МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

І. В. Бичков, В. В. Борисевич, О. М. Застела

ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Конспект лекцій

Харків "ХАІ" 2020

УДК 621.7.044:539.214(075.8)
Б67

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. С. С. Добротворський,
канд. техн. наук, доц. М. Ф. Савченко

Бичков, І. В.

Б67 Технологія конструкційних матеріалів [Текст] : консп. лекцій / І. В. Бичков, В. В. Борисевич, О. М. Застела. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. – 176 с.

ISBN 978-966-662-790-5

Описано технологічні процеси виробництва заготовок куванням і штампуванням, розглянуто конструкції оснащення й обладнання. Проаналізовано зв’язок питань теорії пластичної течії з проектуванням технологічних процесів пластичного оброблення металів. Додатково подано інформацію про прогресивні технологічні процеси високошвидкісного імпульсного формування деталей методами електрогідравлічного і магнітно-імпульсного штампування.

Вивчення інформації, наведеної в курсі лекцій, спрямовано на поглиблення знань з курсу "Технологія конструкційних матеріалів", набуття практичних навичок вирішення окремих технологічних завдань у ковальському і заготівельно-штампувальному виробництвах.

Для студентів механічних факультетів.

Іл. 74. Табл. 7. Бібліогр.: 17 назв

УДК 621.7.044:539.214(075.8)

© Бичков І. В., Борисевич В. В.,
Застела О. М., 2020

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2020

ISBN 978-966-662-790-5

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

σ_1, σ_2, σ_3 – головні нормальні напруження
σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz} – нормальні напруження
σ_e, σ_S, $\sigma_в$ – границі пружності, пластичності, міцності
τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx} – дотичні напруження
σ_i, τ_i , $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ – інтенсивності нормальних і дотичних напружень
ε_1, ε_2, ε_3 – деформації в напрямку головних осей
δ – гранична пластичність
x, y, z – координати
F, F_0, $F_д$ – площі
$\sigma_д$, $\sigma_{ум}$ – дійсні, умовні напруження
P, P_1 – зусилля
$\sigma_{сер}$ – середнє напруження
T_σ – тензори напруження
D_σ – девіатор напруження
I_1, I_2, I_3 – інваріанти напруження
S_ν – повне напруження
τ_ν – дотичне напруження на рівнопохилій площині
σ_ν – нормальна складова напруження
I_1', I_2', I_3' – інваріанти тензора напружень
$\bar{D}_\sigma$ – напрямний тензор
$\bar{\sigma}_{xx}, \bar{\tau}_{xy}, \ldots, \bar{\sigma}_{zz}$ – компоненти напрямного тензора
X, Y, Z – масові сили
ρ – густина середовища
V_x, V_y, V_z – проекції вектора швидкості
T_ε – тензор деформацій
ε_{xx}, ε_{xy},…, ε_{zz} – компоненти тензора деформацій
$e_{сер}$ – середнє подовження
D_ε – девіатор деформацій
I_1^*, I_2^*, I_3^* – інваріанти тензора деформацій
γ_i – інтенсивність деформацій зсуву
$\bar{D}_\varepsilon$ – напрямний тензор деформацій
$\vec{V}$ – швидкість переміщення точки
$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{xx}$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{xy}$,…, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{zz}$ – компоненти тензора швидкостей деформацій
$\dot{\varepsilon}$ – середня швидкість деформацій
T_ε – тензор швидкостей деформацій
D_ε – девіатор швидкостей деформацій
$\bar{D}_\varepsilon$ – напрямний тензор

W – об'єм
S – площа
$\vec{f}$ – проекція зовнішніх сил на нормаль до поверхні
N – потужність
E_m – кінетична енергія
υ_{ij} – тензор завихреності
$A_{пов}^{(i)}$ – елементарна робота внутрішніх поверхневих сил
$A_{пов}^{(e)}$ – елементарна робота зовнішніх поверхневих сил
$A_m^{(e)}$ – елементарна робота зовнішніх масових сил
U_m – внутрішня енергія
$Q^{(e)}$ – загальний приплив тепла
Q^* – зовнішній приплив нетеплових видів енергії
$\vec{q}$ – вектор потоку тепла
c – масова теплоємність
λ – коефіцієнт теплопровідності
χ – коефіцієнт температуропровідності
S – ентропія
G, G' – узагальнені модулі пружної та пластичної деформацій
ω – стала Ільюшина
E – модуль пружності
Δ – відносне змінення об'єму
Ψ – функція напружень
ν – коефіцієнт Пуассона
Θ – лінійна температурна деформація
u_x, u_y, u_z – компоненти зміщень
μ – коефіцієнт жорсткості
B, m – сталі зміцнення

Модуль 1
ТЕОРІЯ ПЛАСТИЧНОСТІ

Тема 1. Вступ до дисципліни «Технології конструкційних матеріалів». Діаграми напруження – деформації

Важливим етапом створення високоефективних виробів, які мають високу надійність, довговічність та економічність, є визначення напружено-деформованого стану їх елементів. Це потребує глибоких знань механіки деформованого середовища, одним з найважливіших розділів якої є теорія пластичності.

Теорія пружності вивчає дії сил на пружні тіла і визначає напруження та деформації, які виникають в стані рівноваги та у момент руху. Між теорією пружності та опором матеріалів є принципова різниця, яка полягає у вихідних передумовах, у методах вирішення задач та в діапазоні останніх. Опір матеріалів не може розв′язувати задачі з визначення напружено-деформованого стану тіла, якщо останнє має складну форму (пластина, оболонка, масив та ін.). Такі задачі вирішуються тільки з позиції теорії пружності, основні передумови якої відзначаються достатньою широтою та не обмежуються простою формою.

Наука, яка встановлює загальні закони виникнення пластичних деформацій і пластичної деформації напружень на всіх стадіях, називається теорією пластичності. У цьому простежується тісний зв'язок з нелінійною теорією пружності.

Як і в теорії пружності, поряд з точною теорією пластичних деформацій – назвемо її математичною теорією пластичності, – в теорії пластичності паралельно розроблюються спрощені методи розрахунку шляхом введення додаткових гіпотез (наприклад, надання тілу властивостей ідеальної пластичності). Коло задач з питань пластичності, які вирішуються в останньому напрямку, складають прикладну теорію пластичності.

Змінення з часом деформацій та напружень через початкове навантаження деталі називають повзучістю. Змінення деформації при постійному навантаженні описано в курсі опору матеріалів, в якому це явище називають пружною післядією. Змінення напружень при постійній деформації часто називають реакцією. Галузь механіки, яка вивчає післядії та реакції, називається теорією повзучості.

У твердих тілах під дією значних сил виникають пластичні деформації. У подібних випадках теорія пружності не відповідає на запитання, які цікавлять сучасну техніку.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що теорія пластичності вивчає напруження та деформації в тілах, які піддаються деформуванню за границею пружності.

Задачі теорії пластичності взагалі різні. Її висновки знаходять широке використання в техніці. З урахуванням пластичних деформацій можна розв′язувати статичні та динамічні задачі, задачі стійкості елементів конструкції, а також відповісти на питання, пов'язані з технологією обробки металів тиском.

Вирішення проблеми найбільш повного використання ресурсів міцності деталей машин, прогресивний метод їх розрахунку за граничним станом побудовані також на висновках теорії пластичності. В методі розрахунку за граничним станом спочатку визначають величину граничного навантаження, після чого коефіцієнт запасу обчислюють як відношення цього навантаження до дійсного. Цей метод розрахунку дозволяє створювати більш економічні конструкції порівняно з методом допустимих напружень, за яким встановлюють величини граничних навантажень, що відповідають вичерпаній несучій здатності деталей. Зрозуміло, що граничний стан починається після появи у деталях пластичних деформацій.

У технологічних процесах виробництва деяких елементів конструкції передбачають спеціальні операції, які дозволяють підвищити несучу здатність деталей у границях пружності шляхом пластичного деформування. Наприклад, гвинтові циліндричні пружини розтягнення, стиснення, кручення після навивання й термообробки витримують у деформованому за границею пружності стані певний час (операція загартовування)

Товстостінні труби після виготовлення навантажують внутрішнім тиском до появи пластичних деформацій для підвищення експлуатаційного ресурсу. В результаті цього в трубі утворюється таке поле залишкових напружень, яке знижує робоче напруження в експлуатаційних умовах. Така технологічна операція називається автоскріпленням, або автофретуванням. У результаті автоскріплення робочий тиск в трубі може бути підвищеним. Аналогічно автоскріпленню труб робилися спроби підвищення несучої здатності дисків турбіни шляхом початкового пластичного деформування (розкручування дисків до появи пластичної деформації).

Для визначення найефективніших умов пластичного деформування, розмірів заготовок, обчислення залишкових напружень, необхідних для розрахунків на міцність початково пластично здеформованих деталей, необхідно вміти виконувати розрахунки за границею пружності.

Підвищення якості продукції до рівня світових зразків потребує широкого використання досягнень фундаментальних наук при проектуванні технологічних процесів, їх теоретичних розрахунків не тільки в науково-дослідних та проектно-конструкторських інститутах, але також у повсякденній практиці заводських інженерів, у тому числі з обробки металів тиском.

ОМТ проводиться шляхом пластичної деформації металу, яка спричиняє змінення його форми та розмірів, забезпечує потрібні механічні, фізичні та хімічні властивості (міцність, пластичність, в'язкість, зносостійкість, електропровідність, жароміцність, корозійну стійкість). При цьому змінюється взаємне розташування частинок деформівного тіла та відстань між ними. У технологічних процесах ОМТ деформація відбувається під дією зовнішніх сил. Деформація, яка припиняється після зняття навантаження, називається пружною.

Для металів пружні деформації завжди малі. Деформація складається в основному з пластичної залишкової деформації, яка залишається після припинення навантажень.

Пластична деформація реалізується завдяки тому, що метали мають пластичність. Пластичність – властивість металу сприймати залишкові пластичні деформації, змінювати форму під дією зовнішніх сил без руйнування.

Під руйнуванням розуміють макроскопічне порушення суцільності металу (наприклад, утворення тріщин).

Теорія пластичності вивчає основні закономірності пластичної деформації металів, а також розроблює теоретичні основи методів розрахунку пружно-деформованого стану металу при його обробці тиском. Умовно розрізняють фізичну, математичну, прикладну теорію пластичності.

Фізична теорія пластичності на основі реальної кристалічної побудови металів і дефектів їх кристалічних решіток вивчає механізм пластичної деформації, вплив холодної та гарячої пластичної деформації на механічні, фізичні та хімічні властивості металів.

В основу математичної теорії пластичності покладено модель пластично деформівного матеріалу (суцільного середовища). На відміну від реального металу, який по об'єму має в основному “пустоти” (ядерна речовина, в якій зосереджена більша частина маси, займає невелику частину об'єму металічного тіла, приблизно 10^{-12} мм), суцільне середовище безперервно заповнює частину реального простору. Це дозволяє використовувати математичний апарат безперервних функцій, диференціальне та інтегральне обчислювання. Гіпотезу суцільного середовища покладено в основу електродинаміки, гідродинаміки, теорії пружності, теорії пластичності. Суцільне середовище – об'єкт вивчення науки “Механіка суцільного середовища”.

Математична теорія пластичності – розділ механіки суцільного середовища, в якому розроблюються методи математичного опису пружного і деформованого станів (з цією метою використовується апарат тензорного обчислювання); розглядаються фізичні закони збереження енергії щодо суцільного середовища й наслідки з них (рівняння нерозривності, диференціальні рівняння руху, симетрія тензора напружень, закон збереження енергії щодо індивідуального об'єму суцільного середовища, рівняння теп-

лового балансу й теплопровідності); будуються реологічні моделі, тобто визначають рівняння стану або рівняння, які вказують на зв'язок між напруженим і деформованим станом у процесі пружно-пластичної деформації; використовують крайові задачі з використанням системи диференціальних рівнянь теорії пластичності та розроблюються методи їх розв’язання.

У прикладній теорії пластичності на основі методів розв’язання крайових задач у математичній теорії пластичності здійснюють постановку та вирішення конкретних задач ОМТ – прокатки, волочіння, пресування, кування, штампування та ін. Межа між математичною та прикладною теоріями пластичності зазвичай умовна. До прикладної теорії пластичності можна віднести розроблення числових методів розв’язання крайових задач і способів їх реалізації за допомогою ЕОМ.

