матеріалу та витискання сферичної лунки в зразках з листового металу (метод Еріксена).

Матеріали, обладнання, прилади: прес гідравлічний ПСУ-125, лабораторний штамп для осаджування, машина для визначення технологічних властивостей листового металу МТЛ-10Г, штангенциркуль, лінійка, зразки круткового металу та листової сталі.

Короткі теоретичні відомості

Технологічні властивості конструкційних матеріалів визначають їх здатність до певного виду обробки. Одним з основних видів обробки металів є обробка тиском, яка ґрунтується на пластичній деформації – здатності металів змінювати форму під дією сили без руйнування та зберігати набуту форму після припинення її дії. Слід підкреслити, що не всі метали та сплави однаковою мірою придатні до пластичної деформації. Тому за технологічними властивостями їх поділяють на такі, що деформуються (деформівні) та ті, що не деформуються (ливарні).

До деформівних матеріалів відносяться сталі і деякі сплави на основі міді, алюмінію та інших кольорових металів. Основними технологічними характеристиками, що визначають здатність конструкційних матеріалів до пластичної деформації, є деформованість та опір пластичній деформації. Їх визначають різними методами залежно від характеру деформації та форми зразка. Для визначення деформованості та опору деформації круткового матеріалу, який використовують для виготовлення фасонних заготовок вільним куванням та об'ємним штампуванням, застосовують циліндричні зразки з відношенням висоти h_0 до діаметра d_0 не більше 2,0 для сталевих зразків і 1,5 – для алюмінієвих. Зразки осаджують між двома плоскопаралельними плитами спеціального пристрою (штампу) на гідравлічному пресі. Відношення $h_0/(d_0) < 1{,}5…2{,}0$ забезпечує утворення бочкоподібної форми зразка (рис. 3.1), яка зумовлена наявністю сил тертя, що виникають під час деформації між торцевими поверхнями зразка і плитами, котрі його стискають.

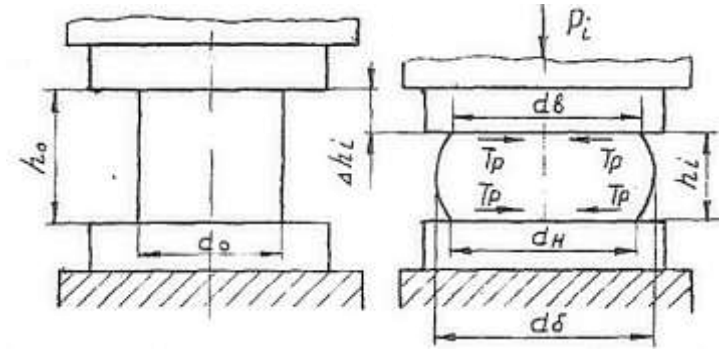
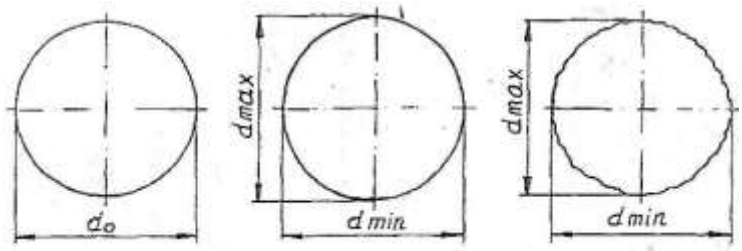


Рис. 3.1 – Вигляд зразка круткового матеріалу:
***а*) до прикладення навантаження; *б*) після деформації**



а *б* *в*

Рис. 3.2 – Форма поперечного перерізу зразка: *а*) до деформації;
***б*) після деформації попередньо деформованого матеріалу;**
***в*) після деформації литого матеріалу**

Шорсткість плит є причиною нерівномірності деформації також і в радіальному напрямі, внаслідок чого зразок набуває овальної форми (див. рис. 3.2). Нерівномірність деформації залежить також від того, яким чином виготовлений матеріал зразка. Якщо зразок виготовлено з попередньо деформованого матеріалу, наприклад прутків, то бокова поверхня його після деформації гладка, а якщо зразок виготовлений з литого металу, то на його боковій поверхні появляються випуклини. Для зменшення неоднорідності деформації при осаджуванні застосовують гладкі шліфовані плити, а торцові поверхні зразків змащують, наприклад, графітовими мастилами.

Кількісною характеристикою деформованості є ступінь деформації, що визначають як відношення зменшення висоти зразка $\Delta h = h_0 - h_i$

до початкової висоти h_0 і виражають у відсотках $\varepsilon = (h_0 - h_i) / h_0 \cdot 100\%$, де h_i – висота зразка в момент осаджування.

Опір деформації – відношення сили P_i, що діє на зразок, до площі його поперечного перерізу S_i в момент деформації: $\sigma_\partial = P_i / S_i$.

Опір деформації є енергетичною характеристикою матеріалу, його обчислюють у кг/мм^2 або МПа (1 кг/мм^2 ≈ 10 МПа).

Оскільки форма поперечного перерізу зразка внаслідок нерівномірності деформації відрізняється від циліндричної, то для визначення площі поперечного перерізу S_i використовують значення середнього діаметра $d_c = (d_в + d_{max} + d_н)/3$, де $d_в$, d_{max}, $d_н$ – діаметри верхньої, середньої і нижньої поверхонь поперечного перерізу зразка (див. рис. 3.2).

Ці діаметри визначають як середнє арифметичне двох взаємно перпендикулярних вимірювань d_{max} і d_{min} в кожному перерізі. Таким чином, середній діаметр d_c обчислюють за результатами шести вимірювань розмірів зразка після осаджування, а потім визначають середню площу перерізу $S_i = \pi d_c^2 / 4$.

Опір деформації – це найменше напруження, яке виникає в матеріалі під дією зовнішньої сили і є необхідним для пластичної деформації, яка поширюється на весь об'єм. Опір деформації є багатофакторною функцією і залежить від природи матеріалу, його хімічного складу, кристалічної будови і умов деформації. Так, наприклад, опір деформації чистих металів менший, ніж сплавів на їх основі. З підвищенням температури опір деформації різко зменшується, а пластичність зростає.

Пластична деформація зумовлює суттєві зміни кристалічної будови, внаслідок чого метал зміцнюється: опір деформації зростає, а пластичність його зменшується, змінюються інші властивості, проявляється анізотропія міцності і пластичності. Для визначення впливу пластичної деформації на опір деформації, циліндричні зразки з матеріалу що досліджують, осаджують декілька разів з різним ступенем деформації та вимірюють силу деформації в кінці кожного осаджування.

Осаджування зразків проводять на гідравлічному пресі ПСУ-125, обладнаному силовим вимірювальним пристроєм (див. рис. 3.3).

Базовою деталлю преса слугує лита чавунна станина *1*, в якій закріплені дві вертикальні гвинтові колони *2* і робочий циліндр *3*. В порожнині циліндра знаходиться плунжер *4*, до верхнього торця якого закріплена нижня рухома плита *5*. Верхня плита 6 через сферичний підп'ятник впирається в рухому траверсу *7*, яка рухається відносно гвинтових колон за допомогою електроприводу *8*. Верхні кінці колон з'єднані нерухомою траверсою *9*.

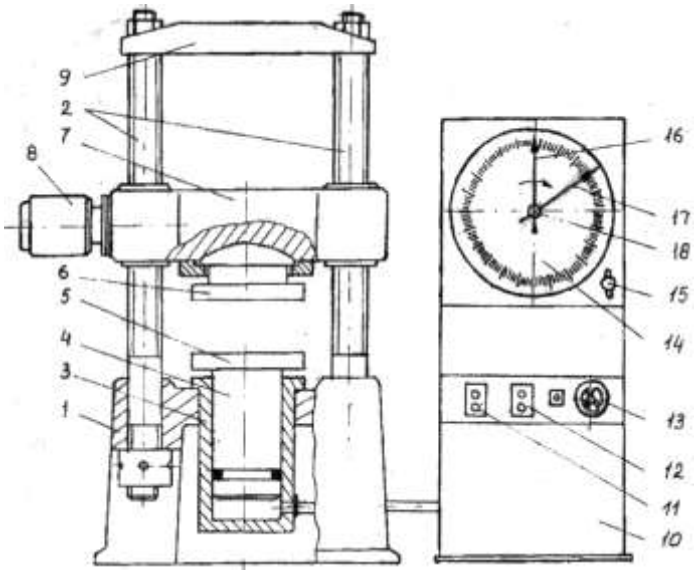


Рис. 3.3 – Схема гідравлічного преса ПСУ-125

Гідропривід преса розміщується в нижній частині окремого блока *10*, на лицьовій частині якого розташовані кнопки *11, 12* і регулятор тиску *13*, призначені для управління електроприводу рухомої траверси, гідроприводом робочого циліндра і швидкістю рухомої плити відповідно. У верхній частині блока міститься силовимірювальний пристрій, шкала *14* якого винесена на лицьову панель. Перемикач *15* слугує для установки одного з можливих значень максимального зусилля пресування 625 кН і 1250 кН. При цьому ціна однієї поділки шкали силовимірювача відповідно дорівнює 1250 Н і 2500 Н. Для визначення і фіксації максимальних зусиль пресування служать стрілки *16* і *17*. Перша з них при зростанні навантаження відхиляється за годинниковою стрілкою разом з другою. При розвантаженні стрілка *16* повертається в початкове положення, а стрілка *17* фіксує максимальне зусилля. Для повернення останньої у початкове положення призначений фіксатор *18*.

Лабораторний штамп, що використовується для осадження зразків (рис. 3.4) складається з двох базових плит *1* і *2*, паралельність яких забезпечується напрямними втулками *3* і колонками *4*, запресованими відповідно у верхню і нижню базові плити. Для піднімання верхньої плити при розвантаженні слугують пружини *5*. Робочі плити *6* і *7* через проміжні прокладки *8* і *9* кріпляться до базових плит гвинтами *10*.

Контактні поверхні робочих плит загартовані і шліфовані, що запобігає пластичній деформації і зношуванню робочих поверхонь, зменшує тертя в зоні їх контакту із зразком, що деформується. Відстань між контактними поверхнями робочих плит, що дорівнює висоті зразка під час деформації, вимірюється за допомогою лінійки *11*.

Силу осаджування визначають за положенням стрілки силовимірювального пристрою за формулою:

$$P_i = n_i \cdot c,$$

де n_i – кількість поділок відхилення стрілки в кінці осаджування; c – ціна однієї поділки силовимірювального пристрою.

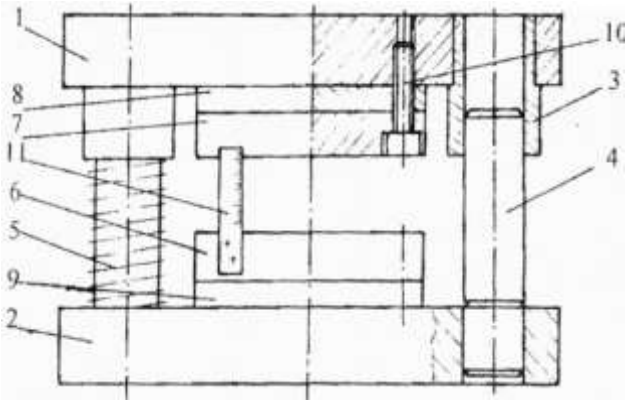


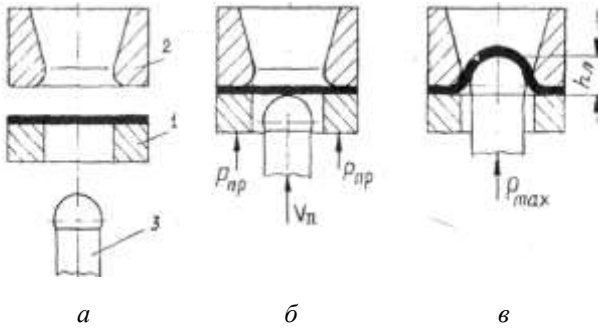
Рис. 3.4 – Лабораторний штамп для осаджування

Після кожного осаджування проводять потрібні виміри розмірів зразка, визначають P_i і S_i, обчислюють ε_i, будують графік функції $\sigma_{\partial i} = f(\varepsilon)$.

Математичну обробку результатів дослідження здійснюють шляхом апроксимації у вигляді тричлена $y = a + bx + cx^2$. Для визначення коефіцієнтів a, b, c користуються відомими значеннями x_i і складають систему рівнянь:

$$\begin{cases} y(x_1) = a + bx_1 + cx_1^2, \\ y(x_2) = a + bx_2 + cx_2^2, \\ y(x_3) = a + bx_3 + cx_3^2. \end{cases}$$

Деформованість листового металу характеризує його здатність до формозмінювальних операцій листового штампування, які застосовують для виготовлення просторових деталей типу порожнистих стаканів, коробок днищ та інших. Визначення деформованості тонких листових заготовок (від 0,2 до 2,0 мм) здійснюють методом Еріксена, шляхом витискання сферичної лунки на глибину до моменту зменшення зусилля деформації. Для цього застосовують зразки листового матеріалу розмірами 90×90 мм, які затискають в спеціальних пристроях (рис. 3.5) між притискним кільцем *1* та матрицею *2* з силою 9,8–1,96 кН. Перед проведенням вимірювань зразки з обох кінців змащують графітовим мастилом, що зменшує тертя між поверхнями зразка, пуансона *3* і матриці *2*, а також сприяє створенню рівномірного напруженого стану в зоні поверхні лунки.



а *б* *в*

Рис. 3.5 – Схема деформації листового матеріалу (метод Еріксена): *а*) встановлення зразка; *б*) початок деформації; *в*) момент утворення тріщини ($P = P_{max}$)

Під час випробувань пуансон сферичної форми втискається в зразок і формує в ньому відповідну лунку. Формування лунки супроводжується зміцненням металу і зниженням його пластичності, що зумовлює зростання зусилля на пуансоні і призводить до утворення тріщини в зоні деформації. Мірою деформованості листового матеріалу за результатами таких випробувань є глибина лунки $h_л$ до моменту зниження зусиль деформації або появи тріщини в ньому. Деформованість листового металу також залежить від його хімічного складу, кристалічної будови, тертя в зоні контакту зразка з пуансоном і матрицею, а також від інших факторів. Так, наприклад, чим менший вміст вуглецю в сталевих зразках і чим більш однорідна структура металу і менше контактне тертя, тим краща деформованість листової сталі.

Для визначення властивостей листового металу в заводських лабораторіях використовують спеціальні машини МТЛ-10Г, які за принципом дії являють собою гідравлічний прес з напівавтоматичним управлінням. Така машина автоматично затискає зразок, здійснює формування лунки, а прилади, що в ній вмонтовані, фіксують максимальне зусилля деформації і глибину лунки в момент утворення тріщини в зоні деформації зразка. Швидкість деформування може регулюватися в межах від 0–200 мм/хв, а максимальна похибка при вимірюванні глибини лунки не перевищує 0,1 мм.

Для тонколистової сталі (від 0,2 до 2,0 мм) марок Ст 0, Ст 1, Ст 2, Ст 3; Сталь 08, 10, 15 і 20 глибина лунки при випробуванні сферичним пуансоном d = 20 мм не повинна бути менша встановлених стандартами значень, які наведені у таблиці 3.1 для нормального і глибокого витягування. Нормальним вважають витягування, яке можна здійснити за один перехід, коли відношення діаметра циліндричного стакана до діаметра круглої листової заготовки, з якої його витягують, не менше 0,5. При менших значеннях цього відношення витягування вважається глибоким і здійснюється за декілька переходів.

Таблиця 3.1 – Нормована глибина лунки для маловуглецевих сталей

Товщина зразка, мм	Глибина лунки для витягування, мм	
	нормального	глибокого
0,2	5,7	6,9
0,3	6,1	7,2
0,4	6,5	7,5
0,5	6,9	8,0
0,6	7,2	8,5
0,7	7,5	8,9
0,8	7,8	9,3
0,9	8,2	9,6
1,0	8,4	9,9
1,1	8,6	10,0
1,2	8,8	10,2
1,3	9,0	10,4
1,4	9,1	10,6
1,5	9,2	11,0
1,6	9,4	11,2
1,8	9,6	11,4
2,0	9,9	11,6

Послідовність виконання

1. Виготовити зразки з деформованого алюмінієвого сплаву діаметром 20–25 мм з відношенням висоти до діаметра не більше 1,5.

2. Виміряти початкові розміри зразка штангенциркулем; встановити ціну поділки силовимірювального пристрою і записати їх значення.

3. Встановити зразок на нижню плиту штампа і притиснути його верхньою плитою за рахунок переміщення траверси преса. За допомогою лінійки, прикріпленої до нижньої плити штампа, зафіксувати положення верхньої плити відносно нижньої.

4. Визначити висоту зразка, яку він отримає після 5 % деформації, здійснити осаджування гідроприводом преса на заданий ступінь деформації і зафіксувати положення стрілки силовимірювального пристрою. Записати кількість зафіксованих поділок в колонку «n» для першого досліду (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати досліджень впливу ступеня деформації на опір деформації пруткового матеріалу

Матеріал _____,
Вихідні дані: h_0 _____, d_0 _____
Ціна поділки силовимірювача: c = _____.

Дослід	h_i, мм	n	P, кгс	d_{max}	d_{min}	d_{max}	d_{min}	d_{max}	d_{min}	ε, %	S, мм^2	σ_∂, кг/мм^2	σ_∂, МПа
				d_s, мм		d_m, мм		$d_н$, мм					
1													
2													
3													
4													

5. Опустити нижню плиту преса, вийняти зразок з робочої зони штампа, виміряти штангенциркулем висоту зразка h_i, найбільший і найменший його діаметри d_{max} і d_{min} біля верхнього торця $d_в$, посередині висоти $d_м$ і біля нижнього торця $d_н$. Результати вимірювань записати у відповідні колонки таблиці 3.2.

6. Повторити пункти 4–5 з розрахунку деформації 10, 15 і 20 % і отримані результати записати для відповідного досліду в таблицю.

7. Після кожного досліду за відповідними формулами визначити фактичний ступінь деформації ε_i, площу поперечного перерізу S_i за середнім значенням діаметрів, зусилля осаджування P_i і опір деформації $\sigma_{\partial i}$.

8. Апроксимувати результати функціональної залежності $\sigma_{\partial i} = f(\varepsilon)$ і побудувати графік цієї функції.

9. Виготовити три зразки тонколистової маловуглецевої сталі розмірами 90×90 мм, товщиною від 0,1 мм до 2 мм. Стандартна різниця товщини зразків як така, не є ключовим параметром, важлива відповідність матеріалу цьому діапазону.

10. Визначити за методом Еріксена деформованість зразків різної товщини і зусилля витягування сферичної лунки на машині МТЛ-10Г. Для цього кожний зразок розташувати в робочій зоні машини і здійснити деформацію зразка пуансоном діаметром 20 мм.

11. Зафіксувати максимальне відхилення стрілки силовимірювального пристрою, а за допомогою індикатора визначити глибину лунки h (мм), що відповідає найбільшому зусиллю деформації $P_{\max}$ (кг) кожного зразка і записати результати вимірювань у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати визначення деформованості листової сталі _____

Товщина зразка, мм	Зусилля деформації $P_{\max}$, кг	Глибина лунки h, мм		Відповідність нормованим значенням
		отримана	нормована	

12. Зарисувати один із зразків і показати місце утворення тріщини.

Зміст звіту

1. Тема та мета роботи.

2. Обладнання, інструменти та матеріали.

3. Схема осаджування і поперечного перерізу зразка до і після деформації (див. рис. 3.1 та рис. 3.2).

4. Результати дослідження впливу ступеня деформації на опір деформації і твердість матеріалу (див. табл. 3.2).

5. Апроксимація результатів досліджень, графіки функцій: $P = f_1(\varepsilon)$, $\sigma_{\partial i} = f_2(\varepsilon)$, $\text{HRB} = f_3(\varepsilon)$.

6. Схема визначення деформованості листового металу за методом Еріксена (див. рис. 3.5).

7. Результати визначення деформованості листової сталі (див. табл. 3.3).

8. Ескіз зразка з витягнутою лункою.

9. Висновки за результатами виконаної роботи.

Контрольні питання

1. Як поділяють конструкційні матеріали за технологічними властивостями?

2. Які технологічні властивості характеризують здатність конструкційних матеріалів до обробки тиском?

3. Як визначають деформованість пруткового металу? Що слугує кількісним показником деформованості?

4. Чим зумовлена нерівномірність деформації при осаджуванні циліндричних зразків?

5. Як визначають опір пластичній деформації?

6. Як впливає пластична деформація на властивості металів?

7. Яким чином визначають деформованість листового металу?

8. В чому полягає зміст методу Еріксена?

***Література*: [2**, с. 26–34]

Лабораторна робота 4

Технологія лиття в разові піщано-глиняні форми

***Мета*:** опанувати методику проєктування і розрахунку виливка, модельного комплекту та ливарної форми, технологію лиття в разові піщано-глиняні форми, набути практичних навичок при литті в разові піщано-глиняні форми.

Матеріали, обладнання, прилади: електропіч, формувальний стіл, модельний комплекс, формувальний інструмент, формувальна і стрижнева суміші, ливарний сплав.

Короткі теоретичні відомості

Лиття в разові піщано-глиняні форми – універсальний у відношенні виду ливарного сплаву, форми та розмірів спосіб виготовлення фасонних заготовок деталей машин. Отримані таким способом фасонні заготовки називають ***виливками***, а форми для виготовлення виливків – ***ливарними формами***. Виливки виготовляють шляхом заливання розплавленого металу у формотвірну порожнину відповідної форми, конфігурація якої максимально наближена до форми та розмірів готової деталі. Залитий у формотвірну порожнину розплав металу внаслідок охолодження твердіє і набуває конфігурації виливка неоднорідної кристалічної будови. Для видалення виливка піщано-глиняну форму розбивають.

Як ливарні сплави використовують сірі чавуни, сталі та сплави кольорових металів. Придатність кожного сплаву для лиття оцінюється його ливарними технологічними властивостями, до яких належать рідкотекучість (здатність заповнювати тонкостінні елементи формотвірної порожнини), об'ємна та лінійна усадка (зменшення об'єму сплаву при кристалізації та розмірів виливка при охолодженні). Рідкотекучість визначає мінімально можливу товщину стінки виливка, об'ємна усадка призводить до утворення раковин та пухкості в тілі виливка, а лінійна усадка зумовлює зміну розмірів, викривлення форми, холодні тріщини та інші дефекти.

Технологічні властивості залежать від хімічного складу ливарного сплаву, теплопровідності ливарної форми, температури заливання сплаву у ливарну форму та інших чинників.

Найважливішим чинником, який впливає на технологічні властивості ливарних сплавів, є температура заливання рідкого сплаву у ливарну форму.

Залежно від виду ливарного сплаву та розмірів виливка рекомендовані значення температури заливання, ºС, не менше:

– звичайний сірий чавун 1300–1320
– високоміцний чавун.....1250–1320
– ковкий чавун 1350–1380
– вуглецева та низьколегована сталь 1420–1450
– високолегована сталь 1420–1480
– олов'янисті і фосфористі бронзи, кременисті латуні ..1000–1100
– алюмінієві сплави 640–750
– магнієві сплави 600–680

Більші значення температури застосовують для заливання форм при виготовленні тонкостінних (до 20 мм) виливків невеликих розмірів. Слід зауважити, що температура зливання сплаву з плавильної печі повинна бути на 50–70 ºС вище температури його заливання у ливарну форму, а для легованих сталей перегрів металу збільшують на 70–100 ºС. Найкращу текучість серед чорних металів мають звичайні сірі чавуни, а серед кольорових металів – сплави на основі алюмінію з кремнієм (силуміни) і сплави на основі міді (олов'яниста бронза).

Кількісні характеристики лінійної та об'ємної усадки наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Усадка ливарних сплавів чорних і кольорових металів

Ливарний сплав	Усадка лінійна, %	Усадка об'ємна, %
Білий чавун	1,4 – 1,6	4,0 – 4,5
Сталь	1,6 – 2,0	5,0 – 6,0
Олов'яниста бронза	1,28 – 1,54	3,9 – 4,5
Алюмінієва бронза	2,3 – 2,45	7,2 – 7,4
Латунь	1,92 – 2,05	5,77 – 6,15
Алюмінієві сплави	1,25 – 1,35	3,9 – 4,05
Магнієві сплави	1,35 – 1,6	4,05 – 4,81

Ливарні піщано-глиняні форми зазвичай складаються з двох половин, відформованих у металевих рамках, які називають ***опоками***. Кожна половина містить елементи формотвірної порожнини, які відповідають зовнішнім контурам виливка, а також канали ***ливникової системи*** (стояк з чашею, шлаковловлювач, живильник і випори). Внутрішні контури виливка (отвори) отримують за допомогою піщано-глиняних ***стрижнів***. Фіксацію стрижнів у формотвірній порожнині здійснюють ***стрижневими знаками***, які формують у вигляді заглиблень у кожній половині форми і у вигляді відповідних виступів на торцях стрижня.

Виготовлення окремих елементів піщано-глиняної форми називають ***формуванням*** і його виконують як ручним способом, так і на

спеціальних формувальних машинах. Для цього використовують ***модельний комплект***, що являє собою набір певних пристроїв.

До складу модельного комплекту для ручного формування входять модель виливка, стрижневі ящики, моделі каналів ливникової системи, підмодельна плита, опоки.

Вихідними даними для конструювання виливка і модельного комплекту є робоче креслення деталі та технічні вимоги щодо її виготовлення. На креслення деталі наносять додаткові вказівки, необхідні для виготовлення модельного комплекту та ливарної форми і отримують ***технологічне креслення*** виливка. До таких вказівок належать:

– площини рознімання моделі і форми, позначені жирними штрихами поза контурами деталі з написом РМ та стрілками з літерами В (верх) і Н (низ) форми;

– припуски на механічну обробку передбачають лише на ті поверхні деталі, які позначені знаком заданої шорсткості поверхні (якщо задана однакова шорсткість відноситься до кожної поверхні або решти поверхонь деталі, то її позначають відповідним знаком у правому верхньому куті креслення деталі);

– нетехнологічні конструктивні елементи деталі, які практично неможливо або економічно недоцільно виготовити литтям (отвори малого діаметра, канавки, зубчасті поверхні, різьба тощо) перекреслюють тонкими лініями;

– на вертикальні стінки зовнішніх контурів деталі назначають ливарні нахили так, щоб більший розмір виливка розміщувався ближче до площини рознімання форми або знаходився у цій площині;

– внутрішні контури виливка і стрижневих знаків виділяють хрестиками або штрихами і спеціальним знаком показують площину рознімання стрижневого ящика.

Технологічні вказівки розробляють за умови можливості і економічної доцільності виготовлення ливарної форми. При виборі площини рознімання враховувати, щоб найвідповідальніші поверхні виливка розміщувались у нижній половині формотвірної порожнини або вертикально, оскільки у верхній частині виливка накопичуються такі дефекти литої структури, як шлакові включення та газові раковини. Площину рознімання вибирають з урахуванням зручності формування і виймання моделі з обох половин форми та стрижня з стрижневого ящика. Бажано, щоби базові для подальшої обробки поверхні виливка розміщувались в одній півформі.

При визначенні верху і низу форми доцільно глибшу порожнину передбачити у верхній півформі, що забезпечує підведення металу знизу і направлену кристалізацію виливка, запобігає руйнуванню форми струменем рідкого металу при заливанні ним формотвірної порожнини.

Припуски на механічну обробку призначають залежно від виду ливарного сплаву, складності форми та лінійних розмірів виливка і серійності виробництва. Для деталей масою до 100 кг простої форми рекомендовані наступні значення припусків для виливків: з чавуну – 2–3 мм, зі сталі – 3–4 мм, зі сплавів кольорових металів – 1–2 мм. Менші значення припусків призначають на лінійні розміри до 50 мм, більші – на розміри від 100 мм і більше, а на розміри від 50 до 100 мм вибирають середні припуски між меншим і більшим їх значенням. Так, наприклад, на діаметр сталевого виливка розміром 75 мм рекомендують припуск 3,5 мм. На верхні поверхні виливка, до яких спливають неметалеві домішки і на яких можливі усадочні дефекти, вибрані значення припусків збільшують до 50 %. Якщо для наведеного прикладу за висоту виливка прийняти розмір 75 мм, то припуск на механічну обробку 1,5×3,5 = 5,25 округлюють до 5 мм.

На вертикальні стінки виливка передбачають ливарні технологічні нахили, якщо вони не вказані на кресленні литої деталі. Ливарні нахили запобігають пошкодженню формотвірної порожнини піщаної форми при вийманні верхньої та нижньої половин моделі, а також стрижня з стрижневого ящика. Нахили спрямовують таким чином, щоби більші поперечні розміри були розташовані ближче до площини рознімання моделі або стрижневого ящика. На поверхні виливків, які позначені на кресленні деталі знаком обробки, нахили призначають поза межами припуску на обробку, а на необроблювані поверхні, які не спрягаються з поверхнями інших деталей, нахили утворюють так, щоб зовнішні розміри виділеного елемента виливка збільшувались, а внутрішні зменшувались відносно номінального розміру, розміщеному посередині висоти цього елемента.

Ливарні нахили залежать від висоти поверхні моделі виливка або його елемента, яка виймається з формотвірної порожнини піщаної форми, конструктивних особливостей цієї поверхні (вузькі виступи, заглиблення) та матеріалу моделі (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Ливарні нахили виливків лиття у піщані форми

Висота поверхні, що виймається з форми, мм	Кут нахилу (град) – поверхні, що утворюють:			
	порожнину форми		вузькі виступи і заглиблення у порожнині форми	
	Модель			
	металева	дерев'яна	металева	дерев'яна
≤ 20	≤ 2	≤ 3	3	3
21–50	1–1,5	1,5–2,5	2	2,5
51–100	0,5–0,75	0,75–1	1	1,5

Для виготовлення моделі необхідно задати форму та розміри стрижневих знаків, які залежать від розмірів стрижня та способу розміщення його у ливарній формі. За вертикального розміщення стрижнів знаки виготовляють під конус 5–10º. Висоту знака визначають за таблицею 4.3.

Таблиця 4.3 – Розміри стрижневих знаків піщаних форм

Найбільший розмір знака у поперечному перерізі, мм	Висота знака при висоті стрижня, мм:			
	до 50	50–150	150–300	300–500
До 25	15	25	40	50
25–50	20	30	45	60
50–100	25	35	50	70

Щоб запобігти утворенню гарячих тріщин у місцях спряження вертикальних і горизонтальних поверхонь литих деталей передбачають радіуси заокруглень (галтелі) в межах 5–6 мм залежно від товщини стінок спряжених елементів деталі та виду ливарного сплаву.

За технологічним кресленням виливка розробляють креслення моделі і стрижневих ящиків. Усі розміри моделі виливка та стрижневого ящика збільшують на величину лінійної усадки заданого ливарного сплаву.

При виготовленні форми за рознімною моделлю використовують парні опоки, розміри яких визначаються розмірами моделі, розміщенням каналів ливникової системи і потрібним гідростатичним напором рідкого металу, який залежить від висоти виливка. Мінімально необхідна відстань між моделлю і верхньою (нижньою) площиною форми для виливків малих розмірів складає 40–70 мм, а між моделлю (каналами ливникової системи) і стінками опоки 30–50 мм.

Важливе значення для виготовлення якісних виливків має раціональне підведення рідкого металу у формотвірну порожнину. При виборі місця впуску металу необхідно старатися підводити розплавлений метал до необроблюваних поверхонь виливка, оскільки в разі розмивання форми неметалеві домішки не проявляються при наступній механічній обробці. Не слід підводити метал так, щоб струмінь його падав з великої висоти і розбризкувався. Щоб забезпечити одночасне твердіння виливка з різною товщиною стінки метал підводять до тонших стінок, а для створення умов спрямованої кристалізації – до масивних об’ємів виливка.

Для даних у варіантах індивідуального завдання конструкціях литих деталей доцільно використати горизонтальну ливникову систему, яка складається з каналів стояка, шлаковловлювача, живильника і ви-

порів. Канали ливникової системи повинні очистити рідкий метал від шлакових та інших забруднень, забезпечити сталий гідродинамічний тиск рідкого металу на робочі поверхні формотвірної порожнини, сприяти видаленню з формотвірної порожнини повітря, газів і пари, які утворюються при взаємодії рідкого металу з складовими формових та стрижневих сумішей. Щоб запобігти розриванню металевого струменя поперечний переріз каналів ливникової системи розраховують за умови:

$$\sum F_{ж} = \frac{M_{РМ}}{\tau \cdot k \cdot L},$$

де $\sum F_{ж}$ – сума поперечних перерізів живильників, см^2; $M_{рм}$ – маса рідкого металу, кг; τ – тривалість заливання форми, с; k – питома швидкість заливання металу у форму, кг/(см^2 · с); L – коефіцієнт рідиннотекучості металу.

Масу рідкого металу $M_{рм}$ обчислюють наближено за кресленням виливка. Значення питомої швидкості k, заливання металу у форму залежно від відносної густини виливка наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Залежність питомої швидкості заливання форми від відносної густини виливка

Ливарний сплав	Відносна густина виливка, кг/дм^3:						
	до 1	1,1–2	2,1–3	3,1–4	4,1–5	5,1–6	> 6
Чавун	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15
Сталь	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	0,95
Мідні сплави	0,35	0,45	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
Алюмінієві сплави	0,25	0,35	0,45	–	–	–	–

Відносну густину виливка визначають за відношенням $\delta = M_{рм}/V$, де V – умовний об'єм виливка, обчислений за його габаритними розмірами (дм^3).

Наведені у таблиці 4.4 значення k стосуються технології заливання металу у сирі форми, а при використання сухих форм їх збільшують у 1,5 рази. Коефіцієнт рідиннотекучості L = 1 для виливків з чавуну та сплавів кольорових металів, а для сталевих виливків L = 0,8.

Тривалість часу τ заливання форми для виливків з чавуну обчислюють за виразом $\tau = 1{,}11 \cdot \sqrt{M_{РМ}}$, а для сталевих виливків – $\tau = s \cdot \sqrt{M_{РМ}}$ де s – поправковий коефіцієнт, який залежить від усередненої товщини Δ_c стінки виливка.

Таблиця 4.5 – Значення поправкового коефіцієнта *s* від усередненої товщини Δ*c* стінки виливка

Δ_c, мм	до 10	11–20	21–40	більше 40
s	1,0	1,3	1,5	1,7

Площі перерізів елементів ливникової системи – сумарної площі живильних каналів $\sum F_{ж}$, шлаковловлювача $F_{шл}$ і стояка $F_{ст}$, задають такими співвідношеннями – для виливків:

– з чавуну $\sum F_{ж} : F_{шл} : F_{ст}$ = 1:1,3:1,1;

– сталевих $\sum F_{ж} : F_{шл} : F_{ст}$ = 1:1,1:1,2;

– з бронзи $\sum F_{ж} : F_{шл} : F_{ст}$ = 2:1,5:1;

– з латуней $\sum F_{ж} : F_{шл} : F_{ст}$ = 2,5:1,5:1;

– з алюмінієвих сплавів $\sum F_{ж} : F_{шл} : F_{ст}$ = 3:2:1;

– з магнієвих сплавів $\sum F_{ж} : F_{шл} : F_{ст}$ = 4:2:1.

Оскільки сталь і деякі сплави кольорових металів наділені підвищеною усадкою, то щоб запобігти утворенню усадочних раковин до масивних частин виливка передбачають додаткові об'єми рідкого металу – додатки. Діаметр додаткової порожнини складає 1/3 товщини стінки виливка, до якої підводять додаток, і висоту цієї порожнини беруть не менше 1,5 її діаметра. Об'єм додатка загалом складає до 30–50 % об'єму рідкого металу, який заливається у ливарну форму.

Ефективність технології лиття оцінюють коефіцієнтом використання ливарного сплаву, який обчислюють у відсотках як відношення об'єму деталі до об'єму виливка $КВМ = V_{дет} / V_{вил} \cdot 100\%$.

Об'єм деталі $V_{дет}$ і об'єм виливка $V_{вил}$ обчислюють наближено за їх розмірами як алгебраїчну суму елементарних об'ємів (циліндрів, зрізаних конусів та ін.), на які умовно поділяють відповідно тіло деталі і тіло виливка. Об'єми циліндра $V_{ц}$ і зрізаного конуса $V_{зк}$ відповідно, обчислюють за відомими формулами:

$$V_{зк} = \frac{\pi}{12}\left(D^2 + D \cdot d + d^2\right)H \text{ та } V_{ц} = \frac{\pi D^2}{4}H;$$

де D – діаметр циліндра або більшої основи зрізаного конуса, H – висота циліндра або конуса, d – діаметр меншої основи конуса.

Об'єм виливка обчислюють з урахуванням припусків на механічну обробку формувальних нахилів. Радіусами заокруглень зазвичай нехтують.

Послідовність виконання

За ескізом та розмірами заданої згідно варіанта (див. табл. 4.5) литої деталі потрібно:

1. Дати коротку технічну характеристику технологічних властивостей заданого ливарного сплаву і способу його виплавлення.
2. Оцінити технологічність конструкції деталі і обчислити її об'єм.
3. Визначити просторове розміщення виливка у ливарній формі і площини рознімання верхньої та нижньої половин форми.
4. Визначити розміри та намалювати ескізи виливка, моделі, стрижневого ящика і ливарної форми у розрізі та показати розміщення каналів ливникової системи та додатків.
5. Обчислити об'єм виливка.
6. Розрахувати площі перерізів каналів ливникової системи.
7. Обчислити коефіцієнт використання ливарного сплаву.
8. Скласти маршрутну технологію лиття заданої деталі.

Методичні рекомендації

1. Дано ескіз (рис. 4.1, *а*) і розміри деталі:

D = 150 мм; $d_1 = d_2$= 80 мм; d_3 = 100 мм; H = 50 мм; $h_1 = h_2$ = 10 мм.

Матеріал деталі – сталь 55Л; матеріал моделі – дерево.

Сталь 55Л – відноситься до групи вуглецевих конструкційних якісних сталей, містить 0,55 % вуглецю. Температура рідкої сталі перед заливанням її у ливарну форму повинна бути в межах 1420–1450 ºС. Сталь відрізняється значною усадкою і низькою рідкотекучістю. Лінійна усадка та об'ємна усадка сталі відповідно складає 1,4–1,8 % і 4,0–4,5 %. Ці властивості сталі призводять до утворення в тілі виливка усадочних раковин, значних внутрішніх напружень та гарячих тріщин. Тому лиття сталевих виливків складної технології виготовлення потребує значних витрат рідкого металу на додатки та їх відрізування, очищення від пригару формової суміші і відпалювання виливків. Для виготовлення ливарних форм сталевого литва потрібно застосувати формові та стрижневі суміші підвищеної вогнетривкості і міцності, сушіння ливарних форм, установлення додатків і холодильників, щоб запобігти утворенню у виливках усадочних раковин.

Для виплавляння сталі у ливарних цехах використовують зазвичай електроіндукційні печі ємністю тигля до 10 т рідкого металу. Виплавляння сталі здійснюють методом переплавляння чистих, старанно підібраних шихтових матеріалів, до складу яких входять брухт

чавуну і сталі, відходи власного виробництва (ливники, браковані виливки), а також матеріали, які забезпечують виплавлення заданої марки сталі високої якості. До останніх належать розкислювачі (мелений кокс, феросиліцій та алюміній).

Задана деталь за технологічними ознаками відноситься до групи осесиметричних гладких низьких деталей (H/D = 100/150 = 0,67 < 1) з центральним ступінчастим отвором ($d_1 = d_2 > 30$ мм). Механічна обробка передбачена для усіх поверхонь, за винятком отвору діаметром d_3 = 100 мм, висотою $H - (h_1 + h_2) = 100 - (10 + 10) = 80$ мм.

Об'єм деталі:

$$V_д = V_1 - (2V_2 + V_3) = 547{,}4 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

де $V_1 = \dfrac{\pi D^2 H}{4} = \dfrac{3{,}14 \cdot 150^2 \cdot 50}{4} = 883{,}1 \cdot 10^3$ мм^3;

$$V_2 = \frac{\pi d_1^2 h_1}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 80^2 \cdot 10}{4} = 50{,}24 \cdot 10^3 \text{ мм}^3;$$

$$V_3 = \frac{\pi d_3^2 \left(H - 2h_1\right)}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 100^2 \left(50 - 2 \cdot 10\right)}{4} = 235{,}5 \cdot 10^3 \text{ мм}^3.$$

Враховуючи обриси і співвідношення розмірів внутрішніх та зовнішніх контурів заданої деталі, а також технологію формування за рознімною моделлю доцільним є лиття у формотвірній порожнині з вертикальним розміщенням стрижня і горизонтальним підведенням ливарного сплаву у формотвірну порожнину. Площину рознімання слід розмістити посередині висоти зовнішнього (найбільшого) розміру деталі. Оскільки деталь є симетричною відносно серединного перерізу і обидві торцеві поверхні підлягають механічній обробці, то будь-яку з них можна прийняти за верхню або нижню поверхню виливка.

Проєктування виливка (див. рис. 4.1, *б*) виконують у такій послідовності. Спочатку тонкими лініями перемальовують контури деталі. Поза зовнішніми контурами жирними штрихами позначають розміщення площини рознімання форми і моделі (РМ), стрілками та літерами показують верх (В) та низ (Н) виливка. Враховуючи вимоги щодо шорсткості поверхонь деталі, позначених знаком механічної обробки, визначають припуски на механічну обробку залежно від номінального розміру деталі та розміщення поверхні деталі у формотвірній порожнині. Потім залежно від матеріалу моделі передбачають ливарні нахили, а залежно від наявності невиконуваних у тілі виливка елементів деталі – конструктивні напуски і показують стрижневі знаки.

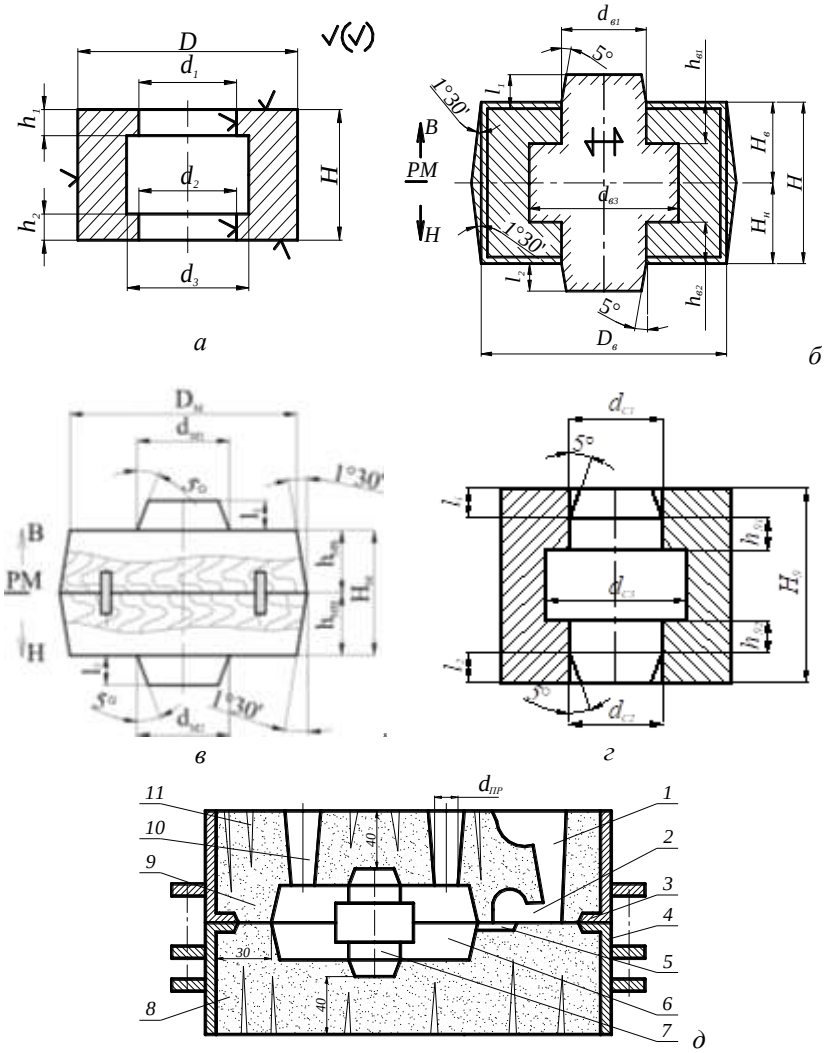


Рис. 4.1 – Деталь (*а*), виливок (*б*), модель (*в*), стрижневий ящик (*г*), разова піщана форма в розрізі (*д*)

Контури виливка наводять жирними лініями, а контури стрижня виділяють штрихами. Спеціальним технологічним знаком показують площину та напрям рознімання стрижневого ящика.

Розміри виливка:

$D_в = D + 2Пр_D = 150 + 2 \cdot 4 = 158$ мм;

$d_{1в} = d_{2в} = d_1 - 2Пр_d = 80 - 2 \cdot 3 = 74$ мм;

$d_{3в} = d_3 = 100$ мм;

$h_{в(верх)} = 0{,}5H + Пр_в = 0{,}5 \cdot 50 + 4 = 29$ мм;

$h_{в(низ)} = 0{,}5H + Пр_н = 0{,}5 \cdot 50 + 3 = 28$ мм;

$H_в = H + Пр_в + Пр_н = 50 + 4 + 3 = 57$ мм;

$h_{1в} = h_1 + Пр_в = 10 + 4 = 14$ мм;

$h_{2в} = h_1 + Пр_н = 10 + 3 = 13$ мм.

Висота поверхні, що виймається з формотвірної порожнини: $h = h_{в(верх)} = 29$ мм.

Ливарні нахили на вертикальні зовнішні поверхні при використанні дерев'яної моделі (див. табл. 4.2) $\beta = 1^\circ 30'$.

$$D_{в(\max)} = D_в + 2h \cdot \operatorname{tg}\beta = 158 + 2 \cdot 29 \cdot \operatorname{tg}1^\circ 30' = 160 \text{ мм}.$$

Розміри стрижневих знаків визначають за розмірами поперечного перерізу і висоти стрижня (табл. 4.3) в межах 50–100 мм. Згідно з таблицею висота знаків $l_1 = l_2 = 35$ мм, конусність знаків – 5°.

Модель виливка (рис. 4.1, *в*) і формотвірну порожнину стрижневого ящика (рис. 4.1, *г*) виготовляють за технологічним кресленням виливка з урахуванням стрижневих знаків. Розміри моделі і формотвірної порожнини стрижневого ящика збільшують на величину лінійної усадки ливарного сплаву. Для розрахункового значення лінійної усадки сталі до 2 % визначають розміри моделі:

$D_м = 1{,}02\ D_в = 1{,}02 \cdot 158 = 160$ мм;

$d_{1м} = d_{2м} = 1{,}02\ d_{1в} = 1{,}02 \cdot 74 = 75{,}5$ мм;

$H_м = 1{,}02\ H_в = 1{,}02 \cdot 57 = 58$ мм;

$h_{м\,(верх)} = 1{,}02\ h_{в(верх)} = 1{,}02 \cdot 29 = 29{,}6$ мм;

$h_{м(низ)} = 1{,}02\ h_{в(низ)} = 1{,}02 \cdot 28 = 28{,}5$ мм;

$D_{м(max)} = 1{,}02\ D_{в(max)} = 1{,}02 \cdot 160 = 163$ мм;

$l_1 = l_2 = 35$ мм.