Спочатку теорія пластичності розвивалася на основі вимог будівельної механіки. Допущення в будівельних конструкціях пластичної деформації підвищує їх несучу здатність. Потім загальним стимулом розвитку теорії пластичності були потреби технології та теорії ОМТ.

Розглянемо історію розвитку теорії пластичності. Основний закон деформування пружних тіл в його найпростішій формі (лінійний закон) без пояснення фізичної суті явища пружності був сформульований у 1678 році Р. Гуком.

Першу спробу розглянути нелінійну залежність між напруженнями та деформаціями у формі, відмінній від закону Гука, здійснив Бюльфінгер і опублікував у працях Російської Академії наук у 1729 році.

Більш як двісті років тому, в 1755 році, Л. Ейлером були виведені рівняння руху ідеальної рідини, які до цього часу є основними рівняннями гідромеханіки. При цьому використовувалась гіпотеза суцільності ідеальної рідини. Ці рівняння підтвердилися подальшими експериментами. Узагальненням цих рівнянь для випадку руху в'язких рідин були рівняння Нав'є (1827 рік). Перша спроба використання загальних рівнянь руху рідин до процесів пластичної течії металів належить Тресці (1868 рік).

Однак специфічні особливості деформованого металу у твердому стані не дозволили повною мірою використати ці рівняння для вирішення конкретних задач. Перші теоретичні дослідження у цьому напрямку були зроблені в 1871 році Сен-Венаном, який визначив умови переходу металу в пластичний стан (умова пластичності Сен-Венана):

$$\left(\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\right)^2 + \tau_{xy}^2 = 4k^2. \qquad (1.1)$$

Подальшим розвитком теорії займався М. Леві, який запропонував метод інтегрування системи рівнянь рівноваги за умов пластичності:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \qquad (1.2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0; \qquad (1.3)$$

$$\left(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}\right)^2 + \tau_{xy}^2 = 4k^2 \qquad (1.4)$$

шляхом уведення двох допоміжних функцій φ та ψ, які знаходять з рівнянь

$$\sigma_{xx} = k\,(-\cos\psi\,);$$

$$\sigma_{yy} = k\,(+\cos\psi\,);$$

$$\tau_{xy} = k\sin\psi\,.$$

У дослідах цих авторів матеріал наділявся ідеально-пластичними властивостями, які характеризуються графіком (рис. 1.1). Прандтль і Генкі (1921 – 1923 рр.) розглянули деякі задачі пластичної рівноваги і виявили основні закономірності, пов'язані з розв'язуванням задач цього типу.

Нині як в державах СНД, так і дальнього зарубіжжя теоретичним та експериментальним дослідам в області теорії пластичності приділяється багато уваги. Великий внесок у розвиток теорії пластичності зробили радянські вчені А. А. Ільюшин, В. В. Соколовський, Л. М. Качанов, Т. А. Смирнов-Аляєв, М. М. Бєляєв та інші.

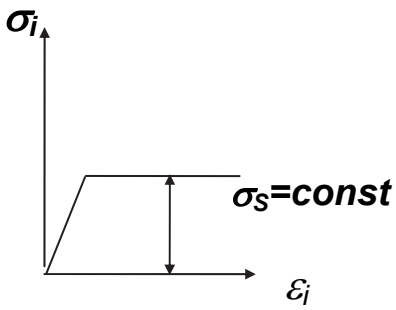


Рис. 1.1. Ідеально-пластичне тіло

Подальший розвиток полягає в застосуванні нових математичних моделей пластичного деформування, які досить точно відображають схему та умови деформування, а також дозволяють враховувати вплив швидкості деформівного матеріалу. Сучасні методи R-функцій і структурно-варіаційний, а також МСЕ дозволяють так сформулювати крайову задачу, що враховуються різні за величиною й природою граничні умови. Якщо раніше всі ділянки, на які розділялась деформована деталь, розглядались окремо, а потім ці частини “зшивали”, то при цьому мали місце похибки.

Використання нового підходу дає можливість більш точно аналізувати напружено-деформований стан, визначити зусилля деформування, роботу формозмінення заготовки.

Тензор і девіатор напружень, їх інваріанти

Виняткова складність явищ, які виникають на рівні кристалічної будови металу, змушує йти на ідеалізацію загальної схеми процесу з метою виявлення основних закономірностей. Однією з таких ідеалізацій є поняття про напруження, які статично відображають внутрішні зв'язки між частинками металу. Ці зв'язки можна подати у вигляді внутрішніх зусиль.

Якщо подумки розділити тіло на частини, то дію однієї частини на іншу можна замінити внутрішніми силами, які відомим порядком розподіляються

по площі перерізу. Взявши в довільній області пересічної площини точку, виділимо досить малу площину *dF.* Можна вважати, що внутрішні сили в цій точці характеризуються результуючою силою *dP,* яка діє на площі *dF* (рис. 1.2), а напруження визначається співвідношенням

$$\sigma = \frac{dP}{dF}. \qquad (1.5)$$

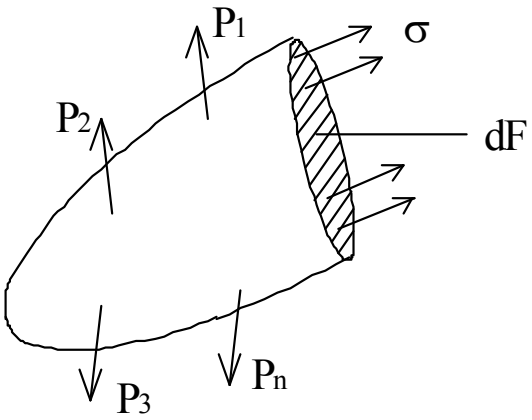


Рис. 1.2. Введення внутрішніх сил

У загальному випадку напруження σ діє під кутом до нормалі *n*, проведеної до площини *dF,* і його можна розкласти на нормальне напруження σ_n, що діє вздовж нормалі та дотичне напруження τ в площині перерізу тіла. Якщо на тіло діє система зовнішніх сил, а в середині цього тіла виділити елементарний об'єм, то по його гранях будуть діяти напруження (рис. 1.3, 1.4). Ці напруження в декартовій системі координат можна зобразити у вигляді векторів P_x , P_y, P_z. Внаслідок того, що напруження P_x , P_y, P_z в загальному випадку діють під кутом до координатних осей, їх можна розкласти на нормальні напруження, що діють по нормалі до граней σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, та дотичні напруження τ_{xx}, τ_{yx}, τ_{zx}, τ_{xz}, τ_{yz}, τ_{zy}, розташовані в площині граней.

Ці дев'ять величин повністю визначають величину напружень на гра-

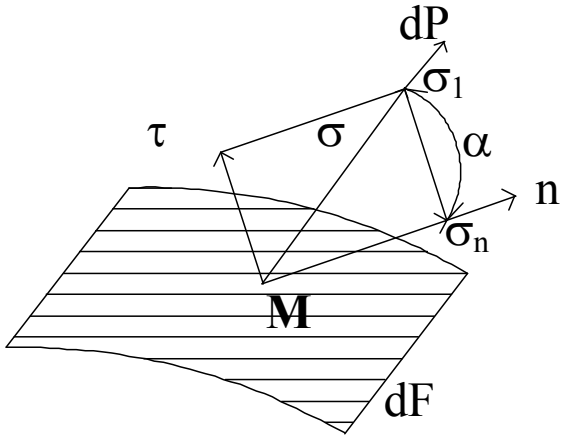


Рис. 1.3. Уведення компонентів напружень

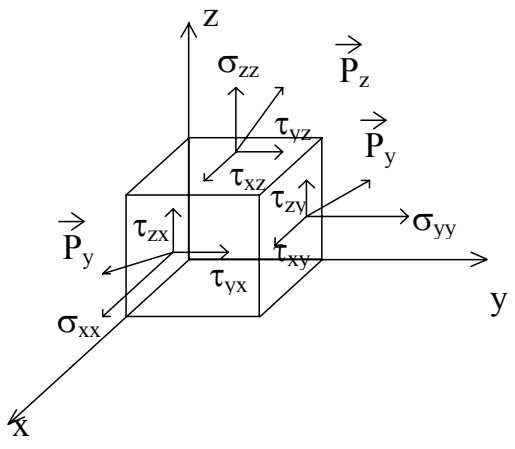


Рис. 1.4. Елементарний об'єм тіла та компоненти напружень

нях виділеного елементарного об'єму і характеризують його напружений стан. У сукупності ці величини утворюють тензор напружень

$$\mathrm{T}_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}. \qquad (1.6)$$

За умов рівноваги виділеного елемента сума моментів відносно осей, паралельних координатам, має дорівнювати нулю. Це приводить до рівнянь (рис. 1.5)

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \qquad (1.7)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}; \qquad (1.8)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}, \qquad (1.9)$$

якщо не враховувати величини другого порядку малості.

Отже, дотичні напруження задовольняють закон парності і напружений стан визначається шістьома компонентами напружень: σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}.

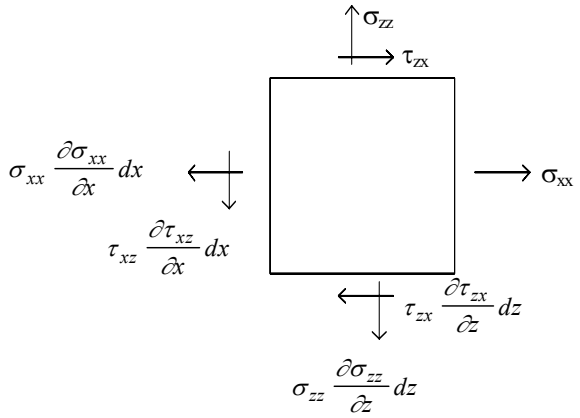


Рис. 1.5. Сума моментів

Тензор напружень в теорії пластичності зручно показати у вигляді суми двох тензорів: кульового тензора $\mathrm{T}_{\sigma_{сер}}$ та девіатора напружень D_σ.

Позначимо через $\sigma_{ср}$ середнє нормальне напруження

$$\sigma_{сер} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \qquad (1.10)$$

і запишемо

$$\mathrm{T}_\sigma = \mathrm{T}_{\sigma_{сер}} + D_\sigma,$$

$$\mathrm{T}_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{сер} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{сер} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{сер} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma_{сер} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma_{сер} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma_{сер} \end{vmatrix}. \qquad (1.11)$$

Кульовий тензор, як відомо з курсу теорії пружності, — це виділене із загального напруженого стану середнє всебічне розтягнення або стиснення. Таким чином, довільний напружений стан у точці тіла можна подати як накладання двох напружених станів: один характеризується однаковими нормальними напруженнями $\boldsymbol{\sigma_1}$, другий визначається наявністю в координатних площинах нормальних $\boldsymbol{\sigma_{xx} - \sigma_{сер}}$, $\boldsymbol{\sigma_{yy} - \sigma_{сер}}$, $\boldsymbol{\sigma_{zz} - \sigma_{сер}}$ та дотичних $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ напружень.

Алгебраїчна сума нормальних напружень девіатора напружень дорівнює нулю.

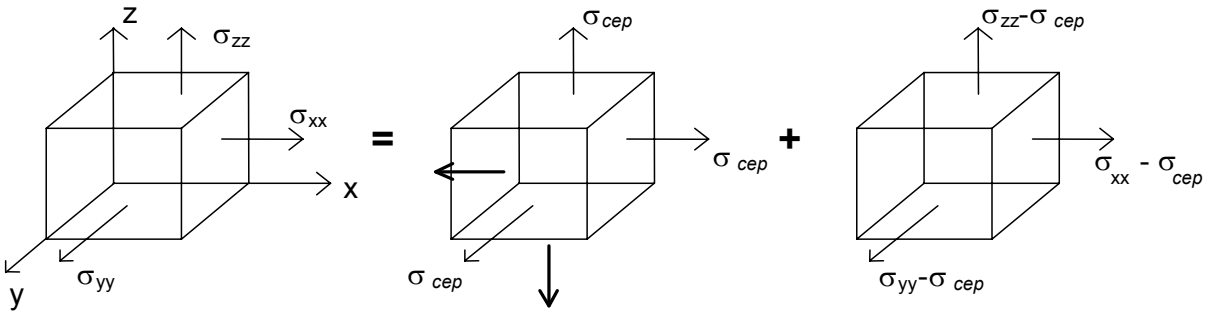


Рис. 1.6. Накладання двох напружених станів

При вивченні напруженого стану тіла в теорії пружності та пластичності розглядаються інваріанти тензора напружень з виразів його компонентів, які не змінюються при повороті осей координат.