Обчислюють розміри формотвірної порожнини стрижневого ящика з урахуванням лінійної усадки до 2 %:

$d_{с1} = d_{с2} = 1{,}02\ d_{1в} = 1{,}02 \cdot 74 = 75{,}5$ мм;

$d_{с3} = 1{,}02\ d_{3в} = 1{,}02 \cdot 100 = 102$ мм;

$h_{с1} = 1{,}02\ h_{1в} = 1{,}02 \cdot 14 = 14{,}3$ мм;

$h_{с2} = 1{,}02\ h_{2в} = 1{,}02 \cdot 13 = 13{,}3$ мм;

$l_1 = l_2 = 35$ мм.

Модель виливка зазвичай виготовляють з твердих порід дерева (бук, ясень, дуб), а стрижневий ящик – з сталі. Розніми моделі і стрижневого ящика виконують згідно технологічного креслення виливка. Для фіксації верхньої та нижньої половин моделі і половин стрижневого ящика у площині рознімання застосовують штифти і відповідні отвори.

Ливарна форма з зображенням ливникових каналів, формотвірна порожнина якої отримана зовнішніми обрисами заданої моделі і стрижнем, виготовленим у цьому стрижневому ящику, показана на рис. 4.1, *д*. Конструктивними елементами показаної форми є: *1* – стояк з чашею; *2* – шлаковловлювач; *3* – верхня опока; *4* – нижня опока; *5* – живильник; *6* – формотвірна порожнина; *7* – стрижень; *8* – нижня половина форми; *9* – верхня половина форми; *10* – випор (додаток); *11* – вентиляційний отвір.

Розплавлену сталь заливають у ливарну чашу, де осідають тугоплавкі і важчі за сталь домішки і чаша сприймає гідродинамічний удар струменя сталі. Очищений від важких домішок метал далі через стояк і канал шлаковловлювача, у якому затримуються нерозчинні легші за сталь домішки, опускається у канал живильника і впускається у формотвірну порожнину. Заливання сталі продовжують, поки вона не появиться на поверхні каналу випору. Оскільки сталь 55Л має значну об'ємну усадку (до 4,5 %), то щоб запобігти утворенню усадочних раковин передбачено додатки у вигляді випорів відповідних розмірів.

Діаметр додатка:

$$d_{д(низ)} = 1/3\frac{D_в - d_{зв}}{2} = 1/3\frac{158-100}{2} = 9,6 \text{ мм.}$$

Висота додатка: $h_д = 1,5\, d_{д(низ)} = 1,5 \cdot 9,6 = 14,5$ мм.

Кількість додатків n визначають за умовним показником їх загальної довжини $L_д$:

$$L_д = 0,35L_в = \pi \frac{D_в + d_{зв}}{8} = 0,35 \cdot 3,14\frac{158+100}{8} = 35,44 \text{ мм.}$$

$$n = \frac{L_д}{d_{д(низ)}} = \frac{35,44}{9,6} = 3,7.$$

Кількість додатків округлюють до 4.

Розрахунок інших каналів ливникової системи виконують за об'ємом рідкого металу, необхідним для заповнення формотвірної порожнини і додатків. Об'єм формотвірної порожнини визначають за об'ємом виливка, який обчислюють як алгебраїчну суму окремих складових тіла виливка:

$$V = V_1 + V_2 - V_3 - V_4 - V_5 = (575{,}5 + 555{,}7 - 60{,}2 - 55{,}8 - 235{,}5)\ 10^3 =$$
$$= 779{,}7 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

де $V_1 = \frac{\pi}{12}\ h_{в(верх)}\ (D^2_{в(\max)} + D_{в(\max)} \cdot D_в + D^2_в) =$

$= 0{,}25 \cdot 29\ (160^2 + 160 \cdot 158 + 158^2) = 575{,}5 \cdot 10^3$ мм^3;

$$V_2 = \frac{\pi}{12}\ h_{в(низ)}\ (D^2_{в(\max)} + D_{в(\max)} \cdot D_в + D^2_в) =$$

$= 0{,}25 \cdot 28\ (160^2 + 160 \cdot 158 + 158^2) = 555{,}5 \cdot 10^3$ мм^3;

$$V_3 = \frac{\pi}{4}\ d^2_{1в} \cdot h_{1в} = \frac{3{,}14 \cdot 74^2 \cdot 14}{4} = 60{,}2 \cdot 10^3 \text{ мм}^3;$$

$$V_4 = \frac{\pi}{4}\ d^2_{2в} \cdot h_{2в} = \frac{3{,}14 \cdot 74^2 \cdot 13}{4} = 55{,}8 \cdot 10^3 \text{ мм}^3;$$

$$V_3 = \frac{\pi}{4}\ d^2_{3в}\ (H_в - h_{1\,в} - h_{2в}) = \frac{3{,}14 \cdot 100^2 \cdot 30}{4} = 235{,}5 \cdot 10^3 \text{ мм}^3;$$

Об'єм металу, необхідний для заповнення одної порожнини додатка, визначають з урахуванням її конусності 2°:

$$V_{1д} = \frac{\pi}{12}\ h_д\ (d^2_{д(верх)} + d_{д(верх)} \cdot d_{д(низ)} + d^2_{д(низ)}),$$

де $d_{д(верх)} = d_{д(низ)} + 2\ h_д \cdot \operatorname{tg} 2^\circ = 9{,}6 + 2 \cdot 14{,}5 \cdot \operatorname{tg} 2 = 10{,}6$ мм.

$$V_{1д} = \frac{3{,}14 \cdot 14{,}5}{12}\left(10{,}6^2 + 10{,}6 \cdot 9{,}6 + 9{,}6^2\right) = 1{,}165 \cdot 10^3 \text{ мм}^3.$$

Об'єм металу, необхідний для заповнення чотирьох додатків:

$V_д = 4 \cdot 1{,}165 \cdot 10^3 = 4{,}66 \cdot 10^3$ мм^3.

Загальний об'єм металу для заповнення форми:

$V_{рм} = V_в + V_д = (779{,}7 + 4{,}66) \cdot 10^3 = 784{,}4 \cdot 10^3$ мм^3 = 784,4 см^3.

Маса рідкого металу, що заливається у форму:

$M_{рм} = V_{рм} \cdot \rho$, де ρ = 7,7 г/см^3 – густина рідкої сталі.

$M_{рм} = 784{,}4 \cdot 7{,}7 = 6039{,}58$ г $\approx$ 6,04 кг.

Габаритний об'єм виливка:

$$V_{гв} = \frac{\pi D^2_{в(\max)}}{4} H_в = \frac{3{,}14 \cdot 160^2}{4} \cdot 57 = 1145 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 = 1{,}145 \text{ дм}^3.$$

Відносна густина виливка $\delta = M_{рм}/V_{гв} = 6{,}04 / 1{,}145 = 5{,}3$ кг/дм^3.

Враховуючи високу температуру рідкої сталі (1420–1450 ºС) необхідно передбачити заливання її у суху піщано-глиняну форму і за таблицею 4.4 визначити питому швидкість заливання сталі $k = 0{,}90$. Коефіцієнт рідкотекучості для сталі $L = 0{,}8$. Усереднена товщина стінки виливка $\Delta_с = 0{,}5(D_в - d_{зв}) = 0{,}5(158 - 100) = 29$ мм. За даними таблиці 4.5 вибирають поправковий коефіцієнт $s = 1{,}5$.

За таких умов тривалість заливання форми:

$$t = s\sqrt{M_{рм}} = 1{,}5\sqrt{6{,}04} = 3{,}7 \text{ с}.$$

Площа поперечного перерізу живильників:

$$\sum F_ж = \frac{M_{рм}}{tkL} = \frac{6{,}04}{3{,}7 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}8} = 2{,}27 \text{ см}^2 = 227 \text{ мм}^2.$$

Для заливання заданої форми достатньо передбачити один канал живильника прямокутного перерізу розмірами 14×16 мм площею перерізу 224 мм^2.

Площі перерізу каналів шлаковловлювача $F_{шл}$ і стояка $F_{ст}$ розраховують за умови:

$$F_{шл} = 1{,}1\, F_ж = 1{,}1 \cdot 224 = 246 \text{ мм}^2;$$
$$F_{ст} = 1{,}2\, F_ж = 1{,}2 \cdot 224 = 269 \text{ мм}^2.$$

Канал шлаковловлювача потрібно виготовити прямокутного профілю розмірами 14×17,5 мм, а канал стояка у формі конуса з мінімальним діаметром $d_{ст} = 1{,}13\sqrt{F_{ст}} = 1{,}13\sqrt{269} = 18{,}5$ мм.

Коефіцієнт використання металу:

$$КВМ = \frac{V_д}{V_в} = \frac{547{,}4 \cdot 10^3}{779{,}7 \cdot 10^3} \cdot 100 = 70{,}2\ \%.$$

Маршрутна технологія (рис. 4.2) передбачає схематичне зображення оптимальної послідовності виконання операцій, пряме та зворотне використання їх продуктів та відходів.

Приготування формової і стрижневої сумішей, виготовлення модельного комплекту і плавлення ливарного сплаву виконують неза-

лежно на окремих дільницях ливарного цеху. Формування складових елементів ливарної форми забезпечується формовою та стрижневою сумішами і модельним комплектом. Розплавлений ливарний сплав подається на дільницю заливання форми. Відпрацьовану формову та стрижневу суміші використовують повторно, а відокремлені від виливка ливники знову переплавляють для нової порції ливарного сплаву.

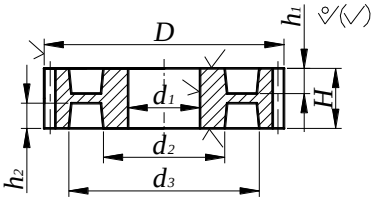
Рис. 4.2 – Основні види робіт і послідовність їх виконання при литті виливків у піщано-глиняні форми

Таблиця 4.5 – Варіанти завдань до самостійного виконання

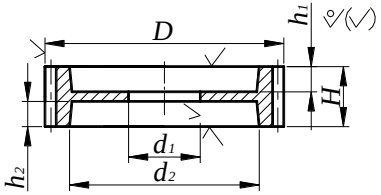
Варіант	Вихідні дані			Розміри деталі, мм							
	Ескіз деталі	Матеріал деталі	Матеріал моделі	D	d_1	d_2	d_3	H	h_1	h_2	Z^*
1	А	Чавун СЧ 30	Дерево	100	32	50	80	25	10	10	26
2	Б	Чавун ВЧ 62-3	Метал	100	32	70	–	25	8	8	27
3	В	Чавун КЧ 30-6	Дерево	100	32	70	–	25	15	–	28
4	Г	Сталь 25Л	Метал	100	32	55	–	25	6	6	29
5	Д	Латунь ЛС59-1	Дерево	100	32	50	80	25	10	8	30
6	Е	Бронза БрА5	Метал	100	32	45	80	25	10	8	31
7	Ж	Сплав АЛ19	Дерево	100	32	45	80	25	8	10	32
8	К	Сплав МЛ4	Метал	100	32	45	80	25	5	5	33
9	Л	Сталь 25Х18Л	Дерево	100	32	45	80	25	10	15	34
10	М	Латунь ЛК80-3	Метал	100	32	45	65	25	6	10	35
11	А	Сплав АЛ19	Метал	120	40	60	80	25	10	10	36
12	Б	Сплав МЛ4	Дерево	120	40	90	–	25	8	8	37
13	В	Сталь 25Х18Л	Метал	120	40	90	–	25	15	–	38
14	Г	Латунь ЛК80-3	Дерево	120	40	60	–	25	6	6	39
15	Д	Сталь 25Х18Л	Метал	120	40	60	100	25	10	8	40
16	Е	Чавун СЧ 30	Дерево	120	40	60	100	25	10	8	41
17	Ж	Чавун ВЧ 62-3	Метал	120	40	60	100	25	8	10	42
18	К	Чавун КЧ 30-6	Дерево	120	40	60	100	25	5	5	43
19	Л	Сталь 25Л	Метал	120	40	60	100	25	10	15	44
20	М	Латунь ЛС59-1	Дерево	120	40	60	100	25	6	10	45
21	А	Бронза БрА5	Метал	150	50	70	120	50	20	20	46
22	Б	Сплав АЛ19	Дерево	150	50	120	–	40	15	15	47
23	В	Сплав МЛ4	Метал	150	50	120	–	40	25	–	48
24	Г	Сталь 25Х18Л	Дерево	150	50	80	–	40	10	10	49
25	Д	Латунь ЛК80-3	Метал	150	50	70	120	40	20	10	50
26	Е	Сплав АЛ19	Дерево	150	50	70	120	40	20	10	51
27	Ж	Сплав МЛ4	Метал	150	50	70	120	40	10	20	52
28	К	Сталь 25Х18Л	Дерево	150	50	70	120	40	10	10	53
29	Л	Латунь ЛК80-3	Метал	150	50	70	120	40	20	30	54
30	М	Сталь 25Х18Л	Дерево	150	50	70	90	40	10	20	55

***Примітки*:** $^*Z$ – число зубів деталі; не вказані технологічні нахили – 3º; не вказані радіуси заокруглень – 3 мм.

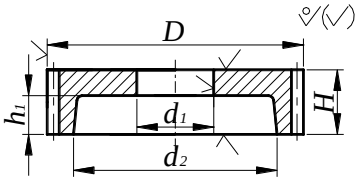
Ескізи деталей до варіантів завдань самостійної роботи



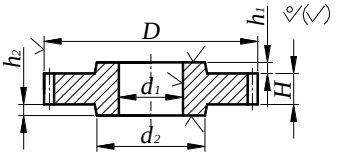
а



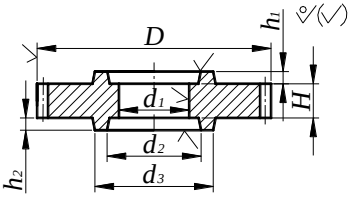
б



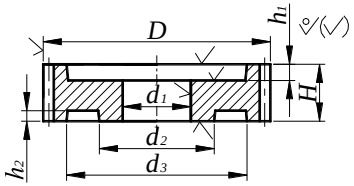
в



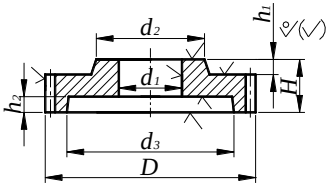
г



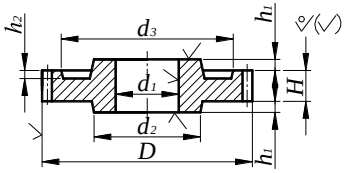
д



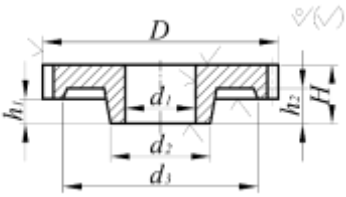
е



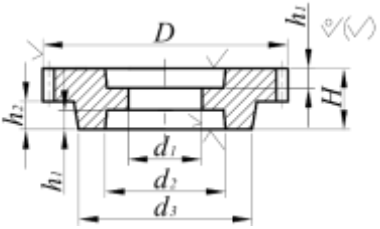
ж



к



л



м

Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Обладнання, інструменти, матеріали.
3. Ескіз деталі індивідуального завдання.
4. Ескізи моделі і стрижневого ящика.
5. Ескіз ливарної форми в розрізі із зображенням каналів ливникової системи.
6. Обґрунтування розміщення виливка і площини розміщення ливарної форми.
7. Результати проміжних розрахунків.
8. Висновки.

Контрольні питання

1. В чому полягає сутність ливарного виробництва?
2. Які переваги і недоліки лиття в піщані форми?
3. Що є формовою сумішшю? Які їх технологічні властивості?
4. Які основні елементи піщаної форми? Яким чином їх виготовляють?
5. Що входить до складу ливникової системи? Яке призначення кожної складкової?
6. Що є модельним комплектом? Що входить до складу модельного комплекту?
7. Що є технологічний ескіз виливка? Ескіз моделі виливка?
8. Що є моделлю виливка? Чим відрізняється модель від виливка?
9. Що таке стрижневий ящик? Яким чином виготовляють піщаний стрижень?
10. Що є стрижневими знаками? Яке їх призначення?
11. Які основні принципи проєктування модельного комплекту?

***Література*: [1**, с. 12–23; **3**, с. 34–53; **4**, с. 12–14; **5**, с. 21–38]

Лабораторна робота 5

Технологія об'ємного штампування

***Мета*:** опанувати методику проєктування і розрахунку осесиметричних поковок і формотвірних порожнин відкритих і закритих штампів та освоїти технологію об'ємного штампування, набути практичних навичок при об'ємному штампуванні.

Матеріали, обладнання, прилади: прес гідравлічний ПСУ-125, лабораторні штампи для відкритого і закритого штампування, зразки осесиметричних деталей, поковок і вихідних заготовок.

Короткі теоретичні відомості

Поковки низьких осесиметричних деталей отримують шляхом осаджування простої мірної заготовки на ***кривошипних гарячештампувальних пресах*** (КГШП) та ***пароповітряних молотах*** (ППМ) як у відкритих, так і у закритих штампах. Прості мірні заготовки зазвичай циліндричної форми висотою H_o і діаметром D_o відрізають від прутка круглого сортового прокату методом зсуву на механічних пресножицях. Для якісного відрізання таким способом необхідно забезпечити відношення $H_o / D_o > 1{,}2$. При відрізанні заготовок меншої висоти має місце значне викривлення перпендикулярності торців і циліндричної форми заготовки. Проте чим менше діаметр заготовки, тим менше необхідне зусилля різання і потужність обладнання для відрізання заготовок. Для поліпшення пластичності металу і зменшення опору пластичній деформації мірні заготовки нагрівають у полум'яних камерних і методичних печах або електронагрівальних пристроях.

Максимально припустиму температуру нагрівання $t_{\max}$ визначають за умови запобігання явищ перегрівання і перепалювання металу, що відповідно призводить до часткової і повної втрати пластичності металу. Мінімально припустима температура $t_{\min}$ гарячої обробки також обмежена втратою пластичності і різким зростанням опору пластичній деформації металу. Стосовно вуглецевих сталей $t_{\max}$ і $t_{\min}$ визначають за допомогою спрощеної діаграми [4, с. 121]. залізовуглецевих сплавів (рис. 5.1):

$t_{\max} = t_{AE} - (150\ldots200)$ ºС;

$t_{\min} = t_{GS} + (30\ldots50)$ ºС – для доевтектоїдних сталей;

$t_{\min} = t_S + (30\ldots50)$ ºС – для евтектоїдної сталі;

$t_{\min} = t_{PSK} + (30\ldots50)$ ºС – для заевтектоїдних сталей.

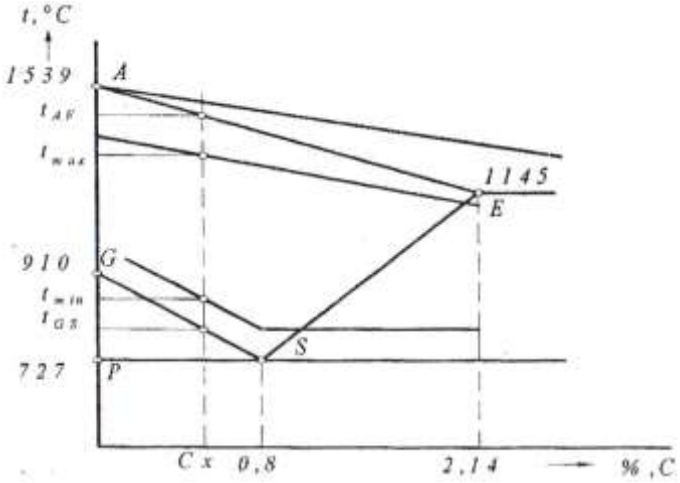


Рис. 5.1 – Температурний інтервал об'ємного штампування сталі

Температурний інтервал t_{AE} і t_{GS} для кування заготовки з відомої марки сталі наближено розраховують за виразами:

$$t_{AE} = t_A - \frac{t_A - t_E}{C_E} C_x; \quad t_{GS} = t_G - \frac{t_G - t_S}{C_S} C_x,$$

де t_A = 1539 ºС; t_E = 1147 ºС; t_G = 910 ºС; t_S = t_{PSK} = 727 ºС; C_E = 2,14 %; C_S = 0,8 % (відомі з діаграми числових значень температури і концентрації вуглецю); C_x – вміст вуглецю у сталі, яка піддається нагріванню (%).

Оптимальна тривалість нагрівання (у годинах) становить:

$$\tau = \alpha k D \sqrt{D},$$

де α – враховує спосіб укладання заготовок на днищі печі і форму їх поперечного перерізу (заданий у варіанті завдання); $k = 12,5$ – для вуглецевої сталі; D – розмір поперечного перерізу заготовки, м.

Потім нагріті до визначеної температури заготовки осаджують плоскими плитами штампів для зменшення висоти заготовки і збільшення її діаметра. Діаметр осадженої заготовки наближено повинен становити 0,8–0,9 найбільшого діаметра штампованої деталі. Для якісного осаджування необхідно, щоб H_o / D_o < 2,5. Осаджування більш високих заготовок призводить до їх згинання і утворення неприпусти-

мих складок. Отже, за умови якісного нарізання і осаджування розміри вихідних заготовок обмежені відношенням $1{,}2 < H_o / D_o < 2{,}5$.

Нагріті для осаджування заготовки на повітрі інтенсивно окиснюються і на їх поверхні утворюється окалина, що являє собою крихкий шар оксидів заліза. Під час осаджування суцільний шар окалини розтріскується і видаляється стиснутим повітрям. Очищені таким чином від окалини осаджені гарячі заготовки переносять у формотвірні рівчаки штампа, у яких відбувається основна формотвірна операція – штампування осаджених заготовок.

Сутність штампування полягає в тому, що внаслідок пластичної деформації під дією зусилля КГШП або ударів ППМ метал осадженої заготовки перерозподіляється в порожнині штампа, конфігурація і розміри якої максимально наближені до форми та розмірів готової деталі. Залежно від будови формотвірної порожнини штампа і можливих напрямів пластичного зміщення (течії) металу для виготовлення низьких осесиметричних поковок застосовують як відкрите, так і закрите штампування.

При відкритому штампуванні (рис. 5.2) формотвірна порожнина *1* частково розміщується у нижній *2* у і частково верхній *3* половинах штампа. При наближенні обох половин штампа рухомими деталями КГШП або ППМ метал осадженої заготовки витискається вверх, вниз і у радіальному напрямку до дотикання обох половин у площині їх рознімання. При цьому опір витисканню металу у радіальному напрямі менший ніж витисканню його вверх або вниз і метал витискається у зазор між обома половинами штампа, не заповнивши весь простір у верхній та нижній його половинах.

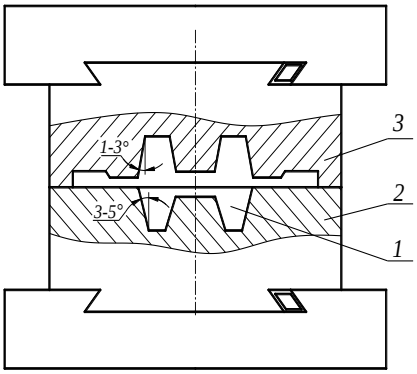
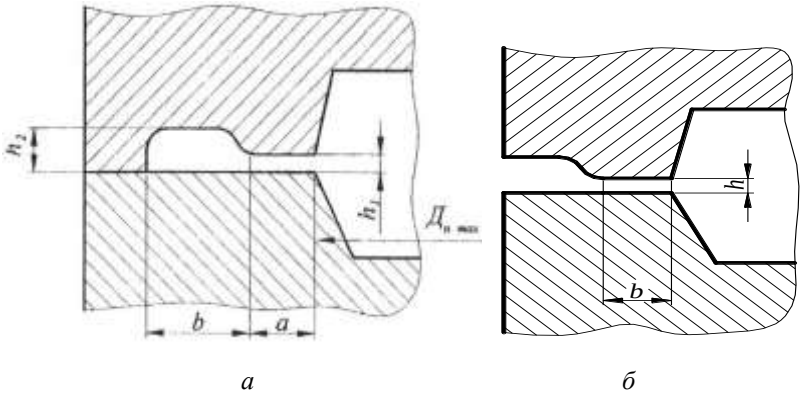


Рис. 5.2 – Будова молотового відкритого штампа

Щоб запобігти витисканню металу за межі формотвірної порожнини по периметру верхньої її половини передбачено так звану облойну канавку змінного перерізу (рис. 5.3), утвореного звуженою частиною (містком) і розширеною частиною (магазином). У зімкнутому стані місток утворює вузьку щілину розмірами $h_1 \times a$, а магазин – розширену частину розмірами $h_2 \times b$.



а *б*

Рис. 5.3 – Форма та розміри облойної канавки молотового (*а*) і пресового (*б*) штампів

Місток облойної канавки створює достатній опір витисканню металу за межі формотвірної порожнини. Чим менше висота містка h_1 і більша його ширина a, тим більший опір витисканню металу з порожнини штампа і тим краще вона заповнюється металом. Магазин облойної канавки призначений для розміщення надлишку металу, якщо об'єм вихідної заготовки дещо більший, ніж його потрібно для заповнення формотвірної порожнини і містка облойної канавки.

Розміри облойної канавки молотових (див. рис. 5.3, *а*) вибирають залежно від найбільшого розміру формотвірної порожнини. Розрахунковим параметром виступає висота містка, яку визначають за виразом $h_1 = c\sqrt{F}$, де c – коефіцієнт, що враховує складність форми поковки (для осесиметричних поковок c = 0,015); $F = \pi D_{\max}^2 / 4$; де $D_{\max}$ – найбільший діаметр формотвірної порожнини.

За розрахунковим значенням висоти містка вибирають нормативний номер та решту розмірів канавки за таблицею 5.1. При цьому беруть менше табличне значення h_1 близьке до отриманого розрахунком.

Таблиця 5.1 – Розміри облойних канавок молотових штампів

Номер канавки	h_1, мм	h_2, мм	a, мм	B, мм	$S_к^*$, мм^2
1	0,6	3,0	6,0	18	52
2	0,8	3,0	6,0	20	69
3	1,0	3,0	7,0	22	80
4	1,6	3,5	8,0	22	102
5	2,0	4,0	9,0	25	136
6	3,0	5,0	10,0	28	201
7	4,0	6,0	11,0	30	268

Примітка. $^*S_к$ – площа поперечного перерізу канавки.

При відкритому штампуванні на КГШП на відміну від штампування на ПМП верхня і нижня половини штампа не дотикаються між собою у кінцевій стадії деформації заготовки і магазин облойної канавки буде відкритий (див. рис. 5.3, *б*).

Наближено висоту містка порівняно з молотовим штампом збільшують у два рази, тобто $h_1 = 2c\sqrt{F} = 0{,}03\sqrt{F}$, а потім за таблицею 5.2 вибирають інші параметри облойної канавки.

Таблиця 5.2 – Розміри облойних канавок пресових штампів

Номер канавки	h_1, мм	h_2, мм	b, мм
1	1,0–1,5	5,0	4,0–5,0
2	1,5–2,0	6,0	4,0–6,0
3	2,0–2,5	6,0	5,0–6,0
4	2,5–3,0	6–8	6
5	3,0–3,5	6–8	6
6	3,5–4,5	8	6,0–8,0
7	Більше 4,5	9–12	8,0–12

Відмінною особливістю об’ємного штампування у порівнянні з литтям виливків є те, що при деформуванні суцільної заготовки методом осаджування не можливо отримати наскрізний отвір, оскільки не можна повністю витиснути метал виступами рівчаків формотвірної порожнини, які називають прошивнями і між якими завжди залишається перемичка товщиною 3–5 мм, а отвір формується у вигляді конічних заглиблень, розділених цією перемичкою.

При відкритому штампуванні зовнішні поверхні поковки набувають форми зрізаних конусів зі спільною основою найбільших розмірів, а внутрішні поверхні навпаки формуються у вигляді зрізаних конусів, обернених меншою основою у бік перемички між прошивнями. Усі кутові спряження поверхонь заокруглюють радіусом 3–5 мм.

Конусність внутрішніх і зовнішніх поверхонь поковки різна і визначається нормалізованим рядом штампувальних нахилів, які для зовнішніх поверхонь рекомендуються в межах 2–3º, а для внутрішніх поверхонь 3–5º залежно від висоти конічної поверхні (чим більша висота, тим менша конусність).

У штампах для закритого штампування (рис. 5.4) формотвірна порожнина *1* розміщується лише в одній і, зазвичай, у нижній половині штампу *2*, яку називають матрицею. Інша половина виготовляється з рельєфною поверхнею на торці у вигляді стрижня *3* і називають її пуансоном. При наближенні обох половин штампа пуансон ще до початку деформації входить у напрямну (замкову) частину порожнини матриці з зазором 0,1–0,2 мм і утворює закритий простір, у якому попередньо розміщують осаджену заготовку. Розмір отвору замкової частини матриці призначають рівним найбільшому діаметру штампованої поковки. Така будова штампа запобігає витисканню метала з формотвірної порожнини у радіальному напрямку. Метал осадженої заготовки у кінцевій стадії штампування може витискатися лише вверх і вниз, заповнюючи усі важкодоступні ділянки формотвірної порожнини.

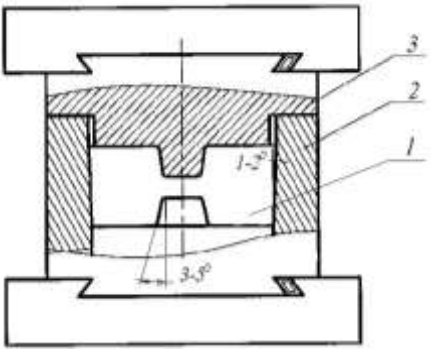


Рис. 5.4 – Конструкція молотового закритого штампа

При закритому штампуванні зовнішню поверхню заготовки виготовляють у вигляді зрізаного конуса з більшою основою, оберненою у бік торцевої поверхні пуансона, а внутрішні контури формують так само, як при відкритому штампуванні. Для видалення поковки з матриці в штампах закритого штампування використовують виштовхувачі. Це дещо ускладнює будову штампа, але дозволяє зменшити штампувальні нахили зовнішньої поверхні поковки до 1–3º.

Поковки, отримані гарячим об’ємним штампуванням, потім піддаються завершальним операціям їх виготовлення. До таких опера-

цій належать обрізання облою і прошивання наскрізних отворів спеціальним штампом на механічному малопотужному пресі, встановленому біля штампувального обладнання; термічна обробка (нормалізація або відпалювання) в полум'яних печах для зменшення внутрішніх напружень в тілі поковки для запобігання викривлення її форми; очищення від окалини у галтувальних барабанах або ваннах хімічного травлення.

Штамповані поковки, так само як виливки і ковані заготовки, відрізняються від готових деталей припусками на механічну обробку і технологічними напусками. Припуски залежать від заданої шорсткості обробленої поверхні, розмірів і складності поковки, способу штампування і виду штампувального обладнання. Рекомендовані значення однобічних припусків для осесиметричних деталей наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Припуски на обробку штампованих поковок

Розмір деталі, мм	Штампування на молоті		Штампування на пресі	
	відкрите	закрите	відкрите	закрите
До 50	1,5–2,5	1,0–2,0	1,0–2,0	1,0
51–100	3,0–4,0	2,5–3,5	2,5–3,0	1,5–2,0
101–200	4,5–5,0	3,6–4,5	3,5–4,5	2,5–3,0

До технологічних напусків належать штампувальні нахили, які зумовлюють конусоподібні поверхні поковки, перемички між прошивнями при штампуванні поковок з отвором, радіуси заокруглень, мінімально необхідний облой по периметру поковки у відкритому штампі, а також об'єми металу, передбачені для заповнення тих конструктивних елементів деталі, які практично неможливо або економічно недоцільно отримати штампуванням (отвори малого діаметра, вузькі канавки, западини зубчастих і шліцьових поверхонь тощо).

Штампувальні нахили (табл. 5.4) призначаються на вертикальні стінки поковки залежно від виду поверхні (внутрішня чи зовнішня), способу штампування і виду технологічного обладнання.

Таблиця 5.4 – Нахили вертикальних стінок штампованих поковок

Вид поверхні поковки	Штампування на молоті		Штампування на пресі	
	відкрите	закрите	відкрите	закрите
Зовнішня	3°	2°	2°	1°
Внутрішня	5°	3°	3°	2°

Витрати металу на облой при відкритому штампуванні на ППМ залежать від розмірів облойної канавки, які визначаються найбільшим діаметром штампованої поковки: $V_{обл} = \varphi \cdot S_к \cdot L_ц$, де φ = 0,3 –

коефіцієнт, що враховує оптимальний ступінь заповнення канавки металом; $S_к$ – площа канавки (вибирається за таблицею 5.1); $L_ц = 2\pi R_ц$; $R_ц$ – довжина кола радіусом центра ваги поперечного перерізу облою; радіус центра ваги поперечного перерізу облою, обчислюють як:

$$R_ц = \frac{\left(\frac{D_{n.\max} + a}{2}\right) h_1 a + \left(\frac{D_{n.\max} + \varphi \cdot b}{2} + a\right) \varphi \cdot h \cdot b}{\varphi \cdot S_к}.$$

Об'єм облою при штампуванні осесиметричних поковок на КГШП через відсутність магазину нормованої ширини (рис. 5.3, *б*) розраховують за виразом:

$$V_{обл} = \pi D_{n.\max} (bh_1 + h_2 B),$$

де $D_{n.\max}$ – найбільший діаметр поковки в площині рознімання штампів; b, h_1 – ширина і товщина містка, відповідно; $h_2 = 2h_1$ середня ширина облою в магазині канавки. Значення h_1 і b вибирають за таблицею 5.2. Для поковок масою до 0,5 кг приймають B = 10 мм; масою до 2 кг – B = 15 мм; масою більше 2 кг – B = 20 мм.

Креслення поковки виконують після аналізу поверхонь деталі, які згідно її робочого креслення піддаються механічній обробці, і вибору площини рознімання половин відкритого штампа або місця спряження пуансона та матриці закритого штампа. Потім тонкими лініями викреслюють контур деталі, показують раціональне розміщення площини рознімання половин відкритого штампа і розташування поверхні спряження пуансона та матриці закритого штампа, показують припуски на оброблювані поверхні деталі та конструктивні елементи деталі, які не отримують штампуванням, вибирають напрям та величину штампувальних нахилів, радіуси заокруглень кутових спряжень, перемичку між прошивнями. Контур поковки з урахуванням припусків і технологічних напусків обводять жирною лінією так, щоб контур деталі був вписаним у контур поковки.

Об'єм поковки розраховують так само, як і об'єм виливка з урахуванням припусків і напусків, умовно поділяючи тіло поковки на елементарні фігури, об'єми яких обчислюють за відомими формулами. Тіло поковки осесиметричної деталі переважно поділяють на конічні поверхні.

Об'єм вихідної циліндричної заготовки обчислюють як суму об'ємів поковки і технологічних відходів металу.

Для відкритого штампування $V_{в.з.} = V_п + V_{обл} + V_{угар}$, а для закритого штампування $V_{в.з.} = V_п + V_{угар}$. Витрати металу на угар при нагріванні розраховують так само, як при розрахунку заготовок для вільного кування, тобто $V_{угар}$ = (0,01…0,03) $V_п$ або 1 % при електричному нагріванні, 2 % – при полум'яному нагріванні спалюванням рідкого палива та 3 % – при спалюванні природного газу.

Розміри вихідної заготовки визначають за умови:

$$V_{в.з.} = \frac{\pi \cdot D_o^2 \cdot H_o}{4} = 0,785 D_o^2 \cdot H_o,$$

де D_o і H_o – відповідно, діаметр і висота циліндричної заготовки.

Діаметр заготовки D_o наближено приймають рівним 0,6–0,7 найбільшого діаметра поковки, а потім вибирають найближче значення з нормалізованого ряду розмірів сортового прокату.

Висоту заготовки розраховують за виразом:

$$H_o = \frac{4V_{в.з.}}{\pi D_o^2} = 1,27 \frac{V_{в.з.}}{D_o^2}.$$

Якщо задовольняється умова $1,2 < H_o / D_o < 2,5$, то вибір заготовки зроблено правильно. Якщо ж така умова не задовольняється, то приймають інше значення D_o і знаходять відповідну йому оптимальну висоту заготовки H_o, за умови $H_o / D_o = 1,8$.

Вихідну заготовку нагрівають і стискають гладкими плитами штампа з метою формування деформованої структури металу і збільшення її діаметра. Діаметр осадженої заготовки орієнтовно приймають рівним 0,85 $D_{n.\max}$.

Коефіцієнт використання матеріалу як показник ефективності технології, обчислюють за виразом:

$$КВМ = \left(\frac{V_д}{V_{в.з.}} \right) \cdot 100\ \%.$$

За розробленим кресленням (ескізом) поковки розробляють креслення (ескіз) формотвірної порожнини штампа, на якому у розрізі показують складені між собою верхню та нижню половини штампа у кінцевій стадії штампування. Розміри формотвірної порожнини виконують за «гарячими» розмірами поковки, тобто з урахуванням коефіцієнта температурного розширення: $D_ф = D_п(1 + \alpha \cdot t)$, де $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5}$ град$^{-1}$; t = 600 ºС – температура нагрівання штампа.

Послідовність виконання

За ескізом та розмірами заданої за варіантом (див. табл. 5.5) деталі потрібно:

1. Намалювати схеми будови формотвірних порожнин штампів для відкритого і закритого штампування поковки деталі.
2. Вибрати припуски і технологічні напуски, намалювати ескізи та визначити розміри поковок, виготовлених у відкритому та закритому штампах.
3. Обчислити об'єми поковок та визначити розміри вихідних заготовок для відкритого та закритого штампування.
4. Описати маршрутну технологію виготовлення поковок деталі відкритим і закритим штампуванням.
5. Визначити коефіцієнти використання металу та оцінити ефективність технологій відкритого і закритого штампування поковок деталі.

Методичні рекомендації

1. Задано ескіз (рис. 5.5, *а*) та розміри деталі: D = 150 мм; d_3 = 100 мм; $d_1 = d_2$ = 80 мм; $h_1 = h_2$ = 10 мм; H = 50 мм.

Матеріал деталі – сталь 55.

Способи штампування – відкритий та закритий.

Спосіб нагрівання – електроіндукційний, обладнання – кривошипний гарячештампувальний прес (КГШП).

Деталь (див. рис. 5.5, *а*) відноситься до групи низьких ($H / D < 1$) осесиметричних деталей з отвором, який доцільно передбачити у поковці ($d_1 > 30$ мм).

Штампування поковки для таких деталей доцільно виконати методом осаджування попередньо нагрітої заготовки з наступним деформуванням її у формотвірній порожнині відповідного штампа.

Зовнішня поверхня деталі гладка, а внутрішня – ступінчаста. Це зумовлює розміщення площини розніму половин відкритого штампа (див. рис. 5.5, *в*) і місце спряження пуансона та матриці закритого штампа (див. рис. 5.5, *д*). Тому необхідно передбачити технологічний напуск і спростити форму отвору, надавши йому гладкої циліндричної форми діаметром $d_1 = d_2$.

Поковка, виготовлена у ***відкритому*** штампі показана на рис. 5.5, *б*. Тіло поковки утворене двома зрізаними конусами з більшою спільною основою і має два конічні глухі отвори глибиною h_{n1} і h_{n2}, між меншими основами яких є перемичка металу товщиною z = 4 мм. По периметру поковки у площині рознімання половин штампа перед-

бачено облой. Штампувальні нахили вибрані за умови штампування на кривошипному гарячештампувальному пресі згідно з таблицею 5.4, а припуски на механічну обробку – таблицею 5.3.

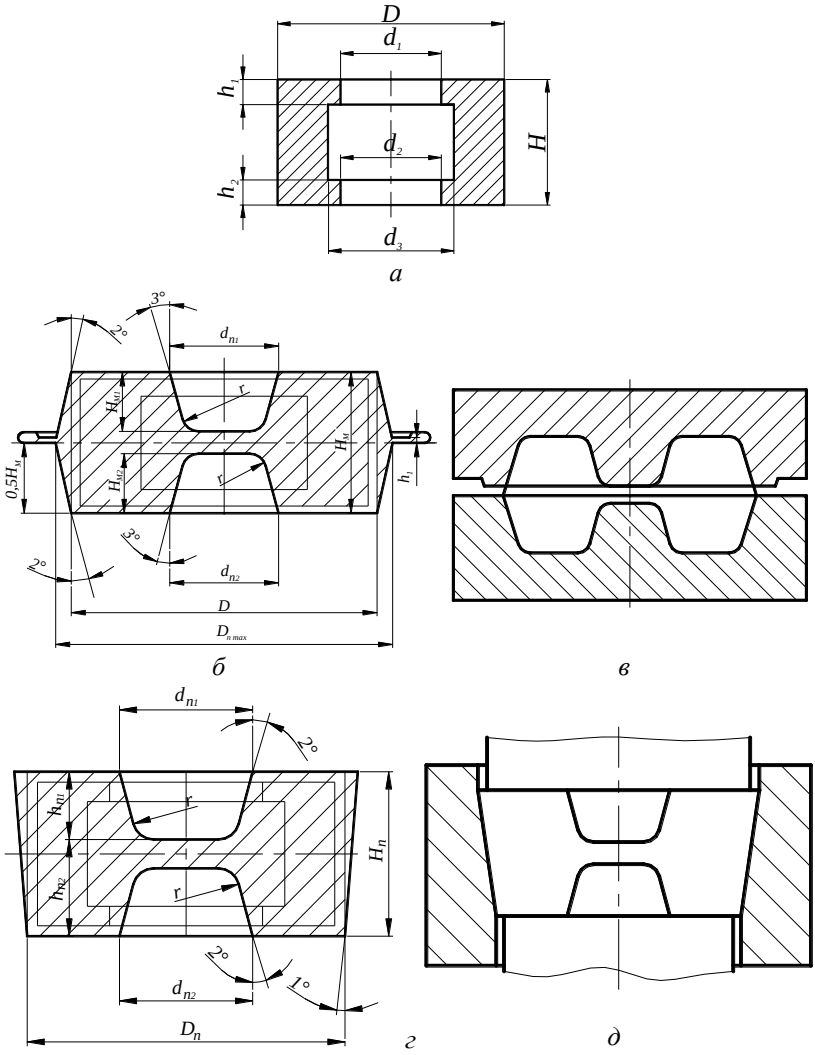


Рис. 5.5 – Деталь (*а*), поковки (*б, г*) формотвірні порожнини відкритого (*в*) і закритого (*д*) штампів

Розміри поковки з урахуванням припусків на механічну обробку:

$$D_n = D + 2Пр_D = 150 + 2 \cdot 4 = 158 \text{ мм};$$

$$d_{n1} = d_{n2} = d_1 - 2Пр_{d1} = 80 - 2 \cdot 3 = 74 \text{ мм};$$

$$H_n = H + 2 \cdot Пр_H = 50 + 2 \cdot 2 = 54 \text{ мм};$$

$$h_{n1} = h_{n2} = (H_n - z) / 2 = (54 - 4) / 2 = 25 \text{ мм};$$

$$D_{n.\max} = D_n + 2 (H_n / 2) \operatorname{tg} 2^\circ = 158 + 2 \cdot 27 \cdot 0{,}034 = 160 \text{ мм};$$

$$d_{n.\min} = d_{n1} - 2h_{n1} \cdot \operatorname{tg} 3^\circ = 74 - 2 \cdot 25 \cdot 0{,}052 = 71{,}4 \text{ мм}.$$

Об'єм поковки $V_n = 2 (V_1 - V_2)$,

де $V_1 = \dfrac{\pi H_n}{12 \cdot 2}\left(D^2_{n.\max} + D_{n.\max} \cdot D_n + D^2_n\right)$

$= 0{,}26 \cdot 27 (160^2 + 160 \cdot 158 + 158^2) = 532{,}42 \cdot 10^3$ мм^3;

$$V_2 = \frac{\pi h_{n1}}{12 \cdot 2}\left(d^2_{n1} + d_{n1} \cdot d_{n1\min} + d^2_{n1\min}\right) =$$

$= 0{,}26 \cdot 25 (74^2 + 74 \cdot 71{,}4 + 71{,}4^2) = 103{,}07 \cdot 10^3$ мм^3;

$V_n = 2 (532{,}42 - 103{,}07)\ 10^3 = 858 \cdot 10^3$ мм^3.

Маса поковки $M_n = V_n \cdot \gamma$, де $V_n = 858$ см^3; $\gamma = 7{,}85$ г/см^3.

$$M_n = 858 \cdot 7{,}85 = 6735 \text{ г} = 6{,}735 \text{ кг}.$$

Розміри облойної канавки (рис. 5.3, *б*) визначені за розрахунковим значенням висоти містка з виразу $h_1 = 2c\sqrt{F}$, де $c = 0{,}015$; $F = \dfrac{\pi D^2_{n.\max}}{4} = \dfrac{3{,}14 \cdot 160^2}{4} = 20096$ мм^2.

Висота містка $h_1 = 2 \cdot 0{,}015\ \sqrt{20096} = 4{,}24$ мм.

За розрахунковим значенням висоти h_1 містка згідно таблиці 5.2 якісному формоутворенню поковки відповідає облойна канавка № 6 шириною містка 6…8 мм і висотою магазина 8 мм. Для розрахунку об'єму облою прийнято наступні розміри: висота перемички в зоні містка $h_1 = 4$ мм; ширина перемички $b = 7$ мм; середня висота облою в зоні магазина канавки $h_2 = 2h_1 = 2 \cdot 4 = 8$ мм. З урахуванням маси поковки (більше 2 кг) ширина облою в магазині канавки $B = 20$ мм.

Об’єм облою:

$$V_{обл} = \pi D_{n.\max} (bh_1 + h_2 B) = 3{,}14 \cdot 160 (7 \cdot 4 + 8 \cdot 20) = 74{,}35 \cdot 10^3 \text{ мм}^3.$$

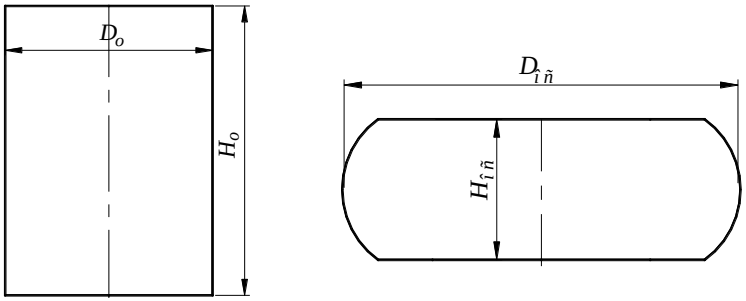
Втрати металу на угар при електричному нагріванні вихідної заготовки:

$$V_{угар} = 0{,}01\, V_n = 0{,}01 \cdot 858 \cdot 10^3 = 8{,}58 \times 10^3 \text{ мм}^3.$$

Об’єм вихідної заготовки для відкритого штампування:

$$V_{в.з.} = V_n + V_{обл} + V_{угар} = (858 + 74{,}35 + 8{,}58) \cdot 10^3 = 941 \cdot 10^3 \text{ мм}^3.$$

Розміри вихідної заготовки (рис. 5.6, *а*) вибирають з нормалізованого переліку сортового прокату круглого перерізу. Попередньо приймають діаметр вихідної заготовки $D_o = 0{,}6\, D_{n.\max} = 0{,}6 \cdot 160 = 96$ мм. Отримане значення округлюють до розміру нормалізованого ряду – 90 мм.