Перший, або лінійний, інваріант є сумою нормальних компонентів напруження:

$$I_1' = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3; \qquad (1.12)$$

другий – квадратичний:

$$I_2' = -(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1); \qquad (1.13)$$

третій — кубічний:

$$I_3' = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz\sigma} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} = \sigma_1\sigma_2\sigma_3, \qquad (1.14)$$

де $\sigma_1\sigma_2\sigma_3$ – головні нормальні напруження.

У теорії пластичності необхідно розглянути інваріанти девіатора напружень D_σ. Вони складаються за аналогією з інваріантами тензора напружень і визначаються за такими виразами:

перший інваріант :

$$I_1 = (\sigma_{xx} - \sigma_{сер}) + (\sigma_{yy} - \sigma_{сер}) + (\sigma_{zz} - \sigma_{сер}) = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} - 3\sigma_{сер} = 0; \qquad (1.15)$$

другий інваріант:

$$I_2 = -(\sigma_{xx} - \sigma_{сер})\ (\sigma_{yy} - \sigma_{сер}) - (\sigma_{xx} - \sigma_{сер})\ (\sigma_{zz} - \sigma_{сер}) - (\sigma_{yy} - \sigma_{сер})\ (\sigma_{zz} - \sigma_{сер}) +$$

$$+\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 = \frac{1}{6}\left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)\right]; \qquad (1.16)$$

третій інваріант:

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx}-\sigma_{\text{сер}} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy}-\sigma_{\text{сер}} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz}-\sigma_{\text{сер}} \end{vmatrix} = (\sigma_1-\sigma_{\text{сер}}) \quad (\sigma_2-\sigma_{\text{сер}}) \quad (\sigma_3-\sigma_{\text{сер}}). \quad (1.17)$$

Октаедричне напруження, інтенсивність напружень

Використовуючи в теорії пластичності інваріанти девіатора напружень і так зване октаедричне напруження, яке знаходиться в тісному зв'язку з інваріантами девіатора напружень, можна зменшити кількість параметрів, які визначають напружений стан.

Розглянемо площину, яка однаково нахилена до всіх трьох головних осей (рис. 1.6). Напрямні косинуси нормалі до цієї площини

$$l = m = n = \frac{1}{\sqrt{3}}; \qquad (1.18)$$

напруження запишемо у вигляді

$$\sigma_{1\nu} = \sigma_1 l = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}}; \qquad (1.19)$$

$$\sigma_{2\nu} = \sigma_2 m = \frac{\sigma_2}{\sqrt{3}}; \qquad (1.20)$$

$$\sigma_{3\nu} = \sigma_3 n = \frac{\sigma_3}{\sqrt{3}}. \qquad (1.21)$$

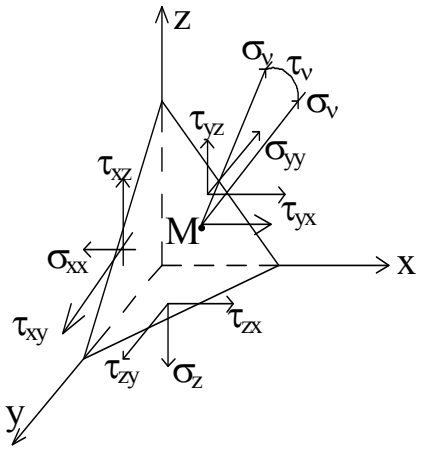


Рис. 1.7. Уведення октаедричних напружень

Повне напруження визначимо як

$$S_\nu = \sqrt{\sigma_{1\nu}^2 + \sigma_{2\nu}^2 + \sigma_{3\nu}^2} = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}, \qquad (1.22)$$

нормальну складову σ_ν знайдемо проеціюванням $\sigma_{1\nu}$, $\sigma_{2\nu}$, $\sigma_{3\nu}$ на нормаль ν:

$$\sigma_\nu = \sigma_{1\nu} l + \sigma_{2\nu} m + \sigma_{3\nu} n = \frac{1}{3}\left(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3\right) = \sigma_{сер}. \qquad (1.23)$$

Особливий інтерес становить дотична τ_ν, яку визначають за рівнянням

$$\tau_\nu = \sqrt{S_\nu^2 - \sigma_\nu^2} \quad . \qquad (1.24)$$

Підставляючи значення в (1.20) для σ_ν і S_ν, одержуємо

$$\tau_\nu = \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2) - \frac{1}{9}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}. \qquad (1.25)$$

Дотичне напруження називається октаедричним напруженням, або інтенсивністю дотичних напружень. Інтенсивність дотичних напружень позначають через τ_i і записують у вигляді

$$\tau_i = \frac{1}{3}\sqrt{2\left[\left(I_1'\right)^2 + 3I_2'\right]}; \tag{1.26}$$

$$I_1' = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \ ; \tag{1.27}$$

$$I_2' = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) = \\ = \frac{1}{3}\sqrt{2\left[\left(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3\right) - 6\left(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1\right)\right]} \ ; \tag{1.28}$$

у декартовій системі координат:

$$I_1' = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}; \tag{1.29}$$

$$I_2' = -\left(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}\right) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2; \tag{1.30}$$

$$\tau_i = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \tag{1.31}$$

Величина інтенсивності дотичних напружень мало відрізняється від максимального дотичного напруження. Це і є суттю цього інваріанта девіатора напружень. Інваріант визначає величину дотичних напружень, які виникають на рівнопохилій до головних осей площадці.

Окрім інтенсивності дотичних напружень τ_i вводять другу величину – інтенсивність напружень σ_i, яку визначають за формулою

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \tag{1.32}$$

або

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \ . \tag{1.33}$$

Інтенсивність напружень σ_i не можна показати наочно у вигляді напруження, яке діє на будь-якій площадці. Однак вираз для σ_i має ту перевагу, що при простому розтягненні ($\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$) він збігається з нормальним розтяжним напруженням, відмінним від нуля:

$$\sigma_i = \sigma_1. \tag{1.34}$$

Порівнюючи вирази інтенсивності дотичних напружень з виразами другого інваріанта девіатора напружень, стає очевидним, що з точністю до цілого числового множника квадрат інтенсивності дотичних напружень дорівнює другому інваріантові девіатора напружень:

$$\tau_i^2 = \frac{2}{3}I_2 \ . \tag{1.35}$$

Якщо всі компоненти девіатора напружень розділити на другий інваріант, то одержимо напрямний тензор:

$$\bar{D}_\sigma = \frac{D_\sigma}{\tau_i} = \begin{vmatrix} \bar{\sigma}_{xx} & \bar{\tau}_{xy} & \bar{\tau}_{xz} \\ \bar{\tau}_{yx} & \bar{\sigma}_{yy} & \bar{\tau}_{yz} \\ \bar{\tau}_{zx} & \bar{\tau}_{zy} & \bar{\sigma}_{zz} \end{vmatrix}; \qquad (1.36)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{cp}}{\tau_i}; \qquad \bar{\tau}_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\tau_i}; \qquad \bar{\tau}_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{\tau_i};$$

де $$\bar{\tau}_{yx} = \frac{\tau_{yx}}{\tau_i}; \qquad \bar{\sigma}_{yy} = \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{cp}}{\tau_i}; \qquad \bar{\tau}_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{\tau_i};$$

$$\bar{\tau}_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{\tau_i}; \qquad \bar{\tau}_{zy} = \frac{\tau_{zy}}{\tau_i}; \qquad \bar{\sigma}_{zz} = \frac{\sigma_{zz} - \sigma_{cp}}{\tau_i}.$$

Компоненти напрямного тензора – безрозмірні величини.

Розглядаючи напружений стан у точці, слід зазначити, що компоненти тензора напружень у теорії пластичності задовольняють ті ж самі диференціальні рівняння рівноваги, що і в теорії пружності:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0; \qquad (1.37)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0; \qquad (1.38)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0, \qquad (1.39)$$

або диференціальні рівняння руху суцільного середовища:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = \rho \frac{\partial V_x}{\partial t}; \qquad (1.40)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = \rho \frac{\partial V_y}{\partial t}; \qquad (1.41)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = \rho \frac{\partial V_z}{\partial t}, \qquad (1.42)$$

де ρ – густина середовища; V_x, V_y, V_z – компоненти швидкості руху частинки та граничні умови:

$$\sigma_{xx\nu} = \sigma_{xx} l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n; \qquad (1.43)$$

$$\sigma_{yy\nu} = \tau_{yx} l + \sigma_{yy} m + \tau_{yz} n; \qquad (1.44)$$

$$\sigma_{zz\nu} = \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_{zz} n. \qquad (1.45)$$

Граничні умови можуть відрізнятися від наведених, тобто можуть задаватися переміщення або швидкості переміщення точок межі тіла. Існують змішані граничні умови: на одній частині поверхні тіла задається навантаження, а на другій – переміщення або його швидкість.

Тензор і девіатор деформацій, їх інваріанти

Деформований стан у точці визначається тензором деформацій

$$T_\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{zx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} .$$

Як і тензор напружень, тензор деформацій є симетричним тензором другого рангу.

Множник при кутових деформаціях надає всім формулам, які характеризують деформований стан, повної схожості з аналогічними формулами для напружень. При повороті осей координат компоненти деформацій змінюються так само, як і компоненти напружень. Отже, всі висновки теорії напружень, які пов'язані з поворотом площадки, поширюються і на теорію деформацій. Як і для напружень, можна знайти три взаємно перпендикулярні площадки, на яких немає зсувів. Нормалі до цих площадок є головними осями деформації.

Позначимо лінійні деформації в напрямку цих осей через ε_1, ε_2 і ε_3, введемо поняття про середнє подовження

$$\varepsilon_{сер} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \quad . \tag{1.46}$$

Тензор деформацій можна подати у вигляді суми двох тензорів:

$$T_\varepsilon = T_{\varepsilon_{сер}} + D_\varepsilon \ , \tag{1.47}$$

де

$$T_\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{сер} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{сер} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{сер} \end{vmatrix} \tag{1.48}$$

– сферичний тензор деформацій, який характеризує змінення об'єму, а девіатор деформацій має вигляд

$$D_\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{cep} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{cep} & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{zx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} - \varepsilon_{cep} \end{vmatrix}. \quad (1.49)$$

Він характеризує змінення форми, оскільки об'ємна деформація (сума діагональних членів) дорівнює нулю.

Інваріанти тензора деформацій одержують аналогічно інваріантам тензора напружень:

$$I_1^* = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \ ; \quad (1.50)$$

$$I_2^* = -(\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx}) + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{4} + \frac{\varepsilon_{yz}^2}{4} + \frac{\varepsilon_{zx}^2}{4} = -(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1); \quad (1.51)$$

$$I_3^* = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{zx} & \frac{1}{2}\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ . \quad (1.52)$$

Як і в теорії напруженого стану, вводять поняття про інтенсивність деформацій зсуву

$$\gamma_i = \frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)} = \\ = \frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \quad (1.53)$$

Інтенсивність деформацій

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)} \ . \quad (1.54)$$

Аналогічно поняттю напрямного тензора напружень вводять поняття "напрямний тензор деформацій"

$$\bar{D}_\varepsilon = \frac{D_\varepsilon}{\gamma_i}. \quad (1.55)$$

Проводиться аналогія і за тензором швидкостей деформацій $\boldsymbol{T}_{\dot{\varepsilon}}$. У процесі формозмінення твердого тіла окремі його точки рухаються з певною швидкістю, яка залежить від положення цієї точки та часу:

$$\bar{V} = \bar{V}(x, y, z, t). \quad (1.56)$$

Якщо виділити всередині тіла прямокутний паралелепіпед з гранями, паралельними координатним площинам, то в процесі формозмінення тіла змінення кутів і довжини ребер паралелепіпеда відбуватиметься з певною швидкістю. Компоненти швидкості деформацій пов'язані зі швидкостями переміщення частинок рівняннями:

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x}\ ;\ \ \dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y};$$

$$\dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y}\ ;\ \ \dot{\varepsilon}_{yz} = \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z};$$

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z}\ ;\ \ \dot{\varepsilon}_{zx} = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}.$$

У цих рівняннях не враховують нелінійні члени, оскільки градієнти швидкостей незначні.