а *б*

Рис. 5.6 – Вихідна (*а*) та осаджена (*б*) заготовка для відкритого та закритого штампування

Висоту заготовки визначають за умови рівності об’ємів:

$$H_0 = \frac{4V_{вз}}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 941 \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot 90^2} = 148 \text{ мм}.$$

Відношення $H_0 / D_0 = 148 / 90 = 1{,}64$ задовольняє умову якісного нарізання і осаджування, оскільки $1{,}2 < H_0 / D_0 < 2 \ldots 5$.

Діаметр осадженої заготовки (див. рис. 5.6, *б*):

$$D_{oc} = 0{,}85\, D_{n.\max} = 0{,}85 \cdot 160 = 136 \text{ мм}.$$

Висота осадженої заготовки:

$$H_{ос} = \frac{4V_{вз}}{\pi D_{ос}^2} = \frac{4 \cdot 941 \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot 136^2} = 65 \text{ мм}.$$

Будова формотвірної порожнини відкритого штампа показана на рис. 5.5, *в*.

Коефіцієнт використання металу при відкритому штампуванні:

$$КВМ = \frac{V_д}{V_{вз}} 100 = \frac{547{,}4 \cdot 10^3}{941 \cdot 10^3} 100 = 58{,}2 \text{ %}.$$

Маршрутна технологія виготовлення відкритого штампування передбачає послідовне виконання наступних операцій:

1. Відрізання на прес-ножицях мірних заготовок довжиною 148 мм від прутка діаметром 90 мм.

2. Нагрівання заготовок в електричному індукторі високочастотного генератора до температури 1000–1050 ºС.

3. Осаджування нагрітої заготовки в штампі на кривошипному гарячештампувальному пресі (КГШП) на 83 мм.

4. Штампування у відкритому штампі на КГШП.

5. Обрізання облою і прошивання отвору діаметром 72 мм на кривошипному обрізному пресі.

6. Нормалізація поковки після нагрівання до 780…800 ºС у печі термічної обробки.

7. Очищення від окалини травленням у ванні з водним розчином сірчаної кислоти при температурі 40–60 ºС.

Поковка деталі, виготовлена у ***закритому*** штампі, показана на рис. 5.5, *г*. Зовнішня поверхня поковки являє собою зрізаний конус з більшою верхньою основою, а внутрішня поверхня не відрізняється від такої ж поверхні поковки, виготовленої у відкритому штампі. Штампувальні нахили вибрані за умови штампування у закритому штампі на кривошипному гарячештампувальному пресі за таблицею 5.4, а припуски на механічну обробку – згідно з таблицею 5.3.

Розміри поковки з урахуванням припусків на механічну обробку:

$$D_п = D + 2\,Пр_D = 150 + 2 \cdot 3 = 156 \text{ мм};$$

$$d_{п1} = d_{п2} = d_1 - 2Пр_{d1} = 80 - 2 \cdot 2 = 76 \text{ мм};$$

$$H_п = H + 2 \cdot Пр_H = 50 + 2 \cdot 1 = 52 \text{ мм};$$

$$h_{п1} = h_{п2} = (H_п - z) / 2 = (52 - 4) / 2 = 24 \text{ мм};$$

$$D_{п.\max} = D_п + 2H_п \text{ tg } 1^o = 156 + 2 \cdot 24 \cdot 0{,}017 = 157{,}8 \text{ мм};$$

$$d_{п.\min} = d_{п1} - 2h_{п1} \cdot \text{tg } 2^o = 74 - 2 \cdot 25 \cdot 0{,}034 = 74{,}4 \text{ мм}.$$

Для розрахунку прийнято: $D_{n.\max} = 158$ мм; $d_{n.\min} = 75$ мм.

Об'єм поковки:

$$V_n = V_1 - 2V_2,$$

де $V_1 = \frac{\pi H_n}{12}\left(D_{n.\max}^2 + D_{n.\max} \cdot D_n + D_n^2\right) =$

$= 0{,}26 \cdot 52(158^2 + 158 \cdot 156 + 156^2) = 999{,}77 \cdot 10^3$ мм^3;

$$V_2 = \frac{\pi h_{n1}}{12}\left(d_{n1}^2 + d_{n1} \cdot d_{n1min} + d_{n1min}^2\right) =$$

$= 0{,}26 \cdot 24\,(76^2 + 76 \cdot 75 + 75^2) = 106{,}7 \cdot 10^3$ мм^3;

$V_n = (999{,}77 - 2 \cdot 106{,}7)\,10^3 = 786{,}37 \cdot 10^3$ мм^3.

Втрати металу на угар при електричному нагріванні вихідної заготовки: $V_{угар} = 0{,}01\,V_n = 0{,}01 \cdot 786{,}37 \cdot 10^3 = 7{,}86 \cdot 10^3$ мм^3.

Об'єм вихідної заготовки для закритого штампування:

$V_{в.з.} = V_n + V_{угар}$, $= (786{,}37 + 7{,}86) \cdot 10^3 = 794{,}23 \cdot 10^3$ мм^3.

Розміри вихідної заготовки (див. рис. 5.6, *а*) вибирають з нормалізованого ряду сортового прокату круглого перерізу.

Попередньо приймають діаметр вихідної заготовки

$$D_o = 0{,}6\,D_{n.\max} = 0{,}6 \cdot 158 = 94{,}8 \text{ мм}.$$

Отримане значення округлюють до розмірів нормалізованого ряду 90 мм.

Висоту заготовки визначають за умови рівності об'ємів:

$$H_0 = \frac{4V_{вз}}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 794{,}23 \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot 90^2} = 115 \text{ мм}.$$

Відношення $H_0 / D_0 = 115 / 90 = 1{,}28$ задовольняє умові якісного осаджування, оскільки $H_0 / D_0 < 2{,}5$, але може призвести до викривлення торців заготовки при відрізанні її від прутка на пресножицях. Тому доцільно вибрати заготовку меншого діаметра, наприклад, взяти $D_0 = 80$ мм. Висота такої заготовки:

$$H_0 = \frac{4V_{вз}}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 794{,}23 \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot 80^2} = 158 \text{ мм}.$$

Відношення $H_0 / D_0 = 158 / 80 = 1{,}97$ задовольняє умові якісного відрізання і осаджування, оскільки $1{,}2 < H_0 / D_0 < 2{,}5$.

Діаметр осадженої заготовки (див. рис. 5.6, *б*):

$$D_{ос} = 0{,}85\ D_{п.\max} = 0{,}85 \cdot 158 = 134 \text{ мм}.$$

Висота осадженої заготовки:

$$H_{ос} = \frac{4V_{вз}}{\pi D_{ос}^2} = \frac{4 \cdot 794{,}23 \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot 134^2} = 56 \text{мм}.$$

Будова порожнини закритого штампа показана на рис. 5.5, *д*.

Коефіцієнт використання металу при закритому штампуванні:

$$КВМ = \frac{V_д}{V_{вз}} 100 = \frac{547{,}4 \cdot 10^3}{794{,}23 \cdot 10^3} 100 = 68{,}9\ \%.$$

Маршрутна технологія закритого штампування передбачає послідовне виконання наступних операцій:

1. Відрізання на прес-ножицях мірних заготовок довжиною 158 мм від прутка діаметром 80 мм.

2. Нагрівання заготовок в електричному індукторі високочастотного генератора до температури 1000–1050 ºС.

3. Осаджування нагрітої заготовки в штампі КГШП до висоти 83 мм.

4. Штампування у закритому штампі на КГШП.

5. Прошивання отвору діаметром 72 мм на обрізному пресі.

6. Нормалізація поковки після нагрівання до 780–800 ºС у печі термічної обробки.

7. Очищення від окалини травленням у ванні з водним розчином сірчаної кислоти при температурі 40–60 ºС.

Порівнюючи з литою заготовкою для заданої деталі коефіцієнт використання металу при відкритому штампуванні менше на 12 %, а при штампуванні у закритому штампі – на 1,3 %. Це зумовлено тим, що розширений у середньому перерізі ступінчастий отвір деталі погіршує її технологічність для об'ємного штампування і вимагає вагомого напуску.

Оптимальним варіантом технології виготовлення фасонної заготовки деталі з огляду на економію металу є лиття в кокіль, що забезпечує коефіцієнт використання металу 83,9 %. Однак об'ємне штампування поліпшує кристалічну будову пластично-деформованого металу і приводить до підвищення його механічних та експлуатаційних властивостей.

Таблиця 5.5 – Варіанти завдань для самостійного виконання

Варіант	Ескіз деталі	Матеріал деталі	Спосіб нагрівання	Обладнання
1	А	Сталь 10	Електроіндукційний	КГШП
2	Б	Сталь 20	Природним газом	ППМ
3	В	Сталь 30	Електроіндукційний	КГШП
4	Г	Сталь 40	Природним газом	ППМ
5	Д	Сталь 50	Електроіндукційний	КГШП
6	Е	Сталь 25	Природним газом	ППМ
7	Ж	Сталь 35	Електроіндукційний	КГШП
8	К	Сталь 45	Природним газом	ППМ
9	Л	Сталь У8	Електроіндукційний	КГШП
10	М	Сталь У10	Природним газом	ППМ
11	А	Сталь 50	Електроіндукційний	КГШП
12	Б	Сталь 25	Природним газом	ППМ
13	В	Сталь 35	Електроіндукційний	КГШП
14	Г	Сталь 25	Природним газом	ППМ
15	Д	Сталь 45	Електроіндукційний	КГШП
16	Е	Сталь У8	Природним газом	ППМ
17	Ж	Сталь У10	Електроіндукційний	КГШП
18	К	Сталь 10	Природним газом	ППМ
19	Л	Сталь 20	Електроіндукційний	КГШП
20	М	Сталь 30	Природним газом	ППМ
21	А	Сталь 40	Електроіндукційний	КГШП
22	Б	Сталь 30	Природним газом	ППМ
23	В	Сталь 40	Електроіндукційний	КГШП
24	Г	Сталь 50	Природним газом	ППМ
25	Д	Сталь 25	Електроіндукційний	КГШП
26	Е	Сталь 35	Природним газом	ППМ
27	Ж	Сталь 45	Електроіндукційний	КГШП
28	К	Сталь У8	Природним газом	ППМ
29	Л	Сталь У10	Електроіндукційний	КГШП
30	М	Сталь 50	Природним газом	ППМ

Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Обладнання, інструменти, матеріали.
3. Ескіз деталі індивідуального завдання.

4. Ескізи поковок, виготовлених у відкритому та закритому штампі.

5. Ескіз формотвірних порожнин штампів.

6. Технологія формоутворення і виготовлення поковок.

7. Результати проміжних розрахунків.

8. Висновки.

Контрольні питання

1. В чому полягає сутність об’ємного штампування?

2. Чим відрізняються поковки від готових деталей?

3. Що таке припуски на механічному обробку, конструктивні і технологічні напуски?

4. В чому особливості відкритого штампування, які його переваги і недоліки?

5. Яку роль відіграє облойна канавка? З яких елементів вона складається?

6. В чому особливості закритого штампування, які його переваги і недоліки?

7. Які основні принципи проєктування поковок?

8. Як визначають об’єм та розміри вихідних заготовок для відкритого та закритого штампування?

9. З яких операцій складається технологічний процес об’ємного штампування? В якій послідовності їх виконують?

***Література*: [1**, с. 35–41, 45–47; **3**, с. 74–83; **4**, с. 14–17; **5**, с. 55–70]

Лабораторна робота 6

Технологія листового штампування

***Мета*:** опанувати методику проєктування і розрахунку технології листового штампування заготовок плоских і просторових виробів з металевої стрічки; набути практичних навичок при штампуванні листового матеріалу.

Матеріали, обладнання, прилади: прес механічний ексцентриковий, штамп послідовної дії, металева стрічка, зразки відштампованих деталей і відходів.

Короткі теоретичні відомості

Листовим штампуванням виготовляють плоскі і просторові деталі або заготовки (у подальшому вироби) з листа, металевої стрічки на швидкохідних механічних пресах, використовуючи спеціальні штампи простої, послідовної, сумісної та комбінованої дії. Технологічний процес листового штампування складається з окремих операцій, які за способом деформації заготовки поділяють на роздільні та формозмінювальні.

До перших належать ***відрізання*** – відокремлення частини заготовки по незамкнутому контуру; ***вирубання*** – відокремлення частини заготовки по замкнутому контуру і відокремлена частина є потрібним виробом, залишена – відходом матеріалу; ***пробивання*** – відокремлення по замкнутому контуру, але відокремлена частина є відходом, а залишена – потрібним виробом. Відрізанням і вирубанням отримують зовнішні контури виробу, а пробиванням – внутрішні контури отвору у виробі. Ці операції застосовують для штампування плоских деталей будь-якого контуру і виготовлення заготовок для просторових виробів.

До основних формозмінювальних операцій, які уможливлюють виготовлення просторових деталей, що мають циліндричні, конічні та інші поверхні, розміщені під різними кутами або радіусами заокруглень, відносять ***гнуття*** – формування елементів виробу під різними кутами або радіусами заокруглень; ***витягування*** – формування з плоскої заготовки порожнистих виробів з дном; ***відбортовування*** – формування вертикальних стінок по контуру попередньо пробитих отворів або по зовнішньому контуру виробу.

Штампи простої дії виконують лише одну операцію за робочий хід повзуна преса і їх зазвичай застосовують для штампування виробів великих розмірів з мірної заготовки, відрізаної з металевого листа.

Вироби розмірами до 300 мм отримують з металевої стрічки штампами послідовної, сумісної або комбінованої дії, які за один робочий хід повзуна преса виконують дві та більше операцій по ходу подачі заготовки (штампи послідовної дії) або по ходу повзуна преса (штампи сумісної дії). У штампах комбінованої дії перші операції пробивання виконують за принципом послідовного штампування, а формозмінювальні операції, наприклад, витягування або відбортовування і вирубання по контуру – за принципом сумісного виконання.

Штампи для листового штампування різного принципу дії складаються з базових, напрямних, фіксуючих, робочих та кріпильних деталей. До робочих деталей належать пуансони та матриці, які відповідно кріпляться до верхньої рухомої та нижньої нерухомої плит штампа. Плити з'єднані між собою з можливістю відносного руху напрямними колонками та втулками. Фіксуючі деталі забезпечують задане положення заготовки у робочій зоні штампа при виконанні технологічної операції і визначений крок подачі заготовки у штампах послідовної та комбінованої дії. До таких деталей належать фіксатори, упори та напрямні планки.

Будова штампа послідовної дії з грибковим та разовим упорами для вирубання виробу з отвором показана на рис. 6.1.

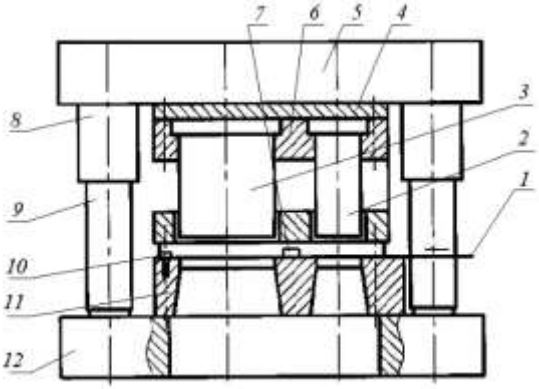


Рис. 6.1 – Будова штампа послідовної дії

Цей штамп конструктивно виготовлений так, що спочатку по ходу подачі вихідної заготовки *1* у вигляді стрічки листового металу розміщені пуансон *2* і отвір матриці для пробивання отвору, а потім на відстані кроку подачі пуансон *3* і отвір матриці для вирубання зовнішнього контуру виробу. Обидва пуансони опираються на загартовану

прокладку *4* і кріпляться до верхньої плити *5* штампа пуансонотримачем *6*. Матриця *11* з отворами для пробивання і вирубання кріпиться до нижньої плити штампа *12*, у якій передбачено провальний отвір для вільного випадання штампованих виробів і відходів пробивання отвору у виробах. Точність збігання осей відповідних пуансонів та отворів матриці забезпечують напрямні втулки *8* та колонки *9*, запресовані відповідно у верхню та нижню плити штампа.

Зверху матриці кріпляться напрямні планки, між якими подається стрічка штампованого матеріалу, жорсткий знімач стрічки з пуансонів після вирубання контуру виробу і пробивання у ньому отвору, а також нерухомий грибковий *10* і рухомий разовий *7* упори для фіксації кроку подачі стрічки.

Стрічковий штампований матеріал подають на поверхню матриці (див. рис. 6.2) між напрямними планками до разового упора, після чого виконується перший робочий хід повзуна преса, під час якого пробивається отвір. Коли повзун рухається догори, стрічка знімається з пробивного пуансона, разовий упор виходить із робочої зони штампа, і стрічку просувають уперед до грибкового упора. Під час другого робочого ходу повзуна преса здійснюється вирубування контуру першого виробу та одночасне пробивання отвору для наступного. На третьому ході повзуна стрічку подають далі за напрямком подачі доти, доки контур вирубки першого виробу не упреться у грибковий упор, а отвір другого виробу не займе позицію вирубування. Під час наступних ходів повзуна преса цей технологічний цикл повторюється.

Розробку технологічного процесу листового штампування ***плоских*** виробів з металевої стрічки або стрічки за умови застосування штампів послідовної або комбінованої дії починають з вибору оптимального розкрою стрічки з огляду на економію металу і надійну роботу штампа. Штамповані вироби можна розмістити послідовно в один або декілька рядів, впритул одна до іншої або з технологічно необхідними перемичками, у шаховому порядку з зсувом одного ряду відносно іншого або нахилом контурів тощо. Спосіб розкладки виробів у стрічці у кожному конкретному випадку залежить від контуру вирубання і повинен забезпечити виготовлення найбільшої кількості виробів з стрічки заданої довжини і мінімальної ширини.

Якщо контур виробу криволінійний або утворений кутовим спряженням прямих ліній, то між сусідніми контурами необхідно передбачити невеликі перемички, а між контуром виробу і краєм стрічки – вузькі кромки, оскільки в разі їх відсутності в місці дотикання контурів вирубання і краєм стрічки утворюються гострі відходи, які попадають у зазор між пуансоном і матрицею і призводять до їх заклинення і виходу з ладу штампа.

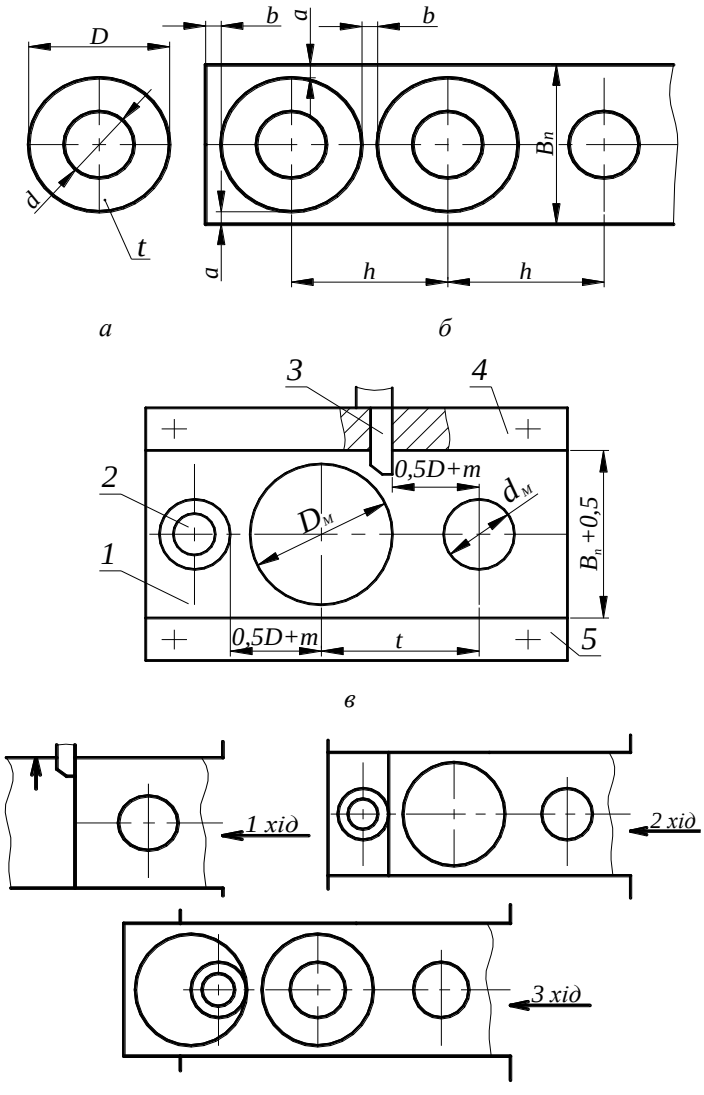


Рис. 6.2 – Ескіз деталі (*а*), розкрій стрічки (*б*), робоча зона штампа (*в*), послідовність операцій штампування деталі (*г*)

Розміри кромок і перемичок залежать від товщини стрічки та форми контуру вирубання. Рекомендовані значення кромок та переми-

чок наведено у таблиці 6.1 і повинні враховуватися при визначенні мінімально необхідної ширини стрічки і кроку її подачі за кожний хід повзуна преса. При вирубанні круглих контурів ширину кромок приймають рівною ширині перемичок.

Таблиця 6.1 – Перемички і кромки між контурами вирубання та краєм стрічки для листового штампування (мм)

Товщина стрічки *s*	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Ширини перемички *a*	1,3	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0	2,3	2,6
Ширина кромки *b*	1,5	1,6	1,7	1,8	2,1	2,4	2,6	2,9

Ширина стрічки і кількість виробів, які можна отримати зі стрічки даної довжини, залежать від форми та розмірів виробу і від способу фіксації кроку подачі стрічки у робочій зоні штампа за кожний хід повзуна преса. Для фіксації кроку подачі стрічки в штампах послідовної та комбінованої дії використовують грибкові та разові упори і крокові ножі.

Ширину стрічки при вирубанні криволінійних контурів та контурів з кутовими спряженнями, розташованими перпендикулярно напряму подачі стрічки в штампах з грибковим та разовим упорами, розраховують відповідно за виразом $B_c = D + 2b$ для круглого отвору і $B_c = H + 2b$, де D – діаметр круглого контуру; H – найбільший розмір контуру з кутовим спряженням, розташованим перпендикулярно напряму подачі стрічки; b – рекомендована згідно таблиці 6.1 ширина кромки. При використанні штампів з кроковим ножем ширину стрічки збільшують на ширину ножа $c = (1{,}5…2)\,s$, тобто $B_c = D + 2b + c$ або $B_c = H + 2b + c$.

Крок подачі стрічки практично не залежить від способу його фіксації і визначається за виразом $k = D + a$ для круглих контурів і $k = X + a$ для контурів з кутовими спряженнями, розташованими у напряму подачі, де D – діаметр круглого контуру; X – найбільший розмір контуру з кутовим спряженням, розташованим у напряму по-дачі стрічки; a – рекомендована згідно таблиці 6.1 ширина перемички між контурами вирубання.

Кількість виробів $n_в$ (ціле число), яку можна виготовити з стрічки заданої довжини L використовуючи штамп послідовної дії з грибковим упором, обчислюють за виразом $L / k - n_п = n_в + \Delta n_в$, де $n_п$ – кількість робочих позицій, на яких виконуються технологічні операції, що передують вирубанню контуру виробу, оскільки перші вироби не будуть мати, наприклад, отворів, отриманих попередніми операціями

пробивання; $\Delta n_в$ – відходи за некратністю в частках кроку подачі. Використання штампів з разовими упорами, кількість яких відповідає кількості робочих позицій, на яких виконуються технологічні операції, що передують вирубанню контуру виробу, дозволяє виготовити кількість виробів $L_c / k = n_в + \Delta n_в$. Таку ж кількість виробів отримують і в штампі з кроковим ножем, однак для цього необхідна ширша стрічка.

Будова штампа комбінованої дії для витягування просторового виробу циліндричної форми з отвором у дні показана на рис. 6.3.

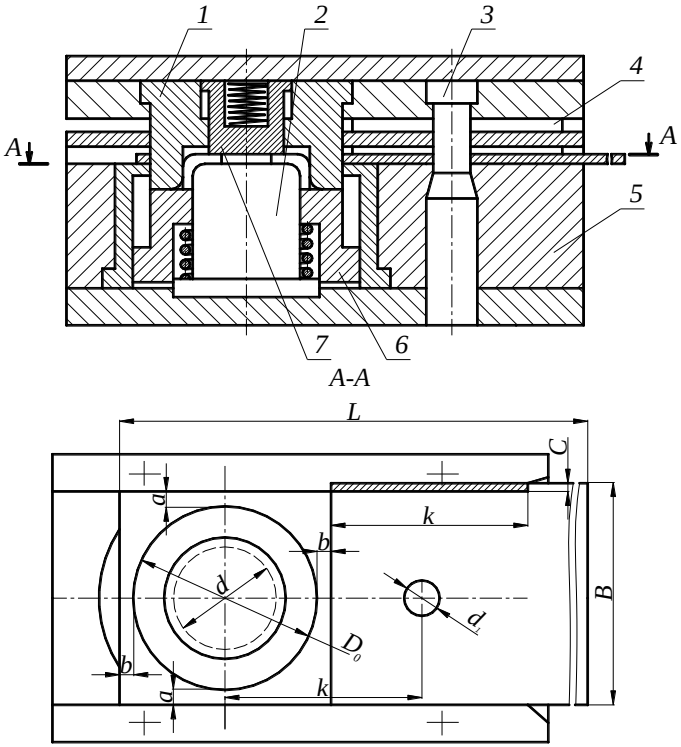


Рис. 6.3 – Штамп комбінованої дії для витягування просторової деталі з отвором у дні

Якість плоских виробів, які отримують внаслідок роздільної операції листового штампування, багато в чому залежить від розмірів пуансона та матриці, а також від технологічного зазору z між ними, який залежить від товщини s матеріалу виробу і приймається в межах $(0{,}1\ldots0{,}15)s$. При вирубанні розміри матриці приймають рівними роз-

мірам зовнішнього контуру виробу, а розміри пуансона повинні бути менші на $2z$, тобто для вирубання, наприклад, круглого контуру діаметром D діаметр матриці $D_м = D$, а діаметр пуансона $D_п = D - 2z$. При пробиванні отвору, навпаки, розмір пуансона приймають рівним розміру отвору, а розмір матриці збільшують на $2z$, тобто для пробивання отвору, наприклад, діаметром d діаметр пуансона $d_п = d$, а діаметр матриці $d_м = d + 2z$. За таких розмірів на контурах виробу відсутні задирки, а тріщини, які передують розділенню матеріалу, зосереджені у відході матеріалу – при вирубанні на зовнішньому контурі, а при пробиванні – на внутрішньому контурі виробу.

Вихідним матеріалом для листового штампування зазвичай використовують сталевий тонколистовий холоднокатаний прокат у вигляді прямокутних листів, розміри яких регламентовані відповідними стандартами. Листи прокату довжиною $L_л$ і шириною $B_л$ розрізають на гільйотинних ножицях на окремі стрічки як вздовж більшої, так і вздовж меншої сторони листа. Оскільки ширина і довжина листа не завжди є кратною розрахунковій ширині стрічки, то залишаються відходи у вигляді стрічок меншої ширини, які не придатні для штампування даного виробу.

При розрізанні листа вздовж довшої сторони кількість стрічок потрібної ширини розраховують за умови $B_л / B_c = n_c + \Delta n_c$, де $B_л$ – ширина листа; B_c – розрахована ширина стрічки; n_c – кількість стрічок потрібної ширини (ціле число); Δn_c – відходи листа за некратністю в частках ширини стрічки потрібних розмірів, що залишаються у вигляді стрічки шириною $B_в = \Delta n_c B_c = B_л - n_c B_c$.

При розрізанні листа вздовж меншої сторони кількість стрічок потрібної ширини розраховують за умови $L_л / B_c = n_c + \Delta n_c$, де $L_л$ – довжина листа; B_c – розрахована ширина стрічки; n_c – кількість стрічк потрібної ширини (ціле число); Δn_c – відходи листа за некратністю в частках ширини стрічки потрібних розмірів, що залишаються у вигляді стрічки шириною $B_в = \Delta n_c B_c = L_л - n_c B_c$. Загальна кількість виробів, яку можна отримати з металевого листа відомих розмірів $N_в = n_c \cdot n_в$.

Коефіцієнт використання матеріалу листа $KBM = \dfrac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л} \cdot 100\ \%$.

Листи вибраних розмірів розрізають на стрічки так, щоб з даного листа можна було отримати найбільшу кількість штампованих виробів і максимально використати його площу.

Наступним етапом розробки технологічного процесу листового штампування є енергетичні розрахунки роздільних та формозмі-

нювальних операцій формоутворення даного виробу з метою вибору потрібного преса.

Номінальне зусилля (кН) для розділювальної операції (відрізання, вирубання, пробивання) визначають за формулою:

$$P_p = \frac{L_p \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000},$$

де L_p – периметр контуру розрізання, мм; s – товщина листового матеріалу, мм; $\sigma_{зр}$ – опір різанню листового матеріалу, МПа.

Технологічне зусилля розділювальної операції:

$$P = k\,P_p + P_{пр} + P_{зн},$$

де $k = 1{,}25$ – коефіцієнт, що враховує притуплення гострих кромок пуансона та матриці; $P_{пр} = (0{,}05\ldots0{,}1)\,P_p$ і $P_{зн} = (0{,}2\ldots0{,}3)\,P_p$ – зусилля, відповідно необхідні для проштовхування відокремленого виробу та відходу пробивання отвору через отвір матриці і проштовхування пуансона через отвір контуру розділення у заготовці, що рівнозначно зусиллю знімання виробу чи заготовки з пуансона.

Розробка технологічного процесу штампування ***просторових*** виробів передусім передбачає розрахунок форми та розмірів плоскої заготовки, з якої потім пластичною деформацією формується просторовий виріб заданої форми та розмірів. Розрахунок ґрунтується на рівності площі плоскої заготовки повній поверхні просторового виробу за припущенням, що товщина листового матеріалу в процесі деформації не змінюється. Так, наприклад, для витягування циліндричного виробу з дном використовують круглі плоскі заготовки. Якщо відомі діаметр d і висота h виробу циліндричної форми з дном і нехтувати радіусом заокруглення в місці спряження стінки і дна виробу, то для його витягування потрібна плоска заготовка діаметром $D_o = \sqrt{d\left(d + 4h\right)}$. За розмірами заготовки потім визначають необхідну ширину стрічки і крок подачі стрічки в робочу зону штампа за кожний хід повзуна преса подібно до того, як це виконують у разі штампування плоских виробів. Аналогічно обчислюють коефіцієнт використання матеріалу листа і вибирають оптимальний варіант його розрізання на стрічки потрібної ширини.

Важливим технологічним критерієм штампування просторових циліндричних виробів з дном є коефіцієнт витягування $k = d / D_o$ який показує можливість формування виробу без обривання дна за одну операцію за умови притискання заготовки. Витягування за одну

операцію можливе, якщо $k > 0{,}5$. При значеннях $k < 0{,}5$ виріб витягують у декілька переходів.

Зусилля (кН) витягування циліндричних деталей з фланцем або без фланця і без притискання заготовки наближено розраховують за формулою $P = \dfrac{\pi \cdot d \cdot s \cdot \sigma_в \cdot K}{1000}$, а з притисканням заготовки $P_{пр} = P + Q$, де d – діаметр виробу, який витягується на цій операції, мм; s – товщина матеріалу, мм; $\sigma_в$ – границя міцності матеріалу виробу при розриванні, МПа; K – враховує відношення d / D_o і визначається за таблицею 6.2.

Таблиця 6.2 – Значення коефіцієнта *K* для розрахунку зусилля витягування циліндричних виробів з плоскої заготовки

d/D_o	0,55	0,57	0,60	0,62	0,65	0,67	0,70	0,72	0,75	0,77	0,8
K	1,0	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40

Сила притискання на першій операції витягування циліндричного виробу з плоскої заготовки:

$$Q = \frac{\pi}{4}\left[D_o^2 - (d + 2r_м)^2\right]\frac{q}{1000}, \text{ кН},$$

де $r_м$ – радіус заокруглення отвору матриці, мм; q – тиск притискання, МПа (для м'яких сталей при $s < 0{,}5$ мм, q = 2,5–3,0 МПа, при $s > 0{,}5$ мм q = 2,0–2,5 МПа).

Необхідне для штампування виробу номінальне зусилля преса розраховують як суму технологічних зусиль усіх операцій формоутворення виробу, які штамп виконує одночасно.

Послідовність виконання

За ескізом заданої деталі (табл. 6.3) потрібно виконати такі дії:

1. Обґрунтувати вибір і послідовність виконання технологічних операцій і намалювати розрахункову схему розкрою стрічки для штампування деталі з урахуванням принципу дії даного штампа.

2. Обґрунтувати вибір величини технологічних кромок та перемички між контурами вирубання, обчислити ширину стрічки та крок її подачі в робочу зону штампа за робочий хід повзуна преса.

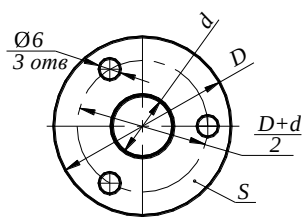
3. Показати на рисунках положення стрічки у робочій зоні штампа після першого і наступних ходів повзуна преса до виходу стрічки за межі робочої зони заданого штампа.

Таблиця 6.3 – Варіанти завдань для самостійного виконання

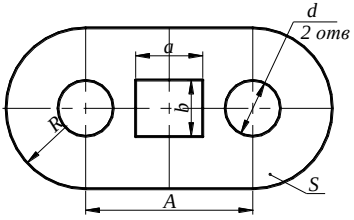
Вихідні дані				Розмір деталі, мм										
Варіант	Ескіз деталі	Тип штампу	Матеріал деталі	*D*	*d*	d_1	*R*	*A*	*B*	*a*	*b*	*H*	*s*
1	А	Г	Сталь 10	95	50	–	–	–	–	–	–	–	1,5
2	Б	Р	АМц	–	10	–	25	50	–	20	20	–	1,0
3	В	К	Л90	–	10	–	25	60	–	20	20	–	0,8
4	Г	Г	Сталь 20	90	–	–	–	–	–	40	40	–	1,5
5	Д	Р	АМг	–	–	–	10	60	30	40	20	–	2,0
6	Е	К	Л68	95	60	–	–	–	–	–	–	30	3,0
7	Ж	Г	Ст3	95	80	20	–	–	–	–	–	30	1,5
8	К	Р	А5	95	20	–	–	–	–	–	–	10	2,0
9	Л	К	ЛС59-1	–	–	–	–	60	30	–	–	–	0,5
10	М	Г	Ст3кп	–	–	–	–	60	40	–	–	–	0,8
11	А	Р	Сталь 10	80	40	–	–	–	–	–	–	–	1,5
12	Б	К	АМц	–	8	–	20	40	–	25	25	–	1,0
13	В	Г	Л90	–	8	–	20	50	–	25	25	–	0,8
14	Г	Р	Сталь 20	85	–	–	–	–	–	45	45	–	1,5
15	Д	К	АМг	–	–	–	12	50	30	45	25	–	2,0
16	Е	Г	Л68	85	50	–	–	–	–	–	–	35	3,0
17	Ж	Р	Ст3	85	70	30	–	–	–	–	–	35	1,5
18	К	К	А5	85	15	–	–	–	–	–	–	15	2,0
19	Л	Г	ЛС59-1	–	–	–	–	50	30	–	–	–	0,5
20	М	Р	Ст3кп	–	–	–	–	50	40	–	–	–	0,8
21	А	К	Сталь 10	95	50	–	–	–	–	–	–	–	1,5
22	Б	Г	АМц	–	10	–	25	50	–	20	20	–	1,0
23	В	Р	Л90	–	10	–	25	60	–	20	20	–	0,8
24	Г	К	Сталь 20	90	–	–	–	–	–	40	40	–	1,5
25	Д	Г	АМг	–	–	–	10	60	30	40	20	–	2,0
26	Е	Р	Л68	95	60	–	–	–	–	–	–	30	3,0
27	Ж	К	Ст3	95	80	20	–	–	–	–	–	30	1,5
28	К	Г	А5	95	20	–	–	–	–	–	–	10	2,0
29	Л	Р	ЛС59-1	–	–	–	–	60	30	–	–	–	0,5
30	М	К	Ст3кп	–	–	–	–	60	40	–	–	–	0,8

Позначення штампа: Г – з грибковим упором; Р – з разовим упором; К – з кроковим ножем.

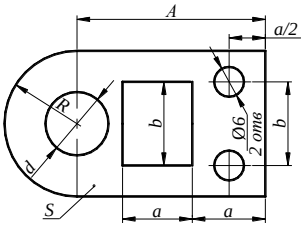
Ескізи деталей для листового штампування



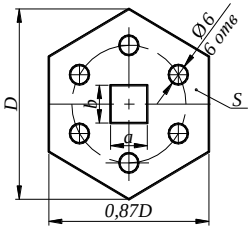
а



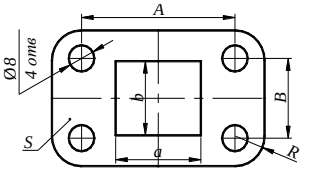
б



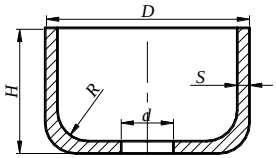
в



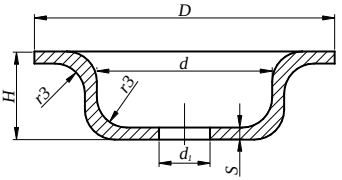
г



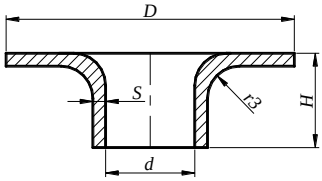
д



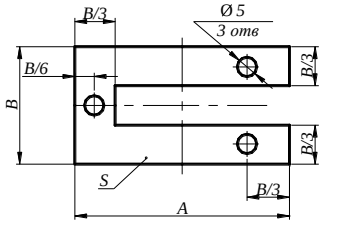
е



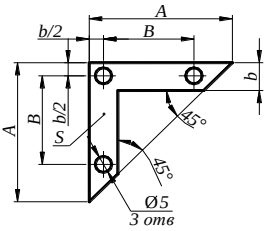
ж



к



л



м

4. Визначити номінальні розміри пуансонів та матриць для роздільних операцій штампування даної деталі.

5. Обґрунтувати з огляду на економію металу розрізання листа даних розмірів на стрічки потрібної ширини та обчислити кількість деталей, яку можна отримати із заданого металевого листа.

6. Обчислити площу деталі і коефіцієнт використання металу листа при штампуванні деталі, використовуючи даний штамп, а також штампи іншого принципу обмеження кроку подачі стрічки.

7. Визначити технологічне зусилля операцій і обґрунтувати вибір преса для штампування даної деталі.

Методичні рекомендації

Методика розрахунку при використанні штампа послідовної дії з разовим упором

Задано ескіз (див. рис. 6.2, *а*) та розміри деталі: D = 50 мм; d = 30 мм; s = 3 мм.

Матеріал деталі – сталь 10; лист 1800×1200×3;

Деталь відноситься до групи плоских виробів круглого контуру діаметром D = 50 мм і центральним отвором d = 30 мм, товщина деталі s = 3 мм. Як вихідний матеріал для штампування деталі взятий лист розмірами 1800×1200×3 мм. Штампування потрібно виконати штампом послідовної дії з разовим упором будова і принцип дії якого показано на рис. 6.1. Тому у технологічному процесі виготовлення деталі необхідно передбачити розрізання даного листа на окремі стрічки, з яких потім штампують деталі даним штампом, виконуючи послідовно роздільні операції – спочатку по ходу подачі стрічки у робочу зону штампа на першій позиції пробивають отвір діаметром 30 мм, а потім на другій позиції вирубують зовнішній контур діаметром 50 мм. Розрахункова схема розкрою стрічки показана на рис. 6.2, *б*.

Оскільки контур деталі криволінійний і має форму кола, то між краями стрічки і контуром вирубання передбачені кромки, а між суміжними контурами вирубання – перемички. За даними таблиці 6.1 для стрічки товщиною s = 3 мм вибирають ширину перемичок a = 2,3 мм і враховуючи коловий контур вирубання призначають ширину кромок b = 2,6 мм. Отже, для штампування деталі потрібна стрічка шириною $B_c = D + 2b = 50 + 2 \cdot 2{,}6 = 55{,}2$ мм. Округлено приймають B_c = 55 мм.

Крок подачі стрічки у робочу зону штампа за кожний хід повзуна преса $k = D + a = 50 + 2{,}3 = 52{,}3$ мм і забезпечується за першим ходом повзуна преса разовим упором, а за наступними ходами – грибковим упором, як показано на рис. 6.2, *в, г*.

Номінальні розміри пуансонів та матриць для пробивання отвору діаметром d = 30 мм і вирубання контуру деталі діаметром D = 50 мм з урахуванням технологічного зазору z = 0,1 s = 0,1 · 3,0 = 0,3 мм відповідно повинні бути:

– для пробивання отвору:

$$d_п = d = 30 \text{ мм}; \; d_м = d + 2z = 30 + 2 \cdot 0{,}3 = 30{,}6 \text{ мм};$$

– для вирубання контуру:

$$D_м = D = 50 \text{ мм}; \; D_п = D - 2z = 50 - 2 \cdot 0{,}3 = 49{,}4 \text{ мм}.$$

При розрізанні листа розмірами 1800×1200 мм ($L_л$ = 1800 мм; $B_л$ = 1200 мм) вздовж більшої сторони отримують стрічки довжиною $L_с$ = 1800 мм. Кількість виробів $n_в$ (ціле число), яку можна виготовити зі стрічки довжиною $L_с$ = 1800 мм, використовуючи штамп послідовної дії з разовим упором, визначають з виразу: $L_с / k = n_в + \Delta n_в$ = = 1800 / 52,3 = 34,417 = 34 + 0,417, де $n_в$ = 34; $\Delta n_в$ = 0,417.

Розрізання листа на окремі стрічки шириною $B_с$=55 мм вздовж більшої сторони $L_л$=1800 мм дозволяє отримати кількість потрібних стрічок: $B_л / B_с = n_с + \Delta n_с$ = 1200 / 55 = 21,818 = 21 + 0,818, де $n_с$ = 21; $\Delta n_с$ = 0,818.

Кількість деталей внаслідок такого розкрою листа:

$$N_в = n_с \cdot n_в = 21 \cdot 34 = 714 \text{ шт.}$$

Площа деталі:

$$F_в = \frac{\pi\left(D^2 - d^2\right)}{4} = \frac{3{,}14\left(50^2 - 30^2\right)}{4} = 1256 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт використання матеріалу листа:

$$КВМ = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л} 100 = \frac{714 \cdot 1256}{1200 \cdot 1800} 100 = 41{,}5 \text{ %}.$$

При розрізанні цього листа вздовж меншої сторони отримують стрічки довжиною $L_с$ = 1200 мм.

Кількість виробів $n_в$ (ціле число), яку можна виготовити з стрічки довжиною $L_с$ = 1200 мм у штампі: $L_с / k = n_в + \Delta n_в$ = = 1200 / 52,3 = 22,944 = 22 + 0,994, де $n_в$=22; $\Delta n_в$=0,994.

При розрізанні листа на окремі стрічки шириною B_c = 55 мм вздовж меншої сторони $B_л$ = 1200 мм отримують кількість стрічок: $L_л / B_c = n_c + \Delta n_c = 1800 / 55 = 32{,}757 = 32 + 0{,}727$, де $n_c = 32$; $\Delta n_c = 0{,}727$.

Кількість деталей внаслідок такого розкрою листа:

$$N_в = n_c \cdot n_в = 32 \cdot 22 = 704.$$

Коефіцієнт використання матеріалу листа у такому разі:

$$КВМ = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л} 100 = \frac{704 \cdot 1256}{1200 \cdot 1800} 100 = 40{,}9\ \%.$$

У результаті виконаних розрахунків очевидно, що розрізання листа на стрічки шириною 55 мм і довжиною 1800 мм вигідніше з огляду на економію металу.

У разі використання штампа з грибковим упором без разового упору кількість деталей з кожної стрічки зменшується на одну деталь, оскільки перша від краю стрічки деталь не матиме отвору. При розрізанні листа вздовж більшої сторони кількість деталей з одної стрічки становитиме 33 деталі, а при розрізанні листа вздовж меншої сторони листа – 21 деталь. Коефіцієнт використання матеріалу листа відповідно зменшиться 40,3 % і 39,07 %.

Якщо використовувати штамп послідовної дії з кроковим ножем, то ширину стрічки збільшують на ширину крокового ножа $c = 1{,}5\ s = 1{,}5 \cdot 3 = 4{,}5$ мм, тобто потрібні стрічки шириною $B_c = 55 + 4{,}5 = 49{,}5$ мм. Приймають $B_c = 60$ мм. Тоді розрізання листа розмірами 1800×1200 мм на окремі стрічки шириною $B_c = 60$ мм вздовж більшої сторони $L_л = 1800$ мм дозволяє отримати кількість потрібних стрічок: $B_л / B_c = n_c + \Delta n_c = 1200 / 60 = 20 + 0$, де $n_c = 20$; $\Delta n_c = 0$.

Кількість деталей внаслідок такого розкрою листа:

$$N_в = n_c \cdot n_в = 20 \cdot 34 = 680.$$

Коефіцієнт використання матеріалу листа:

$$КВМ = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л} 100 = \frac{680 \cdot 1256}{1200 \cdot 1800} 100 = 39{,}54\ \%.$$

При розрізанні листа на окремі стрічки шириною B_c = 55 мм вздовж меншої сторони $B_л$ = 1200 мм отримують кількість стрічок: $L_л / B_c = n_c + \Delta n_c = 1800 / 60 = 30 + 0$, де $n_c = 30$; $\Delta n_c = 0$.