Компоненти швидкостей деформації утворюють тензор швидкостей деформацій

$$T_{\dot{\varepsilon}} = \begin{vmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xy} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yx} & \dot{\varepsilon}_{yy} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zx} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zy} & \dot{\varepsilon}_{zz} \end{vmatrix}. \qquad (1.57)$$

Якщо ввести швидкість деформації за рівнянням

$$\dot{\varepsilon}_{сер} = \frac{\dot{\varepsilon}_{xx} + \dot{\varepsilon}_{yy} + \dot{\varepsilon}_{zz}}{3}, \qquad (1.58)$$

то тензор швидкостей деформацій можна подати у вигляді суми двох тензорів:

$$T_{\dot{\varepsilon}} = \begin{vmatrix} \dot{\varepsilon}_{сер} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_{сер} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_{сер} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{сер} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xy} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yx} & \dot{\varepsilon}_{yy} - \dot{\varepsilon}_{сер} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zx} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zy} & \dot{\varepsilon}_{zz} - \dot{\varepsilon}_{сер} \end{vmatrix}. \qquad (1.59)$$

Другий член цього рівняння називають девіатором швидкостей деформацій:

$$D_{\dot{\varepsilon}} = \begin{vmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{cep} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xy} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yx} & \dot{\varepsilon}_{yy} - \dot{\varepsilon}_{cep} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zx} & \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zy} & \dot{\varepsilon}_{zz} - \dot{\varepsilon}_{cep} \end{vmatrix}. \quad (1.60)$$

Другий інваріант девіатора швидкостей деформацій визначається так:

$$\dot{\varepsilon}_{\gamma} = \frac{2}{3}\sqrt{(\dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{yy})^2 + (\dot{\varepsilon}_{yy} - \dot{\varepsilon}_{zz})^2 + (\dot{\varepsilon}_{zz} - \dot{\varepsilon}_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2 + \dot{\varepsilon}_{zx}^2)} \ . \quad (1.61)$$

Напрямний тензор

$$\bar{D}_{\dot{\varepsilon}} = \frac{D_{\dot{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_i} \ . \quad (1.62)$$

Тема 2. Діаграми розтягнення

Щоб одержати залежності між компонентами напружень і деформацій за межею пружних деформацій у загальному випадку складного напруженого стану, необхідно насамперед розглянути основні поняття, пов'язані з пружністю та пластичністю, діаграму розтягнення матеріалів, яка має дійсне уявлення про зв'язок між напруженням та деформацією при одновісному розтягненні та є основою розрахунків.

Основні механічні властивості матеріалів можна виявити вже при простому розтягненні. Стандартні зразки циліндричної форми розтягують з постійною швидкістю на розривній машині.

При поступовому зростанні сили розтягнення матеріал зразка знаходиться в пружному стані, поки напруження в ньому не досягне деякої величини σ_{ε} – границі пружності. Залежність між напруженням σ та деформацією ε для багатьох матеріалів є прямолінійною ділянкою. Потім матеріал переходить у пластичний стан, чому відповідає похила ділянка діаграми.

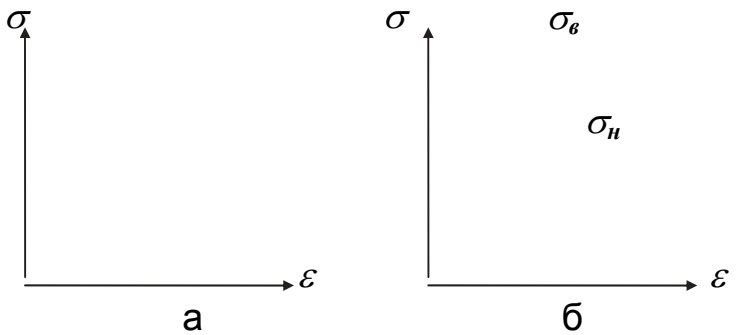


Рис. 2.1. Види діаграм

Для різних матеріалів перехід з одного стану в інший може бути різним: проходить поступово (рис. 2.1, а) або

починається з гострого піка рис. 2.1, б). Цей пік вважають аномалією. Він характеризує ті сплави, які по межах зерен мають крихкий скелет. При досягненні певного напруження цей скелет крихко руйнується.

Часто початку пластичного стану відповідає горизонтальна ділянка – площадка текучості, де напруження σ характеризується сталою величиною σ_T – границею текучості. Потім напруження поступово зростають до деякої величини $\sigma_в$ – границі міцності, після чого починається руйнування. Інколи площадка текучості відсутня: $\sigma_n = \sigma_m$ (див. рис. 2.1).

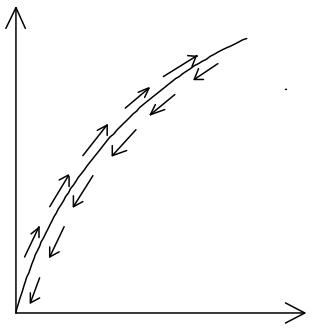


Рис. 2.2. Діаграма еластичного матеріалу

У теорії пружності розглядаються матеріали, в яких пружна ділянка діаграми розтягнення була прямолінійною. Але бувають матеріали (наприклад, гума, поліуретан), в яких деформації можуть бути пружними, а залежність між напруженням і деформацією – нелінійною. В таких матеріалах частково або повністю розвантаження відбувається так само, як і навантаження, але у зворотному напрямку (рис. 2.2).

Для пружно-пластичних матеріалів, які навантажені вище пружності, розвантаження відбувається по прямій, паралельній початковій прямолінійній ділянці (рис. 2.3). При повторному навантаженні розтягненням діаграма розтягнення (рис. 2.4) приблизно збігається з діаграмою розтягнення по всій її довжині, потім збігається з діаграмою першого навантаження. При цьому в результаті пластичного деформування границя пропорційності матеріалу підвищується. Однак це справедливо, якщо знаки першого та повторного навантажень збігаються. Прийнято говорити, що в результаті пластичного деформування відбувається зміцнення або наклеп матеріалу. На основі того, що розглянуто, можна зробити висновок: при напруженнях вище границі пропорційності матеріалу не буває взаємно однозначної відповідності між напруженнями та деформаціями. Це означає (діаграма на рис. 2.5), що одному й тому ж напруженню можуть відповідати деформації ε, ε_1 або ε_2 та інші залежно від того, при якому процесі напруження виникло – навантаженні чи розвантаженні, причому на це суттєво впливає величина напружень. Ось у чому і полягають основні відмінності пластичної деформації від пружної.

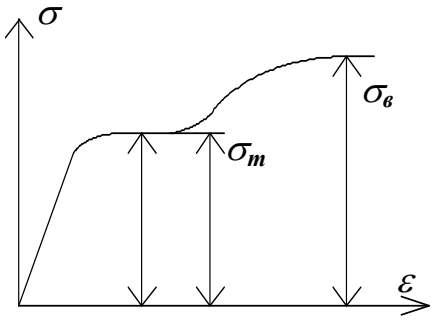


Рис. 2.3. Горизонтальна ділянка

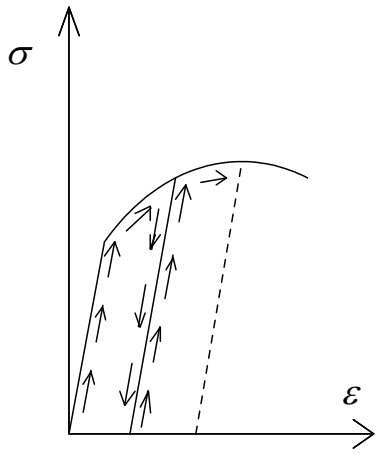


Рис. 2.4. Наклеп матеріалу

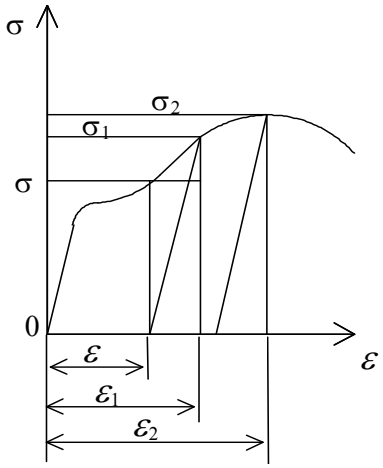


Рис. 2.5. Неоднозначність залежності $\sigma - \varepsilon$

Крім того, слід зазначити, що залежність в пружній стадії напружень і деформацій лінійна як при навантаженні, так і при розвантаженні. За границею пружності залежність між напруженнями та деформаціями при навантаженні нелінійна, а при розвантаженні – лінійна. Якщо на умовній діаграмі розтягнення матеріалу відсутня площадка текучості (як це має бути для більшості легованих сталей та кольорових сплавів), то вводиться поняття умовної границі текучості.

Умовною границею текучості називають напруження, при якому залишкова (пластична) деформація дорівнює відповідній величині. Цю величину приймають такою, що дорівнює 0,002 або 0,2 % (рис. 2.6).

Для умовної діаграми (рис. 2.7) гранична пластичність – величина δ, яка визначається як $\frac{\Delta l_{пр}}{l_0}$, де $\Delta l_{пр}$ – відносне подовження зразка при розриві. Чим матеріал пластичніший, тим більше величина δ.

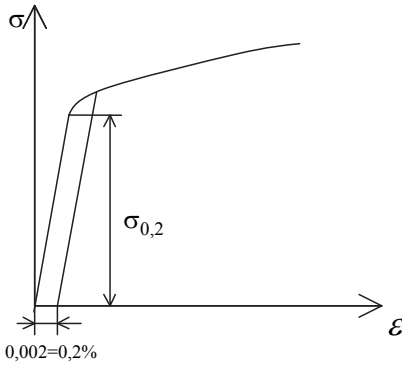


Рис. 2.6. Умовна границя пластичності

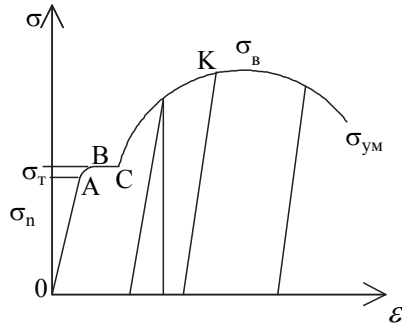


Рис. 2.7. Умовна діаграма

Відносне звуження $\varphi = \frac{F_0 - F}{F_0}$ при умовній діаграмі також характеризує пластичність. Розглядають також умовні діаграми стиснення (рис. 2.8).

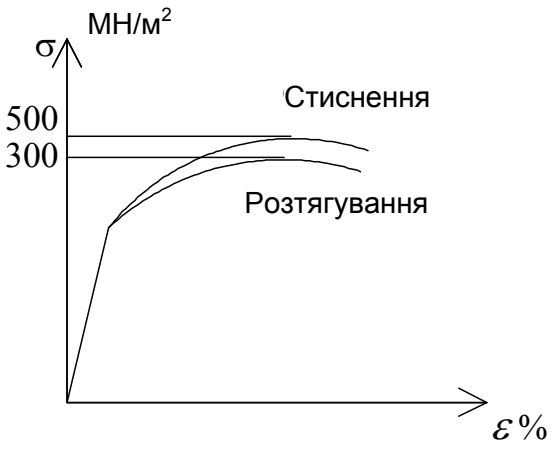


Рис. 2.8. Діаграми стиснення та розтягнення

Експериментально здійснити одновісне стиснення складніше, ніж одновісне розтягнення. При побудові графіка не враховується змінення площі поперечного перерізу зразка в процесі деформування. Цей графік називають умовною діаграмою стиснення.

Якщо умовні діаграми розтягнення та стиснення накласти одна на одну, то матимемо картину, зображену на рис. 2.8. Для більшості матеріалів при малих деформаціях приблизно можна вважати діаграми розтягнення і стиснення збіжними.

Ефект Баушингера

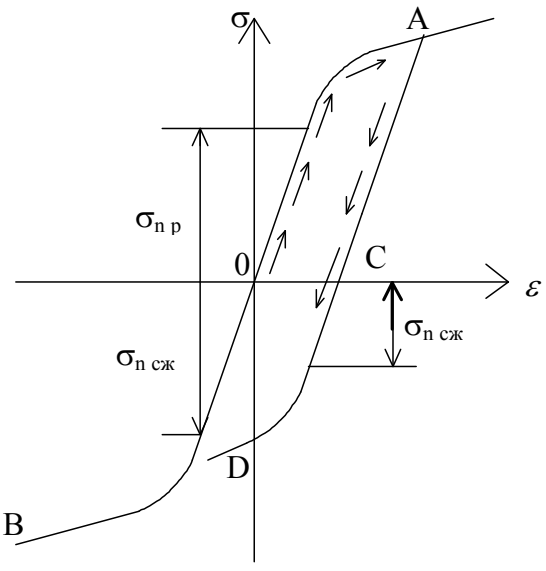


Рис. 2.9. Ефект Баушингера

Ефект Баушингера полягає в зменшенні границі пропорційності при повторному навантаженні, коли навантаження протилежні за знаком (рис. 2.9, де 0A – початкове розтягнення; 0B – початкове стиснення; AC – розвантаження; CD – повторне стиснення).

Ефект Баушингера пояснюється тим, що при малій пластичній деформації розтягнення одні зерна матеріалу деформуються пластично, а інші — пружно. У результаті цього після розвантаження виникають залишкові сили взаємодії між зернами. Деякі зерна перебувають у розтягнутому стані, інші – в стисненому. При наступному стисненні пластичні деформації виникають у першу чергу в раніше стиснених зернах. Цим і пояснюється зниження границі текучості.

Дійсні діаграми розтягнення матеріалів

При використанні формул, які відповідають умовній діаграмі розтягнення, не враховувались змінення площі поперечного перерізу зразка в процесі розтягнення. Насправді площа поперечного перерізу безперервно зменшується, а при деякій величині навантаження з'являється шийка, поперечний переріз якої інтенсивно зменшується при подальшому розтягненні. Чим більше величина деформації, тим більшою мірою дійсні напруження та деформації відрізняються від умовних. Тому для вирішення технологічних задач, які характеризуються великими деформаціями, необхідно мати дійсну діаграму розтягнення матеріалу. Для побудови дійсної діаграми розтягнення до появи шийки необхідно розтягальну силу P співвіднести до дійсної площі поперечного перерізу зразка $F_д$:

$$\sigma_д = \frac{P}{F_д}. \qquad (2.1)$$

Вимірювання дійсних розмірів поперечного перерізу зразка в процесі випробування його на розтягнення здійснювати незручно. Дійсна площа поперечного перерізу може залежати від початкової, якщо приблизно прийняти, що об'єм елемента зразка F_0dz при його деформації залишається незмінним. Оскільки після деформації довжина dz зразка $dz(1+\varepsilon)$, а площа F, то об'єм буде $Fdz(1+\varepsilon)$. Тоді

$$F_0dz = dz(1+\varepsilon)F_д. \qquad (2.2)$$

Звідки

$$F_Д = \frac{F_0 dz}{dz\,(1+\varepsilon)} = \frac{F_0}{1+\varepsilon}. \qquad (2.3)$$

Якщо підставити величину $F_Д$ у формулу (1.5), одержимо залежність

$$\sigma_д = \sigma\,(1+\varepsilon). \qquad (2.4)$$

При величині звичайної деформації менше 20 % різниця між логарифмічною деформацією та звичайною незначна. Оскільки шийка з'являється при звичайній деформації 10...15 %, то до цього моменту логарифмічну деформацію приблизно можна уважати такою, що дорівнює звичайній.

При цьому до появи шийки дійсна діаграма розтягнення відрізняється від умовної тільки по осі ординат і розташовується вище неї (рис. 2.10). Для визначення точки дійсної діаграми розтягнення матеріалу, яка відповідає деякій точці K умовної діаграми (див. рис. 2.10), необхідно через точку K провести горизонтальну лінію до перетину з віссю ординат в точці B, а останню точку з'єднати з точкою A на осі абсцис зліва від осі ординат на відстані одиниці. Тоді точка C перетину лінії AB з вертикаллю DK, яка проведена через точку K, визначає точку C дійсної діаграми, яка відповідає точці K на умовній. Ця графічна побудова випливає з подібності трикутників ACD та ABD, згідно з якою

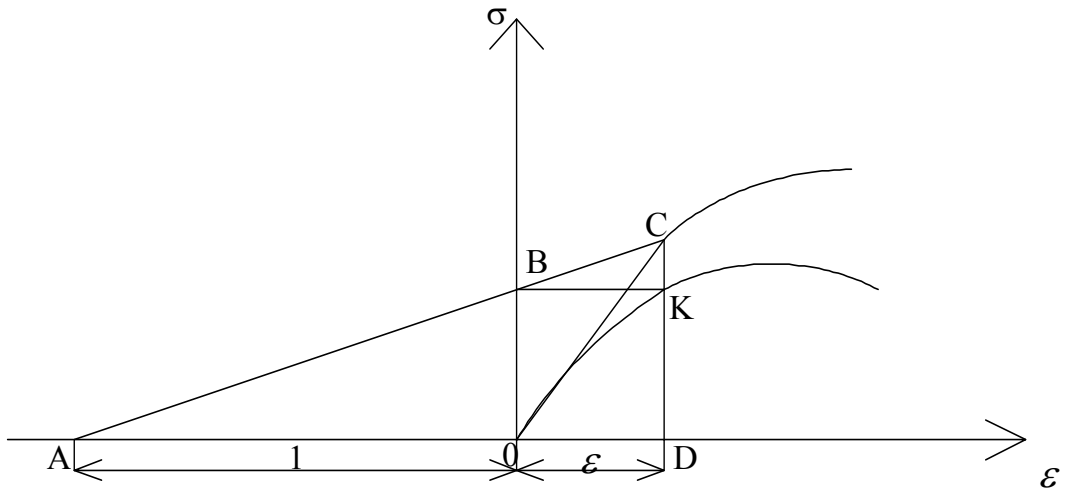


Рис. 2.10. Визначення точки дійсної діаграми

$$\frac{CD}{BO} = \frac{AD}{AO}$$

або $$\sigma_д = \sigma\ (1+\varepsilon).\qquad (2.5)$$

Тепер на дійсній діаграмі розтягнення знайдемо точку, яка відповідає границі міцності матеріалу. Диференціюючи вираз $\sigma = \frac{\sigma_д}{1+\varepsilon}$, одержуємо

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{1}{1+\varepsilon} \times \frac{d\sigma_д}{d\varepsilon} - \frac{\sigma_д}{(1+\varepsilon)^2}. \qquad (2.6)$$

При $$\sigma = \sigma_B \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$$

$$\left.\frac{d\sigma_д}{d\varepsilon}\right|_{\sigma=\sigma_{ср}} = \left.\frac{\sigma_д}{1+\varepsilon}\right|_{\sigma=\sigma_{ср}}. \qquad (2.7)$$

Відповідно до формули (2.6) визначаємо

$$\left.\frac{d\sigma_д}{d\varepsilon}\right|_{\sigma=\sigma_{ср}} = \sigma_д. \qquad (2.8)$$

Звернемо увагу на те, що площадка текучості, яка на умовній діаграмі паралельна осі абсцис, на дійсній діаграмі трохи похила. Однак цей нахил незначний і при розрахунках його можна не враховувати.

Після появи шийки дійсну діаграму розтягнення будують з використанням таких залежностей:

$$\sigma_д = \sigma_i = \frac{1}{1+\frac{r_1}{4R}} \cdot \frac{P}{F}, \qquad (2.9)$$

де ***P*** – зусилля розтягнення зразка;

F – площа найменшого поперечного перерізу;

r_1 – радіус цього поперечного перерізу;

R – радіус кривизни контуру шийки в точці найменшого поперечного перерізу;

$$\varepsilon_i = \ln\ (1+\varepsilon) = \ln\frac{F_0}{F}\ , \qquad (2.10)$$

де ε_i – інтенсивність деформацій.

Для побудови такої ділянки діаграми необхідно в процесі випробування вимірювати мінімальний діаметр шийки та радіус кривизни її контуру в точці найменшого перерізу.

Розглянемо характеристику ідеалізованих суцільних середовищ. Пружнопластичне середовище (рис. 2.11, а) характеризується лінійною залежністю між напруженнями і деформаціями, на ділянці 0А зв'язок між напруженнями і деформаціями виражається законом Гука

$$\sigma = E\,\varepsilon\,,$$

де *E* – модуль пружності 1-го роду (модуль Юнга).

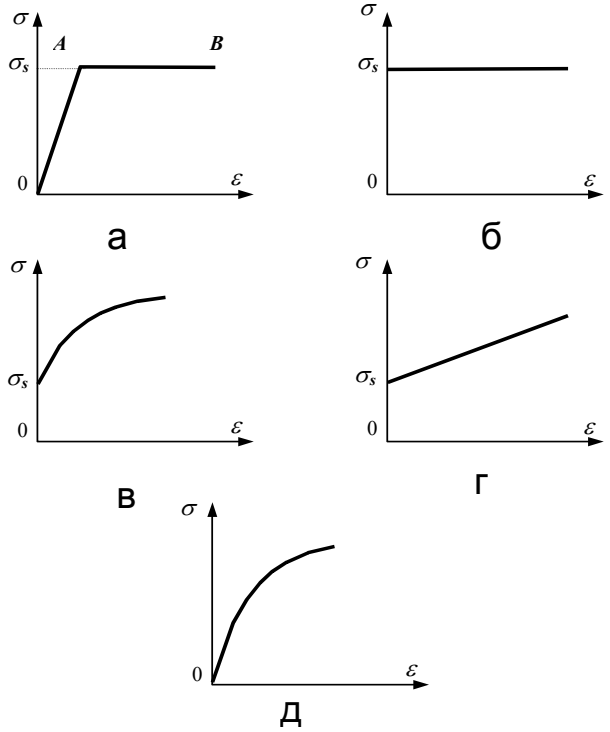


Рис. 2.11. Діаграма «σ–ε» для ідеалізованих середовищ

На ділянці *AB* середовище деформується необоротно при незмінному значенні напруження, яке називається границею текучості σ_S. Механічна енергія, витрачена на пластичну деформацію, перетворюється на теплову, яка розсіюється в навколишньому просторі. Тому після зняття зовнішнього навантаження пружні деформації зникають внаслідок накопиченої пружної енергії, а пластичні деформації залишаються, причому на ділянці *AB* немає однозначної залежності між напруженнями і деформаціями.

Жорсткопластичне середовище (рис. 2.11, б) відрізняється від ідеально пластичного тим, що в початковий момент відсутня пружна деформація. Матеріал поводиться як абсолютно тверде нестисливе тіло до тих пір, поки напруження не досягнуть границі текучості σ_S, після чого починається незворотна деформація.

Жорсткопластичне середовище описується формулою

$$\sigma = \sigma_S ,$$

тобто між напруженням і деформацією немає однозначної залежності.

Нестисливе зміцнювальне середовище (рис. 2.11, в) є більш простим випадком. Незворотна деформація такого середовища починається, коли напруження досягає границі текучості σ_S. Для подальшого розвитку процесу деформації необхідно, щоб напруження збільшувалося. Зв'язок напружень з деформаціями визначається таким законом:

$$\sigma = \sigma_S + 3E_1 \varepsilon ,$$

де $E_1 = \frac{1}{3}\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$ – модуль зміцнення. Окремим випадком такого середовища є лінійно зміцнювальне середовище (рис. 2.11, г).

Ідеально в'язке середовище (рис. 2.11, д) деформується при будь-якому значенні напруження. Швидкість деформації $\dot{\varepsilon}$ такого середовища пропорційна величині напруження; деформація незворотна і не супроводжується зміненням об’єму. Зв'язок напруження зі швидкістю деформації описується виразом

$$\sigma = \mu \dot{\varepsilon},$$

де μ – коефіцієнт в'язкості.

Тема 3. Умови пластичності

Існує кілька гіпотез, що визначають умови переходу напруженого тіла від пружного стану до пластичного.

З наявних теорій щодо визначення умов пластичності найбільшого поширення набули теорії максимальних дотичних напружень і енергетична теорія.