Кількість деталей внаслідок такого розкрою листа:

$$N_в = n_с \cdot n_в = 30 \cdot 22 = 660.$$

Коефіцієнт використання матеріалу листа:

$$КВМ = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л} 100 = \frac{660 \cdot 1256}{1200 \cdot 1800} 100 = 38{,}38\ \%.$$

Для розрахунку енергетичних параметрів штампування заданої деталі спочатку наближено визначають опір різанню матеріалу деталі за виразом $\sigma_{зр}=0{,}8\sigma_в$, де $\sigma_в=340$ МПа – границя міцності сталі 10:

$$\sigma_{зр} = 0{,}8 \cdot 340 = 272 \text{ МПа}.$$

Номінальне зусилля пробивання отвору:

$$P_{пр} = \frac{L_{пр} \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{\pi d \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{3{,}14 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 272}{1000} = 76{,}87 \text{ кН}.$$

Номінальне зусилля вирубання зовнішнього контуру:

$$P_{вир} = \frac{L_{вир} \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{\pi D \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{3{,}14 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 272}{1000} = 128{,}11 \text{ кН}.$$

Загальне зусилля різання $P_р = P_{пр} + P_{вир} = 76{,}87 + 128{,}11 = 205$ кН.

Зусилля, необхідне для проштовхування відокремленого виробу та відходу пробивання через отвір матриці:

$$P_{пр} = 0{,}1\ P_р = 0{,}1 \cdot 205 = 20{,}5 \text{ кН}.$$

Зусилля, необхідне для проштовхування пуансонів через отвори у смузі:

$$P_{зн} = 0{,}25\ P_р = 0{,}25 \cdot 205 = 51{,}2 \text{ кН}.$$

Загальне технологічне зусилля:

$$P = kP_р + P_{пр} + P_{зн} = 1{,}25 \cdot 205 + 20{,}5 + 51{,}2 = 328 \text{ кН}.$$

Якщо використовується штамп з кроковим ножем, то витрачається додаткове зусилля для надрізання краю стрічки:

$$P_{нр} = \frac{L_{нр} \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{(c+k) \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{(5+52{,}3) \cdot 3 \cdot 272}{1000} = 46{,}75 \text{ кН}.$$

Загальне зусилля різання:

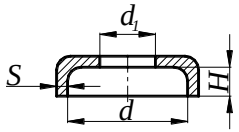
$$P_p = P_{пр} + P_{вир} + P_{нр} = 76{,}87 + 128{,}11 + 46{,}75 = 246{,}75 \text{ кН}.$$

Тоді загальне технологічне зусилля:

$$P = kP_p + P_{пр} + P_{зн} = 1{,}25 \cdot 246{,}75 + 20{,}5 + 51{,}2 = 380 \text{ кН}.$$

Для штампування заданої деталі з використанням будь-якого штампа необхідно вибрати механічний прес моделі КД 2326, номінальним зусиллям 400 кН.

Методика розрахунку при використанні штампу комбінованої дії з кроковим ножем



Задано ескіз і розміри деталі: D = 80 мм; d = 30 мм; s = 1 мм.

Матеріал – сталь Ст3кп; лист 1800×1200×1.

Деталь відноситься до групи тонкостінних (s = 1 мм) просторових циліндричних виробів діаметром D = 80 мм, висотою h = 20 мм з центральним отвором у дні діаметром d = 30 мм. Штампування передбачено штампом комбінованої дії з обмеженням кроку подачі стрічки уступом, надрізаним на краю стрічки кроковим ножем.

Будова та принцип дії штампа показано на рис. 6.3. Штамп виконує по ходу подачі стрічки наступні операції. Спочатку стрічка подається до виступу на напрямній планці і за першим ходом повзуна преса пуансоном *3* пробивається отвір діаметром d = 30 мм і кроковим ножем *2* по краю смуги надрізається уступ шириною $c = 2s = 2 \cdot 1 = 2$ мм і довжиною, рівною кроку подачі стрічки за кожний наступний хід повзуна преса. Після здійснення 1-го робочого ходу повзуна преса стрічка просувається на крок подачі до упора надрізаним уступом у виступ на напрямній планці. За 2-м ходом повзуна преса на 1-й позиції по ходу подачі стрічки операції пробивання отвору і надрізання уступу повторюються, а на 2-й позиції по ходу повзуна преса одночасно відбуваються операції вирубання пуансоном *1* круглого контуру заготовки діаметром D_o і витягування пуансоном *2* циліндричної поверхні деталі за принципом їх сумісної дії.

Відходи пробивання отвору і надрізання уступу видаляються через отвір матриці *5*, а деталь знімається з пуансона *2* і виштовхується з матриці витягування *1* відповідно знімачем *6* та виштовхувачем *7* під

дією, наприклад, пружин або гумових буферів. Видалення деталі з робочої зони штампа здійснюється зазвичай здуванням стиснутим повітрям.

Діаметр контуру вирубання заготовки для витягування деталі $D_0 = \sqrt{D(D+4h)} = \sqrt{80(80+4\cdot10)} = 98$ мм.

Розрахункова схема розкрою стрічки показана на рис. 6.2, *б*.

Оскільки контур заготовки має форму круга діаметром D_o, то між краями стрічки і контуром вирубання передбачені кромки, а між суміжними контурами вирубання – перемички. За даними таблиці 6.1, для стрічки товщиною s = 1 мм вибирають ширину перемичок b = 1,3 мм і враховуючи круглий контур вирубання призначають ширину кромок a = 1,3 мм. Отже, для штампування деталі потрібна стрічка шириною $B_c = D_0 + 2a + c = 98 + 2 \cdot 1{,}3 + 2 = 102{,}6$ мм. Округлено приймають $B_c = 103$ мм.

Крок подачі стрічки у робочу зону штампа за кожний хід повзуна преса $k = D_0 + b = 98 + 1{,}3 = 99{,}3$ мм. Округлено прийнято $k = 100$ мм. Крок подачі забезпечується виступом на напрямній планці штампа, як це показано на рис. 6.3.

Номінальні розміри пуансонів та матриць для пробивання отвору діаметром d = 30 мм і вирубання контуру заготовки діаметром D_0 = 98 мм з урахуванням технологічного зазору $z = 0{,}1$ $s = 0{,}1 \cdot 1{,}0 = 0{,}1$ мм відповідно повинні бути:

– для пробивання отвору

$$d_n = d = 30 \text{ мм}; \; d_м = d + 2z = 30 + 2 \cdot 0{,}1 = 30{,}2 \text{ мм};$$

– для вирубання контуру

$$D_м = D_0 = 98 \text{ мм}; \; D_n = D - 2z = 98 - 2 \cdot 0{,}1 = 97{,}8 \text{ мм};$$

При розрізанні листа розмірами 1800×1200 мм ($L_л$ = 1800 мм; $B_л$ = 1200 мм) уздовж більшої сторони отримують стрічки довжиною L_c = 1800 мм. Кількість виробів $n_в$ (ціле число), які можна виготовити з стрічки довжиною L_c = 1800 мм, використовуючи штамп комбінованої дії з кроковим ножем: $L_c / k = n_в + \Delta n_в = 1800 / 100 = 18 + 0$, де $n_в = 18$; $\Delta n_в = 0$.

Розрізання листа на окремі стрічки шириною B_c = 103 мм уздовж більшої сторони $L_л$ = 1800 мм дозволяє отримати кількість потрібних стрічок: $B_л / B_c = n_c + \Delta n_c = 1200 / 103 = 11{,}65 = 11 + 0{,}65$, де $n_c = 11$; $\Delta n_c = 0{,}65$.

Кількість деталей внаслідок такого розкрою листа:

$$N_в = n_c \cdot n_в = 11 \cdot 18 = 198.$$

Площа деталі $F_в = \dfrac{\pi\left(D_0^2 - d^2\right)}{4} = \dfrac{3{,}14\left(98^2 - 30^2\right)}{4} = 6833$ мм^2.

Коефіцієнт використання матеріалу листа:

$$КВМ = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л}100 = \frac{198 \cdot 6833}{1200 \cdot 1800}100 = 62{,}63\ \%.$$

При розрізанні листа вздовж меншої сторони отримують стрічки довжиною L_c = 1200 мм. Кількість виробів $n_в$ (ціле число), яку можна виготовити з стрічки довжиною L_c = 1200 мм у даному штампі: $L_c / k = n_в + \Delta n_в$ = 1200 / 100 = 212 + 0, де $n_в$ = 12; $\Delta n_в$=0.

При розрізанні листа на окремі стрічки шириною B_c = 103 мм уздовж меншої сторони $B_л$ = 1200 мм отримують кількість стрічок: $L_л / B_c = n_c + \Delta n_c$ = 1800 / 103 = 17,47 = 17 + 0,47, де n_c = 17; Δn_c = 0,47.

Кількість деталей внаслідок такого розкрою листа:

$$N_в = n_c \cdot n_в = 17 \cdot 12 = 204.$$

Коефіцієнт використання матеріалу листа у такому разі:

$$КВМ = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л}100 = \frac{204 \cdot 6833}{1200 \cdot 1800}100 = 64{,}53\ \%.$$

У результаті виконаних розрахунків очевидно, що розрізання листа на стрічки шириною 103 мм і довжиною 1200 мм вигідніше з огляду на економію металу.

У разі використання для виготовлення цієї деталі штампа з разовим упором кількість деталей з кожної стрічки, отриманої будь-яким способом розрізання листа, не зміниться, але потрібні стрічки шириною $B_c = D_0 + 2a$ = 98 + 2 · 1,3 = 100,6 мм. Округлено приймають B_c = 101 мм.

Розрізання листа розмірами 1800×1200 мм ($L_л$ = 1800 мм; $B_л$ = 1200 мм) на окремі стрічки шириною B_c = 101 мм вздовж більшої сторони $L_л$ = 1800 мм дозволяє отримати таку кількість стрічок: $B_л / B_c = n_c + \Delta n_c$ = 1200 / 101 = 11,88 = 11 + 0,88, де n_c = 11; Δn_c = 0,88.

При розрізанні листа на окремі стрічки шириною B_c = 101 мм уздовж меншої сторони $B_л$ = 1200 мм отримують кількість стрічок: $L_л / B_c = n_c + \Delta n_c$ = 1800 / 101 = 17,82 = 17 + 0,82, де n_c = 17; Δn_c = 0,82.

Показано, що при розрізанні листа будь-яким способом кількість стрічок шириною B_c = 101 мм, однакова з кількістю стрічок шириною B_c = 103 мм. Проте, дещо збільшуються відходи за некратністю числа стрічок. Залишається незмінною і кількість деталей, які можна отримати, використовуючи штамп з кроковим ножем і штамп з разовим упором. Однаковими є і коефіцієнти використання матеріалу листа.

Якщо для штампування деталі використати штамп комбінованої дії з грибковим упором, то кількість деталей з кожної стрічки зменшується на одну деталь, оскільки перша від краю стрічки деталь не матиме отвору в дні. При розрізанні листа уздовж більшої сторони кількість деталей з одної стрічки становитиме 17, а при розрізанні листа вздовж меншої сторони листа – 11 деталей. Кількість стрічок за різними способами розрізання листа залишається незмінною: при розрізанні уздовж більшої смуги n_c = 11, а уздовж меншої сторони – n_c = 17. В обох випадках кількість деталей, яку можна виготовити з листа, однакова: $N_в = n_c \cdot n_в = 17 \cdot 11 = 11 \cdot 17 = 187$.

Коефіцієнт використання матеріалу листа:

$$KBM = \frac{N_в \cdot F_в}{B_л \cdot L_л} 100 = \frac{187 \cdot 6833}{1200 \cdot 1800} 100 = 59{,}15\ \%.$$

Для розрахунку енергетичних параметрів штампування деталі спочатку наближено визначають її опір різанню матеріалу за виразом $\sigma_{зр} = 0{,}8\sigma_в$, де $\sigma_в$ = 370…470 МПа – границя міцності сталі Ст3кп. Прийнято: $\sigma_в$= 470 МПа, $\sigma_{зр} = 0{,}8 \cdot 470 = 376$ МПа.

Номінальне зусилля пробивання отвору:

$$P_{пр} = \frac{L_{пр} \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{\pi d \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{3{,}14 \cdot 30 \cdot 1 \cdot 376}{1000} = 35{,}42\ \text{кН}.$$

Номінальне зусилля вирубання зовнішнього контуру:

$$P_{вир} = \frac{L_{вир} \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{\pi D_0 \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{3{,}14 \cdot 98 \cdot 1 \cdot 376}{1000} = 115{,}7\ \text{кН}.$$

Загальне зусилля різання:

$$P_р = P_{пр} + P_{вир} = 35{,}42 + 115{,}7 = 151{,}12\ \text{кН}.$$

Зусилля, необхідне для проштовхування відокремленого виробу та відходу пробивання через отвір матриці:

$$P_{пр} = 0{,}1\ P_р = 0{,}1 \cdot 151{,}12 = 15{,}1\ \text{кН}.$$

Зусилля, необхідне для проштовхування пуансонів через отвори у стрічці:

$$P_{зн} = 0{,}25P_p = 0{,}25 \times 115{,}12 = 37{,}78 \text{ кН}.$$

Зусилля для надрізання краю стрічки кроковим ножем:

$$P_{нр} = \frac{L_{нр} \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \frac{(c+k) \cdot s \cdot \sigma_{зр}}{1000} = \\ = \frac{(2+100) \cdot 1 \cdot 376}{1000} = 38{,}35 \text{ кН}.$$

Загальне технологічне зусилля надрізання, пробивання отвору і вирубання контуру заготовки:

$$P_p = P_{пр} + P_{вир} + P_{нр} = 35{,}42 + 115{,}7 + 38{,}75 = 189{,}87 \text{ кН}.$$

Тоді загальне технологічне зусилля роздільних операцій:

$$P = kP_p + P_{пр} + P_{зн} = 1{,}25 \cdot 189{,}87 + 15{,}1 + 37{,}78 = 290{,}22 \text{ кН}.$$

Для розрахунку зусилля витягування циліндричних деталей без фланця і без притискання, з плоскої заготовки при $D / D_0 = 80 / 98 = 0{,}8$, за таблицею 7.2 вибирають $K = 0{,}4$, тоді:

$$P_{вит} = \frac{\pi D s \sigma_в K}{1000} = \frac{3{,}14 \cdot 80 \cdot 1 \cdot 376 \cdot 0{,}4}{1000} = 37{,}78 \text{ кН}.$$

Необхідне для штампування виробу номінальне зусилля преса розраховують як суму технологічних зусиль усіх операцій формоутворення виробу, які штамп виконує одночасно:

$$P_{шт} = P + P_{вит} = 290{,}22 + 34{,}78 = 325 \text{ кН}.$$

Для штампування даної деталі необхідно вибрати механічний прес моделі КД 2326 номінальним зусиллям 400 кН.

Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Обладнання, інструменти, матеріали.
3. Ескіз деталі індивідуального завдання.

4. Ескізи послідовності виконання операцій (розкрій стрічки).

5. Ескіз штампа послідовної дії з зображенням основних деталей і виглядом матриці зверху.

6. Визначення коефіцієнта використання матеріалу.

7. Результати проміжних розрахунків.

8. Висновки.

Контрольні питання

1. В чому полягає сутність листового штампування? Які характерні деталі виготовляють таким чином?

2. Які операції застосовують для штампування плоских деталей? В чому різниця між ними?

3. Як визначаються розміри пуансонів і матриць для розділювальних операцій?

4. В чому полягає принцип роботи і яка будова штампів послідовної дії?

5. З якою метою застосовують бокові фіксатори подачі стрічки і крокові ножі?

6. В чому полягає сутність розкрою металевої стрічки?

7. Як визначають ширину стрічки і крок подачі в штампах послідовної дії?

8. Коли доцільно застосовувати штампи з кроковим ножем?

9. Як оцінюють ефективність розкрою стрічки?

***Література*: [1**, с. 35–41, 45–47; **3**, с. 74–83; **4**, с. 14–18; **5**, с. 70–90]

Лабораторна робота 7

Технологія ручного електродугового зварювання

***Мета*:** опанувати методику розрахунку режимів електродугового зварювання покритим електродом типових швів металевих конструкцій; набути практичних навичок ручного електродугового зварювання.

Матеріали, обладнання, прилади: зварювальний випрямляч ВКСМ-1000; баластний реостат РБ-300; зварювальний трактор ТС-17 М; електроди АНО-4, d = 4мм; зварювальний дріт d = 2 мм; заготовки зварних конструкцій.

Короткі теоретичні відомості

Зварювання – це процес утворення нерознімних з'єднань за рахунок сил міжатомної взаємодії, які проявляються за умови наближення поверхонь з'єднуваних заготовок на відстань менше $4–10^{-10}$ м.

Залежно від того, яким чином забезпечуються умови такої взаємодії, усі відомі способи зварювання поділяють на термічні, термомеханічні і механічні.

При термічному зварюванні кромки з'єднуваних заготовок оплавляються інтенсивним нагрівом від потужного джерела теплової енергії, а для поповнення втрат металу на розбризкування і випаровування в зону плавлення вводять присадний метал у вигляді прутка або дроту, близького за хімічним складом до металу зварюваних заготовок. Після твердіння внаслідок швидкого охолодження утворюється зварний шов з литою дрібнозернистою кристалічною будовою.

Термомеханічне та механічне зварювання ґрунтуються на пластичній деформації контактних поверхонь заготовок після їх нагрівання, з метою зменшення опору деформації, зовнішнім джерелом теплової енергії або за рахунок перетворення механічної роботи в зоні контакту у теплову енергію, відповідно.

Найпоширенішим способом термічного процесу утворення нерознімних з'єднань є ручне електродугове зварювання електродом у вигляді металевого стрижня довжиною 350–450 мм і діаметром 2–6 мм. За призначенням електроди поділяють для зварювання вуглецевих і легованих конструкційних сталей, високолегованих сталей з особливими властивостями та наплавлення таких же поверхневих шарів.

Щоб створити шлаковий та газовий захист від окиснення і забезпечити розкиснення ванночки розплавленого металу на поверхню електрода наносять спеціальні покриття, до складу яких як шлакоутво-

рюючі речовини входять окиси кальцію, кремнію, марганцю та титану у вигляді відповідних мінералів та руд. Як газоутворюючі речовини використовують органічні складові, наприклад, целюлозу, яка при згорянні утворює захисні гази – окис вуглецю та водень. Для розкиснення ванночки розплавленого металу до складу покриття вводять марганець, кремній, титан та алюміній у вигляді відповідних феросплавів. Залежно від марки та діаметра електрода товщина покриттів 0,5–2 мм.

Для зварювання маловуглецевих сталей зазвичай використовують електроди марок АНО-4 і УОНІ-13/45.

Джерелом теплової енергії для розплавлення кромок заготовок і торця електрода є електрична дуга, що являє собою потужний електричний розряд у повітряному просторі. Для виникнення такого розряду електрод і зварювані заготовки під'єднують до джерела постійного або змінного електричного струму і щоб розігріти торець електрода торкаються ним до заготовок, утворюють короткочасне замикання. Після відведення електрода від заготовок з розігрітого кінця електрода починається термоелектронна емісія, яка під дією електричного поля зумовлює іонізацію повітряного проміжку між електродом та заготовками. Негативно заряджені іони та електрони спрямовуються до анода, а позитивно заряджені – до катода. На поверхнях анода та катода відбувається нейтралізація цих частинок з перетворенням електричної енергії у теплову. Температура в зоні дуги досягає 6000 ºС.

До основних параметрів, які визначають властивості дуги, належать напруга $U_д$, сила струму I і довжина дуги $L_д$. Залежність між напругою і силою струму є нелінійною на відміну від металевого провідника струму і визначається статичною вольт-амперною характеристикою (рис. 7.1): для струму менше 40–50 А вона є спадною (ділянка I), для стуму 50–360 А – жорсткою (ділянка II), для струму більше 360 А – зростаючою (ділянка III).

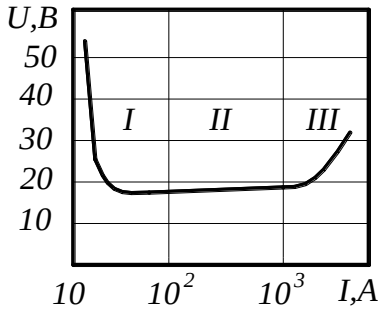


Рис. 7.1 – Вольт-амперна характеристика електричної дуги

Найчастіше для зварювання використовують дугу з жорсткою характеристикою, коли напруга практично не залежить від сили струму.

Залежність напруги від довжини дуги визначають за емпіричною формулою $U_д = a + в\ L_д$, де $U_д$ – напруга на дузі, В; $L_д$ – довжина дуги, мм; a і $в$ – коефіцієнти, які при зварюванні сталевими електродами в атмосфері повітря відповідно приймають рівними 10 В і 2 В/мм.

Довжину дуги наближено визначають залежно від діаметра $d_е$ електрода за виразом $L_д = 0{,}5\ (d_е + 2)$.

Теплову потужність (Вт) дуги розраховують за формулою $Q = K\ U_д\ I$, де K – коефіцієнт несинусоїдальності напруги і струму; для постійного струму $K = 1$, а для змінного струму $K = 0{,}7–0{,}97$.

Для живлення електричної дуги використовують спеціальні джерела зварювального струму, які уможливлюють запалювання дуги і стійке її горіння між електродом та заготовками. До таких джерел належать зварювальні трансформатори і зварювальні випрямлячі. Останні забезпечують живлення дуги постійним струмом, що зумовлює її більш стійке горіння і високу якість зварного шва.

Відмінною ознакою джерел зварювального стуму є зменшення вторинної напруги при збільшенні струму в електричному полі, тобто вони відрізняються спадною зовнішньою вольт-амперною характеристикою. При зварюванні на постійному струмі вольт-амперна характеристика джерела живлення являє собою похилу пряму з координатами точки A ($U = U_{хх}$; $I = 0$) і точки D ($U = 0$; $I = I_{кз}$), де $U_{хх}$ – напруга холостого ходу при відсутності електричної дуги; $I_{кз}$ – струм короткого замикання при запалюванні дуги (рис. 7.2).

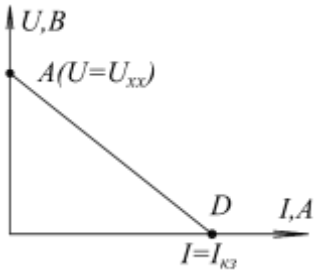


Рис. 7.2 – Вольт-амперна характеристика зварювального джерела живлення

Така характеристика забезпечується вмиканням у зовнішнє коло баластного реостата $R_б$, який обмежує струм короткого замикання при запалюванні дуги і уможливлює регулювання струму в ре-

жимі сталого горіння дуги. Спрощена схема поста ручного електродугового зварювання постійним струмом прямої полярності показана на рис. 7.3. Як джерело струму використовують зварювальний випрямляч ВКС–1000 з баластним реостатом типу РБ–300.

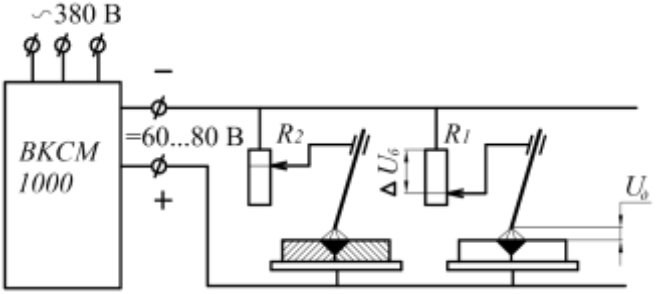


Рис. 7.3 – Схема поста ручного електродугового зварювання постійним струмом прямої полярності

Для зварювання багатьох легованих сталей застосовують зворотну полярність, коли «+» вмикається на електрод, «–» – на заготовки.