Теорія максимальних дотичних напружень називається також умовою сталості головного дотичного напруження або умови сталості різниці головних нормальних напружень. Відповідно до цієї теорії (Тріска і Сен-Венана) пластичний стан тіла настає тоді, коли одне з головних дотичних напружень досягає величини, яка дорівнює половині границі текучості металу в момент деформації, або одна з різниць двох головних нормальних напружень дорівнює величині границі текучості металу незалежно від значення двох інших різниць головних напружень, тобто

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_s}{2}$$

або

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s, \qquad (3.1)$$

де σ_s – справжнє напруження текучості при лінійному напруженому стані з урахуванням зміцнення металу і температурно-швидкісного фактора.

На користь теорії Тріска і Сен-Венана свідчать не тільки висновки теоретичного аналізу, з якого випливає, що великий вплив на пластичне деформування роблять саме дотичні напруження, що досягають свого максимального значення в майданчиках, нахилених до напрямку дії зовнішнього навантаження під кутом 45 °, а й експериментальні спостереження ліній ковзань Чернова – Людерса, які мають таке ж просторове орієнтування.

Але слід враховувати ту обставину, що теорія максимальних дотичних напружень може бути застосована тільки для плоского напруженого стану, оскільки в ній не враховується вплив середнього за величиною нормального напруження σ_2 .

Енергетична теорія полягає в умові постійних питомої енергії зміни форми. Відповідно до цієї теорії (теорія Губера – Мізеса – Генки) для переходу металу в пластичний стан необхідно накопичити в одиниці його об'єму деяку постійну кількість потенціальної енергії незалежно від схеми напруженого стану.

Питома потенціальна енергія деформації (повна) A_n являє собою суму питомої потенціальної енергії змінення форми $A_ф$ і питомої потенціальної енергії змінення об'єму A_o .

Розглянемо область пружних деформацій, що передували початку пластичної деформації. З теорії пружності відомо, що питома потенціальна енергія деформації дорівнює половині скалярного додатка тензора напружень на тензор деформації, тобто

$$\boldsymbol{A_n} = \frac{1}{2}\boldsymbol{T_\sigma T_\varepsilon} \;\text{ и }\; \boldsymbol{A_o} = \frac{1}{2}\boldsymbol{T_\sigma^0 T_\varepsilon^0}. \qquad (3.2)$$

Після підстановки у вираз (3.2) значень тензорів і враховуючи відомі з теорії пружності рівняння, що зв'язують деформації і напруження,

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{1}{\boldsymbol{E}}\left[\sigma_1 - \mu\left(\sigma_2 + \sigma_3\right)\right], \\
\varepsilon_2 &= \frac{1}{\boldsymbol{E}}\left[\sigma_2 - \mu\left(\sigma_3 + \sigma_1\right)\right], \qquad (3.3) \\
\varepsilon_3 &= \frac{1}{\boldsymbol{E}}\left[\sigma_3 - \mu\left(\sigma_1 + \sigma_2\right)\right],
\end{aligned}$$

а також виконавши відповідні перетворення, отримуємо

$$\boldsymbol{A_n} = \frac{1}{2\boldsymbol{E}}\left[\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2\right) - 2\mu\left(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1\right)\right]$$

і

$$\boldsymbol{A_o} = \frac{1}{6\boldsymbol{E}}\left[\left(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3\right)^2 - 2\mu\left(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3\right)^2\right],$$

звідки

$$A_{ф} = A_{п} - A_{о} = \frac{1+\mu}{6E}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 + \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right], \qquad (3.4)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль пружності 1-го роду.

При лінійному напруженому стані, коли $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, формула (3.4) набуває вигляду

$$A_{ф} = \frac{1+\mu}{3E}\sigma_1^2. \qquad (3.5)$$

Аналізуючи вираз (3.5), робимо висновок про те, що при лінійному розтягуванні матеріал починає пластично деформуватися тоді, коли питома потенціальна енергія пружного змінення форми досягне певного значення, а саме:

$$A_{ф} = \frac{1+\mu}{3E}\sigma_s^2. \qquad (3.6)$$

Оскільки питома потенціальна енергія не залежить від схеми напруженого стану, то праві частини виразів (3.4) і (3.6) можна прирівняти, в результаті отримуємо

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s$$

або

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s. \qquad (3.7)$$

Вираз (3.7) являє собою математичний запис енергетичної умови пластичності Губера – Мізеса – Генки. Енергетична умова пластичності показує, що з настанням пластичного стану інтенсивність напружень σ_i дорівнює напруженню текучості σ_s. Енергетична умова пластичності є загальною порівняно з умовою пластичності Тріска і Сен-Венана, оскільки враховує вплив середнього за величиною головного нормального напруження σ_2, що знаходиться в межах $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ або $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$.

Розглянемо три окремих випадки, коли $\sigma_2 = \sigma_1$; $\sigma_2 = \sigma_3$ і $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$.

При $\sigma_2 = \sigma_1$ або $\sigma_2 = \sigma_3$ вираз (3.7) перетвориться до вигляду

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s = 1{,}15\sigma_s = \beta\sigma_s, \qquad (3.8)$$

де β – коефіцієнт Лоде, що змінюється в межах від 1 до 1,15.

Таким чином, якщо не враховувати вплив середнього за величиною головного нормального напруження, то умову пластичності можна записати у вигляді

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

або

$$\tau_{31} = ½\sigma_s \ . \qquad (3.9)$$

У загальному випадку вираз (3.9) має вигляд

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = \beta\, \sigma_s$$

і

$$\tau_{max} = ½\, \beta\, \sigma_s. \qquad (3.10)$$

Вирази (3.10) свідчать про те, що з енергетичної умови пластичності в окремому випадку (без урахування середнього за величиною нормального напруження) можна отримати умову пластичності Тріска і Сен-Венана.

Тема 4. Фізичні основи теорії пластичності. Деформаційні теорії та теорії течії

Фізичне тіло в класичній статистичній механіці — це система великої кількості частинок, які взаємодіють між собою та примежовими тілами і розташовуються в полі зовнішніх сил. Щодо такого тіла вважають справедливими класичні закони механіки системи матеріальних точок. При цьому сила взаємодії між частинками з'являється при зближенні та зникає при віддаленні на відстань порядку *a*. Наприклад, моделлю твердого тіла при низьких температурах є система щільноупакованих частинок, які здійснюють невеликі теплові коливання біля положення рівноваги. Наведений якісний опис системи не можна доповнити кількісними методами аналітичної механіки системи матеріальних точок через велику їх кількість, оскільки інформація про індивідуальний рух точок нічого не пояснює про макроскопічні властивості системи. Спеціальний підхід до цієї проблеми забезпечують методи статистичної механіки, які дозволяють ввести в механіку суцільного середовища (МСС) необхідні поняття – густина, швидкість, внутрішні напруження, енергія, температура, ентропія та кількість теплоти.

У МСС тіло зображують у вигляді деякої субстанції матеріального континууму, який безперервно заповнює об'єм геометричного простору. Нескінченно малий об'єм тіла також називають частинкою. Вводяться поняття густини, переміщення та швидкості, внутрішньої енергії, температури, ентропії та потоку тепла як безперервно диференціюючих функцій координат і часу.

При вивченні руху матеріального середовища слід користуватися двома системами координат: системою координат спостерігача і лагранжевою системою, яка є єдиним полем з тілом, що розглядається, рухається, деформується разом з ним і є тому криволінійною та неортогональною. Вивчення деформації тіла зводиться до вивчення деформації супутньої системи, що дозволяє виявити причину деформування частин тіла та простежити за зміненням їх механічних і фізико-хімічних властивостей.

Для замкнених систем (що не взаємодіють з зовнішніми тілами, які не обмінюються енергією з навколишнім середовищем) використовують функції змінних Лагранжа, які називають інтегралами руху. Інтеграл руху системи називають адитивним, якщо він дорівнює сумі інтегралів руху части-

нок, що складають систему. Адитивних інтегралів руху чотири – маса, імпульс, момент імпульсу та енергія. Як показує досвід, ці чотири величини, що характеризують стан системи, не змінюються з часом. Це дозволяє сформулювати в ньютонівській механіці закони збереження маси, імпульсу, моменту імпульсу та енергії, які зумовлені основними властивостями матерії та руху, а також простору та часу як основних форм буття матерії.

Що стосується МСС, яка будується на основі ньютонівської механіки, то закони збереження енергії приводять до суттєвих результатів. Із закону збереження маси випливає рівняння нерозривності як необхідна умова існування рухомого та деформівного середовища як суцільного. Із закону збереження імпульсу випливають диференціальні рівняння руху суцільного середовища, які є основою розрахунків його руху та деформації, із закону збереження моменту кількості руху — симетрія тензора напружень, що суттєво спрощує динамічне рівняння суцільного середовища. Закон збереження енергії є основою екстремальних принципів суцільного середовища та енергетичних методів розрахунку напружено-деформованого стану.

Вводяться фундаментальні поняття внутрішніх напружень і деформацій та постулюється наявність зв'язку між ними та температурою, яка відображає статистику руху та взаємодії атомів.

У механіці суцільного середовища (МСС) використовують основні рівняння динаміки системи і статистичної механіки, у першу чергу – закон збереження маси, імпульсу енергії та балансу ентропії.

Закон збереження маси

Тіло називається матеріальним, якщо воно має властивості інерції. Величина, яка залежить від кількості речовини в тілі й визначає рівень його інертності, називається масою тіла. Маса – це властивість суцільного середовища. Якщо об'єм складається з однакових частинок середовища, то такий об'єм називають індивідуальним.

Фундаментальним законом механіки Ньютона є закон збереження маси будь-якого індивідуального об'єму: $m = const$ або $\frac{dm}{dt} = 0$.

У механіці суцільного середовища замість маси використовують поняття густини. Дійсну густину середовища в точці $\boldsymbol{P}$ визначають як межу відношення маси Δm елементарного об'єму ΔW до величини цього об'єму при $\Delta \boldsymbol{W} \to \boldsymbol{0}$:

$$\rho = \lim_{W \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta W} = \frac{dm}{dW}. \qquad (4.1)$$

У процесі руху суцільного середовища густина індивідуальної частинки може і не зберігатися, оскільки її об’єм у різні моменти часу може бути різним унаслідок деформації.

Рівняння нерозривності

Розглянемо рух суцільного середовища в нерухомій (інерційній) системі координат. Вважаємо, що густина ρ та швидкість $\bar{V}$ — безперервні функції координат і часу: $\rho = \rho(\bar{r},t)$, $\bar{V} = \bar{V}(\bar{r},t)$. На фізичну природу та стан середовища обмеження не поширюється.

Якщо змінення маси за одиницю часу в об'ємі W дорівнює $\iiint\limits_W \rho dW$, то за одиницю часу всередині поверхні S змінення маси може бути

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint\limits_W \rho dW . \tag{4.2}$$

Оскільки об’єм W фіксований, то

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint\limits_W \rho dW = \iiint\limits_W \frac{\partial \rho}{\partial t} dW . \tag{4.3}$$

Це змінення маси всередині нерухомої поверхні S дорівнюватиме потоку маси через поверхню S за одиницю часу, який на основі того, що потік рідини через поверхню S дорівнює $\iint\limits_S \bar{V}\bar{n}dS$, а для будь-якого векторного поля — $\iint\limits_S \bar{a}\bar{n}dS$, визначимо як

$$\oiint\limits_S \rho\bar{V}\bar{n}ds . \tag{4.4}$$

Таким чином,

$$\iiint\limits_W \frac{\partial \rho}{\partial t} dW = -\oiint\limits_S \rho\bar{V}\bar{n}ds . \tag{4.5}$$

Використовуючи формулу Остроградського – Гаусса маємо рівняння

$$\iiint\limits_W \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\,\rho\bar{V}\right)dW = 0 , \tag{4.6}$$

справедливе при будь-якому об’ємі інтегрування, у тому числі й при макроскопічно нескінченно малому об’ємі. При безперервності підінтегрального виразу

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\,\rho\bar{V} = 0 . \tag{4.7}$$

Отже, одне з основних рівнянь МСС, яке називається рівнянням нерозривності (безперервності) в змінних Ейлера, може мати іншу форму, якщо застосувати оператор матеріального диференціювання

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_k \frac{\partial}{\partial x_k} \tag{4.8}$$

до функції густини $\rho = \rho(\bar{r}, t)$:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + V_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} \ . \tag{4.9}$$

Тоді, враховуючи, що

$$div\, \rho \bar{V} = \rho div \bar{V} + V_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k}, \tag{4.10}$$

і підставляючи $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ та $div\, \rho \bar{V}$ в (4.10), одержуємо рівняння нерозривності у вигляді

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho div \bar{V} \ . \tag{4.11}$$

Це співвідношення накладає обмеження на швидкості точок суцільного середовища і справедливе при великих переміщеннях точок середовища.

Оскільки для нестисненого середовища будь-який його індивідуальний об'єм залишається постійним за величиною протягом руху, з умови збереження маси випливає, що густина в частинці нестисненого середовища $\frac{d\rho}{dt} = const$, а з (4.11) одержимо рівняння нестисливості суцільного середовища

$$div \bar{V} = 0 \tag{4.12}$$

або

$$\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0 . \tag{4.13}$$

Рівняння кількості руху. Рівняння руху та рівноваги

Основними динамічними характеристиками руху матеріальної частинки є кількість руху ($m\bar{V}$) та кінетична енергія ($\frac{1}{2} m\bar{V}^2$).

Для рухомої під дією суми сил *P* матеріальної частинки постійної маси другий закон Ньютона можна записати у вигляді рівняння кількості руху:

$$\frac{d}{dt} m\bar{V} = \rho \bar{V} dW , \tag{4.14}$$

яке формулюється як похідна часу від кількості руху матеріальної частинки, що дорівнює сумі всіх сил, які діють на цю частинку.

Розглянемо рухомий індивідуальний об'єм суцільного середовища *W* у момент часу *t.* Нехай на цей об'єм діють розподілені по поверхні зовнішні

сили з густиною $\bar{\sigma}_n$. По всій області середовища визначається поле швидкостей $\bar{V} = \bar{V}(\bar{r}, t)$. Загальна кількість руху системи мас в об'ємі W визначається інтегралом

$$\iiint_W \rho \bar{V} dW . \tag{4.15}$$

Внутрішні сили згідно з третім законом Ньютона зрівноважуються. Якщо зовнішні сили на систему не діють, то за законом збереження імпульсу кількість руху системи не змінюється за часом:

$$\frac{dmV}{dt} = 0 \quad . \tag{4.16}$$

Суму зовнішніх масових і поверхневих сил, які діють на суцільне середовище в об'ємі W, запишемо для головного вектора масових сил

$$\iiint_W \rho \bar{f} dW , \tag{4.17}$$

і для головного вектора поверхневих сил

$$\oiint_S \bar{\sigma}_n dS . \tag{4.18}$$

Внутрішні сили, які діють між частинками даного об'єму, підпорядковуються третьому закону Ньютона про дію та протидію.

Узагальнюючи рівняння кількості руху (4.14) на випадок кінцевого індивідуального об'єму W суцільного середовища, одержуємо

$$\frac{d}{dt} \iiint_w \rho \bar{V} dW = \iiint_w \rho \bar{f} dW + \oiint_s \bar{\sigma}_n dS . \tag{4.19}$$

Визначимо диференціальну форму рівняння руху суцільного середовища, використавши вираз для симетричного тензора напружень $\sigma_{ni} = \sigma_{ij} n_j$ і застосовуючи формулу Остроградського – Гаусса

$$\oiint_S \sigma_{ni} dS = \oiint_S \sigma_{ij} n_j dS = \iiint_W \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dW . \tag{4.20}$$

Підставивши (4.20) у формулу (4.19), одержимо

$$\iiint_W \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \right) dW = \frac{d}{dt} \iiint_W \rho \bar{V}_i dW . \tag{4.21}$$

Після об'єднання під знаком інтеграла у формулі (4.21) одержуємо теорему змінення кількості руху в інтегральній формі:

$$\iiint_W \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i - \rho \frac{dV_i}{dt} \right) dW = 0 . \tag{4.22}$$

Це рівняння справедливе для будь-якого об'єму інтегрування, наприклад для макроскопічно нескінченно малого. Отже, підінтегральна функція має дорівнювати нулю:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i - \rho \frac{dV_i}{dt} = 0$$

або

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{dV_i}{dt} \ . \qquad (4.23)$$

Рівняння (4.24) називається рівнянням руху і є основним диференціальним рівнянням суцільного середовища. Воно справедливе для будь-яких суцільних середовищ: твердих, рідких, газоподібних. У виразі (4.23) всі величини, задані в змінних Ейлера, є функціями координат x_1, x_2, x_3 та часу t. Індивідуальну похідну $\frac{\partial V_i}{\partial t}$ визначаємо залежно від оператора матеріального диференціювання.

У випадку рівноваги, коли відсутні прискорення ($\frac{\partial V_i}{\partial t} = 0$) або інерційними членами можна знехтувати ($\rho \frac{\partial V_i}{\partial t} = 0$), рівняння руху (4.23) перетворюється на рівняння рівноваги: $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = 0$. Якщо можна знехтувати і масовими силами, то $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$. (4.24)

Помноживши рівняння (4.14) векторно зліва на радіус-вектор матеріальної частинки, одержимо рівняння кількості руху

$$\frac{d}{dt}(\bar{r} \times m\bar{V}) = \bar{r} \times \bar{P}, \qquad (4.25)$$

яке є наслідком другого закону Ньютона. Векторна величина ($\bar{r} \times m\bar{V}$) називається моментом кількості руху матеріальної частинки.

Рівняння моментів кількості руху можна записати для системи матеріальних частинок масами m_i, які рухаються зі швидкістю V_i:

$$\frac{d}{dt}\sum_{i=1}^{i=n}(\bar{r}_i \times m_i\bar{V}_i) = \iiint_W (\bar{r} \times \rho\bar{f})dW + \oiint_S (\bar{r} \times \bar{\sigma}_n)dS, \qquad (4.26)$$

і узагальнити для кінцевого індивідуального об'єму W суцільного середовища, замкненого поверхнею S:

$$\frac{d}{dt}\iiint_W (\bar{r} \times \rho\bar{V})dW = \iiint_W (\bar{r} \times \rho\bar{f})dW + \oiint_S (\bar{r} \times \bar{\sigma}_n)dS. \qquad (4.27)$$

У розглянутому класичному випадку за відсутності внутрішніх моментів кількості руху і розподілених масових і поверхневих пар рівняння моментів кількості руху доводить, що тензор напружень симетричний.

Рівняння припливу тепла. Перший закон термодинаміки

У процесах обробки металів тиском відбувається перетворення механічної енергії не тільки шляхом виконаної роботи. Істотну роль відіграє також перетворення енергії за допомогою теплообміну.

Термодинаміка вивчає закономірності перетворення енергії. Одним з основних понять термодинаміки є поняття "стан системи" та "параметри стану".

Поняття термодинамічної системи визначає сукупність матеріальних тіл, що взаємодіють між собою і навколишнім середовищем. Щоб визначити конкретні фізичні умови, за яких розглядається речовина, вводять термодинамічні характеристики (параметри) стану речовини, що являють собою властивості речовини, які не залежать від її кількості. Параметри стану поділяють на зовнішні та внутрішні. Стан, до якого за даних зовнішніх умов прагне система, називається термодинамічною рівновагою. Якщо рівновага не встановилася і в системі існують градієнти параметрів стану, то останній називається нерівноважним.

Між параметрами стану системи має існувати залежність, що називається рівнянням стану**:**

$$f(\mu_1, \mu_2, ..., \mu_n) = 0. \qquad (4.28)$$

Між двома станами системи можуть відбуватися два види процесів: зворотний і незворотний

Зворотний процес — це процес, у результаті здійснення якого в прямому та зворотному напрямках система повертається у початковий стан, не спричиняючи при цьому змінення стану зовнішніх тіл.

Незворотний процес не можна здійснити в зворотному напрямку, не спричиняючи подібних змін (процес тертя). Незворотні процеси завжди приводять до розсіювання механічної енергії (дисипації).

Деформоване тіло в процесі ОМТ можна розглядати як незамкнуту термодинамічну систему, в якій відбувається нерівноважний незворотний термодинамічний процес.

Перший закон термодинаміки – енергія не зникає і не виникає знов, вона лише перетворюється з одного виду в інший.

У МСС головне значення має приплив частки енергії механічної за природою та теплової енергії.

Згідно з першим законом термодинаміки існує така однозначна функція $E = E(\mu_1, \mu_2, ..., \mu_n)$, що називається повною енергією системи, повний диференціал якої дорівнює сумі елементарних робіт зовнішніх поверхневих і масових сил $dA^{(e)}$, елементарного припливу тепла $dQ^{(e)}$ та елементарного припливу інших видів енергії dQ^{*}**:**

$$dE = dA^{(e)} + dQ^{(e)} + dQ^{*}, \tag{4.29}$$

де

$$dA^{(e)} = dA^{(e)}_{пов} + dA^{(e)}_{m}.$$

Змінення повної енергії в системі відбувається через змінення її кінетичної dE_m та внутрішньої dU_m енергії:

$$dE = dE_m + dU_m. \tag{4.30}$$

Підставивши (4.31) в (4.30), одержимо вираз першого закону термодинаміки:

$$dE_m + dU_m = dA^{(e)} + dQ^{(e)} + dQ^{*}. \tag{4.31}$$

Тут dU_m — повний диференціал параметрів стану, оскільки U_m – функція стану.

Для теплоізольованого (адіабатичного) процесу $dQ^{(e)} = 0$, і, якщо $dQ^{*} = 0$, співвідношення (4.32) перетворюється на закон збереження механічної енергії. Враховуючи це і підставляючи (4.29) в (4.31), одержимо рівняння

$$dU_m = -dA^{(i)}_{пов} + dQ^{(e)} + dQ^{*}, \tag{4.32}$$

яке називається рівнянням припливу тепла і може замінити закон збереження енергії (4.32). Якщо $dQ^{(e)} = 0$ і $dQ^{*} = 0$, то (4.33) перетворюється на

$$dU_m = -dA^{(i)}_{пов} = \iiint_w \sigma_{i\gamma}\xi_{i\gamma} dtdw .$$

Для плавного процесу, коли прискоренням можна знехтувати, змінення кінетичної енергії дорівнює нулю $(dE_m = 0)$. У цьому випадку, порівнюючи (4.32) при $dE_m = 0$ і (4.33), очевидно, що для таких процесів елементарна робота зовнішніх сил дорівнює елементарній роботі внутрішніх поверхневих сил протилежним знаком:

$$dA^{(e)} = -dA^{(i)}_{пов} \tag{4.33}$$

або

$$dU_m = dA^{(e)} + dQ^{(e)} + dQ^{*}. \tag{4.34}$$

Складемо рівняння припливу тепла (4.32) для нескінченно малої частинки суцільного середовища. З цією метою введемо елементарні притоки зовнішніх енергій до одиниці маси середовища $dq^{(e)}$ і $dq^{(*)}$. Розділимо (4.32) на Δm і спрямуємо Δm до нуля. Густина роботи внутрішніх поверхневих сил дорівнює

$$-\frac{1}{\rho}\sigma_{ij}\xi_{ij}dt, \tag{4.35}$$

де ξ – симетричний тензор,

$$\xi_{ij} = \xi_{ji} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_J}{\partial X_i}\right),$$

звідки одержуємо диференціальне рівняння припливу тепла

$$dU = \tfrac{1}{\rho}\sigma_{ij}\xi_{ij}dt + dq^{(e)} + dq^{*}, \qquad (4.36)$$

де *U* – густина внутрішньої енергії.

Рівняння (4.36) є універсальним рівнянням, що використовується для різних процесів, і зв'язуючою ланкою між МСС та термодинамікою. Якщо не можна знехтувати тепловими ефектами, то закон збереження механічної енергії слід замінити першим законом термодинаміки, крім того, до кількості основних рівнянь слід додати рівняння теплопровідності.

Рівняння теплопровідності

Будь-який процес переносу теплової енергії у просторі називається теплообміном. Тепло може передаватися трьома шляхами: теплопровідністю (передача тепла молекулами, атомами, електронами внаслідок нерівномірності температури в тілі), конвекцією та випромінюванням. У МСС найбільше значення має процес теплопровідності.