Напруга між електродом і заготовками $U_д$ визначається як різниця між напругою холостого ходу $U_{хх}$ і спадом напруги на баластному реостаті $\Delta U_б$, що прямо пропорційно залежить від електричного опору реостата R і сили зварювального струму $\Delta U_б = IR$, а напруга на дузі $U_д = U_{хх} - \Delta U_б = U_{хх} - IR$. Отже, чим більший опір баластного реостата, тим інтенсивніше відбувається спад напруги при збільшенні сили зварювального струму. Змінюючи опір баластного реостата вибирають необхідну силу струму, отримують множину зовнішніх характеристик джерела живлення, які відрізняються силою струму у режимі короткого замикання $I_{кз} = U_{хх} / R$ при запалюванні дуги (рис. 7.4).

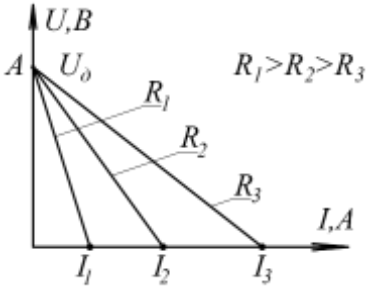


Рис. 7.4 – Залежність сили зварювального струму від опору баластного реостата

Силу зварювального струму визначають залежно від діаметра електрода і матеріалу зварюваних заготовок за виразом $I = kd_e$, де k = 40–50 А/мм – припустима густина струму для електрода з вуглецевої і низьколегованої сталі; k = 35–40 А/мм – для електрода з високолегованої сталі; d_e – діаметр електрода, мм.

Діаметр електрода вибирають залежно від товщини S зварюваних заготовок за такими рекомендаціями:

S, мм	1–2	3–5	6–10	12–24
d_e, мм	2	3–4	4–5	5–6

Електричні параметри запалювання і стійкого горіння електричної дуги забезпечуються напругою холостого ходу випрямляча в межах 60–70 В і опором баластного реостата. Зображення на одному графіку вольт-амперної характеристики дуги (рис. 7.5, крива *2*) і зовнішньої характеристики джерела її живлення (рис. 7.5, пряма *1*) показує напругу і силу струму на різних стадіях процесу зварювання. Точки перетину цих характеристик з осями координат та між собою відповідають режиму холостого ходу (т. *А*), нестійкому (т. *В*) і стійкому (т. *С*) горінню дуги і моменту запалювання дуги (т. *Д*). Джерело живлення налагоджують так, щоб забезпечувалась необхідна сила струму у режимі стійкого горіння дуги.

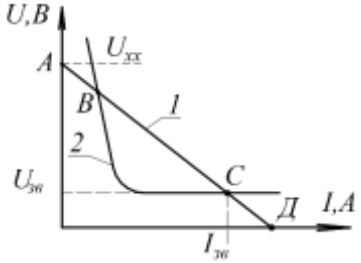


Рис. 7.5 – Вольт-амперні характеристики джерела живлення (*1*) та електричної дуги (*2*)

Ручним дуговим зварюванням можна виконати стикові (див. рис. 7.6), кутові, таврові шви і з'єднання внапусток. Стикові з'єднання залежно від товщини зварюваних заготовок виконують з відбортовуванням (*С1*), без скосу кромок (*С2, С4*), зі скосом однієї або двох кромок (*С15*), з двома симетричними або несиметричними прямими скосами двох кромок (*С21*), з двома симетричними криволінійними скосами двох кромок (*С22*) тощо.

Щоб заготовки проварювались на всю товщину, між кромками залишають зазор до 3 мм, кут розкриття скошених кромок має бути 54±6º. Кутові і таврові з'єднання також виконують без скосу (*К1, К4, Т1*), зі скосом однієї кромки (*К6, Т6*), з двома скосами однієї кромки (*К8, Т9*), зі скосами двох кромок (*К9*). При скосі однієї кромки кут розкриття повинен бути 50±5º, при скосі двох кромок – 54±6º.

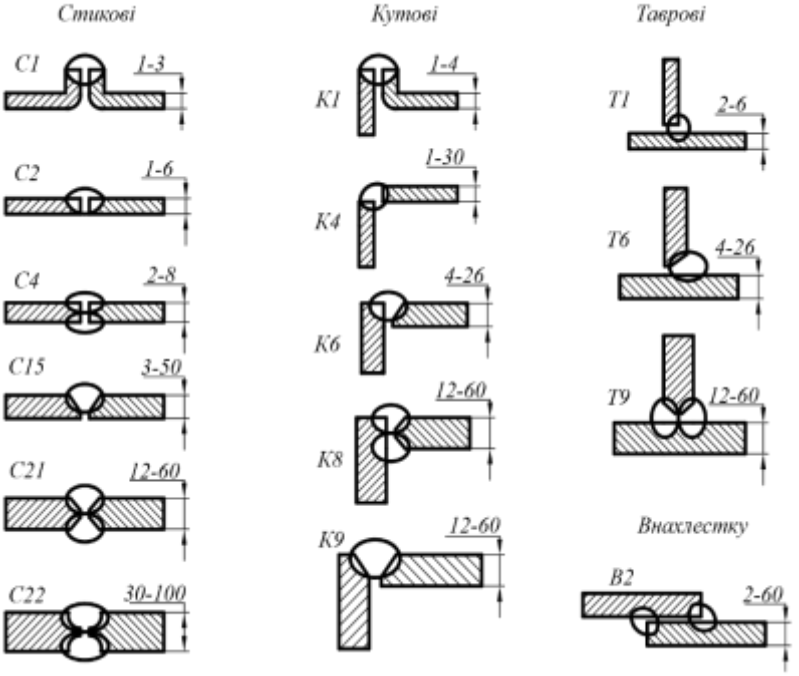


Рис. 7.6 – Основні види зварних з'єднань

Підготовку кромок виконують розмірами, які наведені у довідниковій літературі.

Окрім визначення електричних параметрів і вибору підготовки кромок зварюваних заготовок, розробка технологічного процесу передбачає також розрахунок необхідної маси електродного металу та нормативного часу зварювання заданого шва.

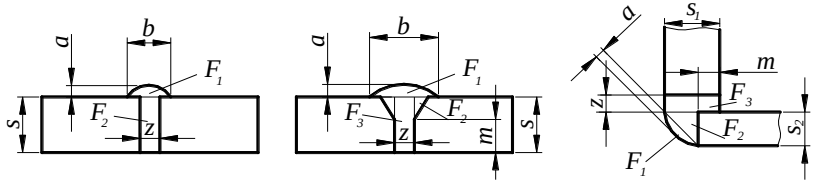
Масу електродного металу розраховують за масою наплавленого металу з урахуванням технологічних втрат на угар та розбризкування і недопал електродів (30–50 мм), що залишається у електродотримачі.

Маса наплавленого металу $M_н = \gamma\, L_ш\, F_ш$, де γ = 7,85 г/см^3 – густина сталі; $L_ш$ – довжина зварного шва, см; $F_ш$ – площа поперечного перерізу шва, см^2.

Площу поперечного перерізу шва зазвичай обчислюють як суму площ елементарних геометричних фігур перерізу шва. Наприклад, для стикового однобічного шва без скосу кромок заготовок з передбаченим зазором z між заготовками (рис. 7.7, *а*) $F_ш = F_1 + F_2 = 0{,}75\, a\, b + s\, z$; для стикового шва зі скосом обох кромок заготовок (рис. 7.7, *б*) $F_ш = F_1 + F_2 + 2F_3 = 0{,}75\, ab + sz + (s - m)^2 \operatorname{tg} \alpha / 2$, де $\alpha / 2$ – кут розкриття кромок; для кутового шва з зазором між заготовками (рис. 7.7, *в*):

$$F_ш = F_1 + F_2 + F_3 = 0{,}75\, a \cdot \sqrt{(s_1 - m)^2 + s_2^2} + \frac{(s_1 - m)\, s_2}{2} + z s_1 .$$

Подібним чином визначають площу перерізу будь-якого шва.



а *б* *в*

Рис. 7.7 – Поперечні перерізи зварних швів

Зварні шви виконують за один або декілька проходів зварювання. При зварюванні за декілька проходів кожний прохід виконують на однакових режимах. Площу перерізу першого проходу зазвичай приймають рівним F_1 = (6…8) d_e мм^2, а наступних проходів – $F_н$ = (8…12) d_e, мм^2. Число проходів $n = (F_ш - F_1) / F_н + 1$.

Відходи електродного металу на недопал та втрати його на угар і розбризкування складають 15–18 % маси наплавленого металу, необхідного для зварювання заданого шва. З урахуванням таких відходів і втрат необхідна мас електродного металу M_e = (1,15…1,18) $M_н$.

Нормативний час для ручного дугового зварювання обчислюють за виразом $T = t_0 / k_з$, де t_0 – тривалість горіння дуги, год; $k_з$ = 0,4–0,8 залежно від виду виробництва і характеру виконуваної роботи.

Тривалість горіння дуги $t_0 = M_н / I\, k_н$, де $M_н$ – маса наплавленого металу, г; I – сила зварювального струму, А; $k_н$ = 10…15 г / (А · год) – коефіцієнт наплавлення, який визначає масу електродного металу, на-

плавлену за 1 годину силою струму 1 А з урахуванням марки електрода і втрат металу на угар та розбризкування.

Особливістю термічного і, зокрема, електродугового зварювання є надмірне нагрівання і швидке охолодження заготовок і, як наслідок цього, біля шва з'являються зони термічного впливу з різною будовою та властивостями. Величина зон термічного впливу і структурні зміни у цих зонах залежать від типу зварюваного металу та енергетичних параметрів зварювання.

При зварюванні маловуглецевих сталей (до 0,27 % С) зона термічного впливу зазвичай не перевищує 6–10 мм і структурні зміни у цій зоні майже не знижують механічні властивості зварних з'єднань. Під час зварювання сталей з підвищеним вмістом вуглецю (більше 0,3 %) або низьколегованих сталей з загальним вмістом легуючих елементів до 2,5 % в зоні термічного впливу утворюються гартівні структури, збільшується твердість і з'являється крихкість, а іноді утворюються навіть гартівні тріщини. Щоб отримати оптимальні властивості зони термічного впливу цих сталей суворо затримуються заданого режиму зварювання, а іноді застосовують попереднє підігрівання заготовок до температури 150–350 ºС або наступну термічну обробку – нормалізацію або відпалювання.

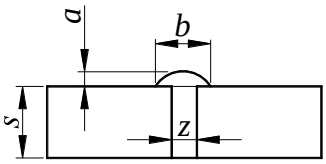
Високолеговані нержавіючі, жароміцні та інші сталі зварюють за спеціальною технологією.

Послідовність виконання

Відповідно до вказаних видів і розмірів зварного шва потрібно:

1. Дати коротку характеристику зварного шва і матеріалу зварюваних заготовок, визначити розміри і намалювати переріз поперечного перерізу шва.
2. Намалювати функціональну схему поста ручного зварювання постійним струмом прямої полярності, визначити параметри процесу зварювання заданих заготовок (діаметр електрода, довжину дуги, напругу та силу зварювального струму).
3. На сумісному графіку вольт-амперних характеристик дуги і джерела її живлення показати електричні параметри процесу в режимах холостого ходу, запалювання і стійкого горіння дуги.
4. Визначити площу поперечного перерізу шва, масу наплавленого і електродного металу і нормований час зварювання заданого шва.
5. Коротко описати особливості зварювання заданої марки сталі.

Методичні рекомендації



Задано зварне з'єднання типу *С2*; товщина заготовок $s = s_1 = s_2 = 6$ мм; $z = 2$ мм; $b / s = 1{,}5$; $b / a = 4{,}5$; матеріал заготовок – сталь ВСт3сп; довжина шва $L_ш = 1000$ мм.

Зварне з'єднання *С2* відноситься до стикових з'єднань без скосу кромок. Конструктивні елементи підготовки кромок і поперечного перерізу шва:

$$b = 1{,}5s = 1{,}5 \cdot 6 = 9 \text{ мм}; \; a = \frac{b}{4{,}5} = \frac{9}{4{,}5} = 2 \text{ мм}.$$

Матеріал заготовок – сталь ВСт3сп відноситься до групи вуглецевих сталей звичайної якості з гарантованими механічними властивостями і хімічним складом. Така сталь містить 0,14–0,22 % C, 0,4–0,65 % Mn, 0,05–0,17 % Si, до 0,07 % P, до 0,06 % S. Границя міцності σ_b = 380–490 МПа, пластичність δ = 23–26 %. Заготовки із сталі ВСт3сп добре зварюються у будь-якому просторовому положенні на максимально припустимих енергетичних режимах.

За умовою завдання зварювання передбачено постійним струмом прямої полярності. Функціональна схема поста зварювання показана на рис. 7.3. Як джерело живлення використовується зварювальний випрямляч типу ВКСМ-1000, який забезпечує напругу холостого ходу U_{xx} = 60–80 В, у комплекті з баластним реостатом типу РБ-300, короткочасно працездатний при силі струму 300 А.

Для зварювання заготовок зі сталі ВСт3пс рекомендуються електроди типу Е42 марки АНО-4, які забезпечують високу якість зварювання як на змінному, так і на постійному струмі прямої полярності. Міцність наплавленого металу досягає 460 МПа, пластичність – 28 %; забезпечується коефіцієнт наплавлення металу $k_н$ = 15 г / (А·год).

Для зварювання заготовок товщиною $s_1 = s_2 = 6$ мм за умови максимально припустимих енергетичних режимів вибирають електрод діаметром d_e = 5 мм.

Необхідна сила зварювального струму $I = kd_e$, = 60 · 5= 300 А, де k = 60 А/мм – максимально припустима густина струму для вуглецевих сталей.

Оптимальна довжина дуги:

$$L_д = 0{,}5 \, (d_e + 2) = 0{,}5 \, (5 + 2) = 3{,}5 \text{ мм}.$$

Напруга стійкого горіння дуги під час зварювання:

$$U_д = a + в\, L_д = 10 + 2 \cdot 3{,}5 = 17 \text{ В}.$$

Електричні параметри процесу зварювання показані на суміс-ному графіку вольт-амперних характеристик дуги і джерела живлення (рис. 7.8) у відповідних точках їх перетину з осями координат та між собою для режимів:

– холостого ходу (т. A) $U_{хх} = 60$ В, $I = 0$;

– горіння дуги при зварюванні (т. C) $U_д = 17$ В, $I = 300$ А;

– запалювання дуги (т. D) $U = 0$, $I = I_{max}$.

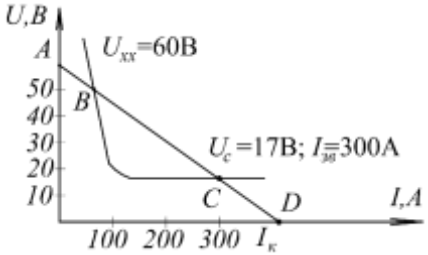


Рис. 7.8 – Електричні параметри зварювання з'єднання

Площа поперечного перерізу заданого шва:

$$F_ш = F_1 + F_2 = 0{,}75\, a\, b + s\, b = 0{,}75 \cdot 9 \cdot 2 + 6 \cdot 2 = 25{,}5 \text{ мм}^2.$$

Оскільки $F_ш = 25{,}5$ мм^2 < $6d_e = 6 \cdot 5 = 30$ мм^2, то шов зварюється за один прохід.

Маса наплавленого металу шва:

$$M_н = \gamma\, L_ш\, F_ш, = 7{,}85 \cdot 100 \cdot 0{,}255 = 200 \text{ г}.$$

Маса електродів з урахуванням втрат на угар і технологічних відходів металу $M_е = (1{,}15…1{,}18)\, M_н$.= 1,165 · 200 = 233 г.

Тривалість горіння дуги $t_0 = M_н / Ik_н$,= 200 / 300 · 15 = 0,044 год.

Нормативний час за умови врахування особливостей зварювання коефіцієнтом $k_з = 0{,}5$ займає $T = t_0 / k_з = 0{,}044 / 0{,}5 = 0{,}088$ год = 5,28 хв.

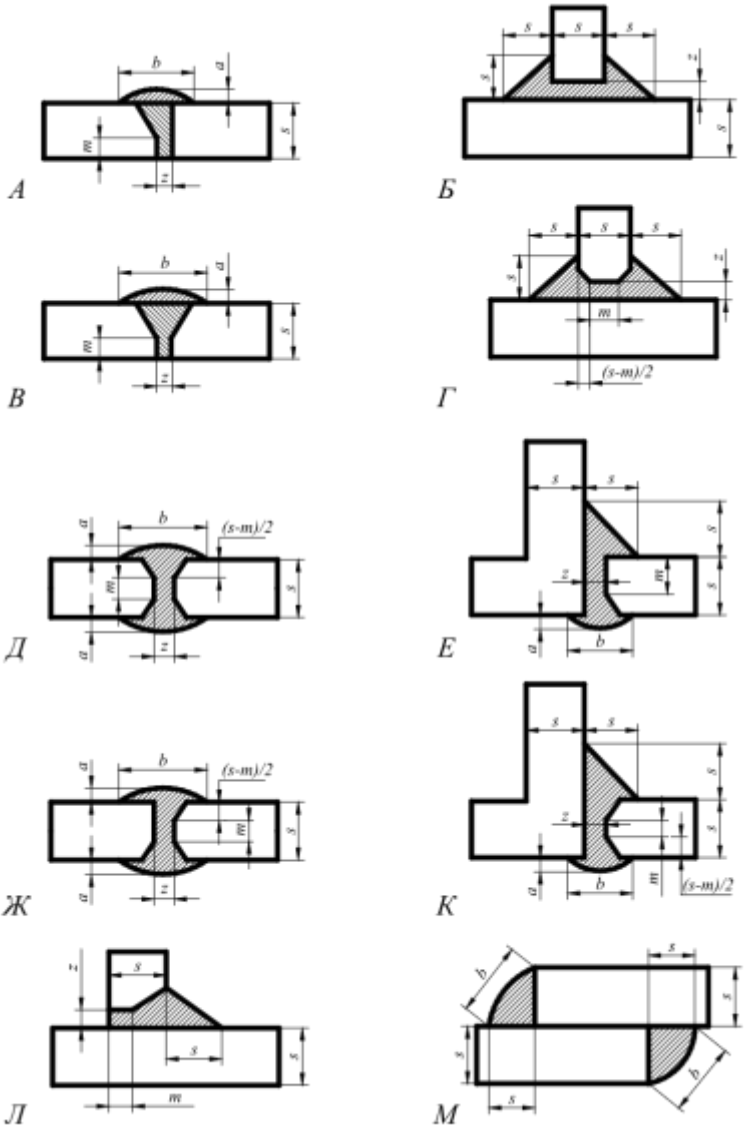
Задана марка сталі ВСт3сп не отримує суттєвих структурних перетворень у зоні термічного впливу навіть на максимально припустимих режимах зварювання і охолодженні шва на повітрі і не потребує будь-якої наступної термічної обробки, оскільки відноситься до класу маловуглецевих сталей, не схильних до утворення гартівних структур, наділена доброю тепло- та електропровідністю, не містить легуючих

елементів, які легко окиснюються і утворюють крихкі карбіди. Для зменшення внутрішніх напружень зварювання заданого шва бажано почати з середини довжини заготовок спочатку до одного їх кінця, а потім до іншого кінця зварного з'єднання.

Таблиця 7.1 – Варіанти завдань для самостійного виконання

Варіант	Вихідні дані				Розміри перерізу шва, мм			
	Ескіз шва	Марка сталі	Довжина шва L, мм	Товщина заготовки S, мм	z	m	b/s	b/a
1	А	20ХГС	100	6	1	2	2,5	7
2	Б	18ХН9Т	200	8	2	–	–	–
3	В	Сталь 10	300	10	3	4	1,8	9
4	Г	Сталь 20	400	12	4	5	–	–
5	Д	Ст3	500	14	4	5	1,0	12
6	Е	Сталь 15	600	12	4	5	1,2	10
7	Ж	Сталь 45	700	10	3	4	1,4	8
8	К	12Х13	800	8	2	3	–	–
9	Л	ВСт3	900	6	1	2	2,5	7
10	М	15ХМ	1000	10	3	–	–	9
11	А	20ХГС	600	4	1	2	2,5	7
12	Б	18ХН9Т	700	6	2	–	–	–
13	В	Сталь 10	800	8	3	4	1,8	9
14	Г	Сталь 20	900	10	4	5	–	–
15	Д	Ст3	1000	12	4	5	1,0	12
16	Е	Сталь 15	100	10	4	5	1,2	10
17	Ж	Сталь 45	200	8	3	4	1,4	8
18	К	12Х13	300	6	2	3	–	–
19	Л	ВСт3	400	5	1	2	2,5	7
20	А	15ХМ	500	8	3	–	–	9
21	Б	20ХГС	300	9	3	–	–	9
22	В	18ХН9Т	400	2	1	2	2,5	7
23	Г	Сталь 10	500	6	2	–	–	–
24	Д	Сталь 20	600	10	3	4	1,8	9
25	Е	Ст3	700	12	4	5	–	–
26	Ж	Сталь 15	800	15	4	5	1,0	12
27	К	Сталь 45	900	15	4	5	1,2	10
28	Л	12Х13	1000	8	3	4	1,4	8
29	М	ВСт3	600	6	2	3	–	–
30	А	15ХМ	700	3	1	2	2,5	7

Ескізи зварних швів для ручного електродугового зварювання
(врахувати кут нахилу скошених кромок 30º)



Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Обладнання, інструменти, матеріали.
3. Схема поста ручного електродугового або установки для автоматичного зварювання під шаром флюсу.
4. Розрахунок електричних параметрів.
5. Визначення маси електродного металу для виконання шва згідно варіанта індивідуального завдання.
6. Висновки.

Контрольні питання

1. В чому полягає фізична сутність електродугового зварювання?
2. Які ознаки лежать в основі поділу електродугового зварювання на окремі різновиди?
3. Як особливості ручного електродугового зварювання?
4. Які електричні і теплові параметри характеризують процес горіння електричної дуги?
5. Які джерела використовують для живлення електричної дуги зварювальним струмом?
6. Як вибрати діаметр електрода, напругу і силу струму для ручного електродугового зварювання?
7. Як визначити масу електродного металу для утворення зварного шва?
8. В чому фізична сутність та які особливості автоматичного зварювання під шаром флюсу?
9. В чому полягає принцип дій установок для автоматичного зварювання під шаром флюсу?
10. До чого призводить відхилення від оптимальних режимів електродугового зварювання?

***Література*:** [**1**, с. 62–76; **3**, с. 85–112; **4**, с. 22–26, **5**, с. 90–102]

Література

1. Літовченко П. І., Іванова Л. П. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Харків : НАНГУ, 2016. 306 с.

2. Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Ковальчук Я. О., Коваль І. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розд. Матеріалознавство : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 157 с.

3. Марченко С. В., Гапонова О. П., Говорун Т. П., Харченко Н. А. Технологія конструкційних матеріалів. Суми : СумДУ, 2016. 146 с.

4. Говорун Т. П., Гапонова О. П., Марченко С. В. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях) : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2020. 163 с.

5. Вельбой В. П., Каплун П. В., Посонський С. Ф. Технологія конструкційних матеріалів : зб. завдань з прикладами їх виконання для самост. роботи студентів інж.-техн. спец. Хмельницький : ХНУ, 2019. 139 с.

Зміст

Вступ.....3

Лабораторна робота 1
Розрахунок шихтових матеріалів
для плавлення сплавів чорних і кольорових металів.....6

Лабораторна робота 2
Визначення твердості металів і сплавів.....19

Лабораторна робота 3
Визначення технологічних властивостей металів,
придатних до пластичної деформації 33

Лабораторна робота 4
Технологія лиття в разові піщано-глиняні форми 43

Лабораторна робота 5
Технологія об'ємного штампування 61

Лабораторна робота 6
Технологія листового штампування 79

Лабораторна робота 7
Технологія ручного електродугового зварювання 100

Література.....113