Введемо поняття вектора потоку тепла $\vec{q} = \vec{q}(x_1, x_2, x_3, t)$. Цей вектор характеризує напрямок передачі тепла (спрямований у бік зменшення температури) і за величиною дорівнює кількості тепла, що віддається за одиницю часу через виділену в суцільному середовищі довільно орієнтовану площину dS з одиничним вектором зовнішньої нормалі $\vec{n}$, і дорівнює $q_n dSdt$. Загальний приплив тепла $dQ^{(e)}$ до об'єму W суцільного середовища через замкнуту поверхню S, що обмежує його, визначається так:

$$dQ^{(e)} = -\iint_S q_n dSdt = -\iint_S \vec{q}\vec{n}dSdt. \qquad (4.37)$$

Знак мінус означає, що у випадку припливу тепла ($dQ > 0$) до об'єму, що розглядається, вектори $\vec{q}$ і $\vec{n}$ утворюють кут, більший за $\pi/2$, а скалярний добуток $\vec{q}\cdot\vec{n}$ буде від'ємним. Перетворимо рівняння (4.37) за формулою Остроградського – Гаусса:

$$dQ^{(e)} = -\iiint_W div\vec{q}dWdt. \qquad (4.38)$$

Оскільки розв'язання конкретних задач МСС з використанням рівняння припливу тепла (4.34) інколи математично неможливе, часто використовують додаткові припущення щодо ідеалізації процесу. Однією з таких ідеалізацій є адіабатичний процес ($dQ^{(e)} = 0$), в якому буде відсутній приплив тепла та теплообмін між частинками. Ідея такого процесу пов'язана з розглядом теплоізольованих тіл або процесів, що швидко відбуваються. Іншою ідеалізацією є ізотермічний процес ($dT/dt = 0$), в якому теплообмін

настільки інтенсивний, а стан змінюється настільки повільно, що температуру усіх частин тіла можна вважати постійною. Рівняння *dT/dt* = 0 разом з рівнянням стану середовища замінює рівняння припливу тепла, за допомогою якого можна обчислити кількість тепла $dQ^{(e)}$, що підводиться до кожної частинки. Інколи до ізотермічних відносять такі процеси, для яких температура частинок є функцією часу. Вона однакова для всіх частинок.

Розглянемо у деформованому суцільному середовищі виділений об'єм *W*, обмежений поверхнею *S*. Вважаємо, що середовище є розсіючим і тому робота внутрішніх поверхневих сил цілком перетворюється у тепло. Оскільки зовнішній приплив нетеплових видів енергії відсутній ($dQ^* = 0$), то рівняння припливу тепла (4.32) запишемо так:

$$dU_m = -dA_{пов}^{(i)} + dQ^{(e)}. \qquad (4.39)$$

Таким чином, елементарна робота $dA_{пов}^{(i)}$ і приплив тепла $dQ^{(e)}$ відповідно до (4.39) витрачатимуться на збільшення внутрішньої енергії суцільного середовища.

Для визначення змінення внутрішньої енергії dU_m виділимо нескінченно малий об'єм ***dW*** масою ρdW. За час ***dt*** об'єм ***dW*** нагрівається на $dT/dt\,dt$ градусів, на що потрібна така кількість тепла:

$$c\rho dW \frac{dT}{dt} dt, \qquad (4.40)$$

де $c = \frac{dq^{(e)}}{dT}$ – масова теплоємність (кількість тепла, що необхідно підвести до одиниці маси середовища, щоб підвищити його температуру на один градус за Цельсієм). Кількість тепла — це змінення внутрішньої енергії маси ρdW за час *dt*.

Інтегруючи (4.40), знаходимо

$$dU_m = \iiint_W c\rho \frac{dT}{dt} dW dt. \qquad (4.41)$$

Підставляємо вирази (4.41) для dU_m і (4.38) для $dQ^{(e)}$ у рівняння припливу тепла (4.36). Переносячи всі доданки в ліву частину, скорочуючи на ***dt***, одержуємо

$$\iiint_W \left(c\rho \frac{dT}{dt} - \sigma_{ij}\xi_{ij} + div\ \vec{q} \right) dW = 0 \qquad (4.42)$$

або

$$c\rho \frac{dT}{dt} - \sigma_{ij}\xi_{ij} + div\ \vec{q}=0. \qquad (4.43)$$

За законом теплопровідності Фур'є $\vec{q} = -\lambda$ grad T, де λ – коефіцієнт теплопровідності.

Оскільки вектори $\vec{q}$ і *grad* T мають протилежні напрямки, то $\lambda > 0$.

Підставляючи (4.42) в (4.43), одержуємо рівняння теплопровідності

$$c\rho\frac{dT}{dt} - \sigma_{ij} - div\ (\lambda\ \text{grad T}) = 0. \qquad (4.44)$$

Якщо λ =*const,* то

$$\frac{dT}{dt} = \chi\ \text{div grad T} + \frac{1}{c\rho}\sigma_{ijq}\xi_{ij}, \qquad (4.45)$$

де $\chi = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності.

У випадку нерухомого середовища індивідуальну похідну $\frac{dT}{dt}$ можна замінити на локальну $\frac{\partial T}{\partial t}$.

До рівняння (4.45) входять константи інтегрування, і тому воно неоднозначне. При розв'язуванні (4.45) необхідно сформулювати крайову задачу. Задання крайових умов полягає у формулюванні початкових умов (зазвичай при t = 0), необхідних тільки при нестаціонарних процесах теплопровідності, та граничних умов, що задаються на поверхнях, які обмежують рухоме середовище. При заданні граничних умов і початкового температурного поля рівняння теплопровідності має єдиний розв'язок.

Другий закон термодинаміки. Ентропія

Перший закон термодинаміки, що якісно характеризує перетворення енергії з якісної сторони, не визначає умов можливості перетворення енергії, оскільки згідно з першим законом обидва напрямки у проходженні процесів перетворення механічної енергії повністю в тепло і тепла повністю в механічну енергію рівноможливі.

Усі процеси незворотні та проходять у напрямку встановлення в системі рівноваги. Твердження про неможливість одержання енергії завдяки тілам, що знаходяться в термодинамічній рівновазі, є основним змістом другого закону термодинаміки.

При розгляді циклу Карно для теплових машин можна одержати кількісну характеристику другого закону. Повна робота дорівнює: $A = Q^{(e)} = Q_1 - Q_2$. Існує універсальне твердження, що температура як характеристика ізотерми та енергія пов'язані таким співвідношенням:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (4.46)$$

Таким чином, тепло Q_1 при T_1 еквівалентне Q_2 при T_2, адже якщо поглинається Q_1, то завжди виділяється Q_2. Можна сказати, що при зворотних процесах $\frac{Q}{T}$ поглинається стільки тепла, скільки й виділяється. Ця величина називається ентропією. Змінення ентропії для зворотного циклу дорівнює нулю.

Для будь-якого циклу

$$\oint_L \frac{dQ^{(e)}}{T} \le 0, \tag{4.47}$$

де $\frac{dQ^{(e)}}{T} = dS$ – змінення ентропії.

Таким чином,

$$TdS = dQ^{(e)} + dQ', \tag{4.48}$$

де dQ' – некомпенсоване тепло.

Для одиниці маси

$$Tds = dq^{(e)} + dq', \tag{4.49}$$

де $s = \frac{S}{m}$ – ентропія одиниці маси;

$dq' = \frac{dQ'}{dm} \ge 0$.

Для замкнутої системи ентропія максимальна, коли система переходить до стану термодинамічної рівноваги:

$$s = k \ln N, \tag{4.50}$$

де k – стала Больцмана;

N – міра ймовірності стану (кількість можливих станів, що відповідають даному стану).

Перехід з нерівноважного стану у рівноважний являє собою перехід і стану, що здійснюється меншою кількістю способів, у стан, який здійснюється більшою кількістю способів. Можна об'єднати рівняння припливу тепла (4.32) і другий закон термодинаміки (4.48):

$$TdS \ge dU_m + dA_{пов}^{(i)} + dQ^*. \tag{4.51}$$

Окрім рівняння припливу тепла зв’язуючою ланкою між МСС та термодинамікою є рівняння стану. При деформації суцільних середовищ із внутрішнім тертям (в’язкопружні, в’язкопластичні) усередині кожного елемента таких середовищ виникає ентропія. Саме ця обставина приводить до термодинаміки незворотних процесів.

Фундаментальні рівняння механіки суцільних середовищ

На основі фундаментальних законів природи (закону збереження маси, кількості руху та енергії) можна записати п'ять незалежних рівнянь:

1 – рівняння нерозривності;

2, 3, 4 – три рівняння руху;

5 – рівняння припливу тепла.

Цю систему п’яти рівнянь можна доповнити другим законом термодинаміки, необхідним для побудови конкретних моделей суцільних середовищ. Остаточно маємо систему універсальних рівнянь руху суцільного середовища:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \ div \ v = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{dv_i}{dt}; \qquad (4.52)$$

$$dU = \frac{1}{\rho}\sigma_{ij}\xi_{ij}dt + dq^{(e)} + dq^*;$$

$$Tds = dq^{(e)} + dq', \quad dq' \geq 0.$$

Якщо знехтувати взаємодією механічних і термомеханічних процесів і не враховувати розсіювання енергії, то систему фундаментальних рівнянь можна записати у вигляді

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \ div \ \vec{v} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{dv_i}{dt}. \qquad (4.53)$$

Це система чотирьох диференціальних рівнянь у похідних з десятьма невідомими функціями координат і часу. Невідомими залишаються густина ρ, три компоненти швидкості v_i (або переміщення u_i) та шість незалежних компонент тензора напружень σ_{ij}. При цьому граничні умови задано.

Для замикання системи необхідно ще шість визначальних рівнянь, що містять тільки динамічні та кінематичні параметри і часто являють собою співвідношення між напруженнями та деформаціями. Ці співвідношення характеризують фізичні властивості суцільного середовища, що вивчається, і їх називають механічними рівняннями стану. Крім того, поле температур зазвичай вважається відомим або ж рівняння теплопровідності розв’язуються окремо і незалежно від механічної задачі. Для ізотермічних процесів температура припускається постійною і задача є чисто механічною.

У загальному випадку, коли механічні та теплові явища взаємозв'язані, слід звертатися до повної системи рівнянь. За припущенням, що масові сили f_i і елементарні припливи енергії dq^* задані, в системі невідомими функціями є десять величин ρ, v_i (або u_i), σ_{ij}, три компоненти вектора густини теплового потоку q_i, густина внутрішньої енергії U, густина ентропії s та абсолютна температура.

Таким чином, для довизначення системи треба знайти ще десять рівнянь. Шість з них є визначальними (рівняннями стану), що встановлюють математичні співвідношення між статичними, кінематичними та термодинамічними параметрами, які описують поведінку суцільного середовища за наявності механічних і термодинамічних дій. З інших чотирьох рівнянь три будуть являти собою співвідношення для задання закону теплопровідності, а одне – термодинамічне рівняння стану.

Оскільки реальні середовища реагують на навантаження надзвичайно складним чином, до рівняння стану вводять ідеалізовані середовища.

Для розв'язання систем диференціальних рівнянь у частинних похідних необхідно задати початкові та крайові умови таким чином, щоб існувало одне й тільки одне певне рішення у деякому інтервалі часу і в усій області, що охоплюється замкнутою поверхнею, на якій задано крайові умови.

Розвантаження матеріалу після пластичної деформації. Теорема Ільюшина про розвантаження. Деформаційна теорія пластичності

Розглянемо одновісне розтягнення зразка та його розвантаження (рис. 4.1). Припустимо, що у розтягнутому стрижні в міру навантаження з'явилося напруження (точка *B*), причому $\sigma > \sigma_{пр}$. Нехай цьому напруженню відповідає деформація ε_1. Якщо тепер частково розвантажити зразок на величину напруження σ', то у стрижні залишиться напруження (точка *C*) $\tilde{\sigma} = \sigma_1 - \sigma'$.

Напруженню $\tilde{\sigma}$ відповідає одновісне подовження $\tilde{\varepsilon}$, що залишилося у зразку після часткового розвантаження:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 - \varepsilon', \tag{4.54}$$

де ε' – зменшення деформації при розвантаженні.

Оскільки розвантаження зразка відбувається за пружним законом (*BC* паралельна *AO*), то ε' можна визначити за формулою

$$\varepsilon' = \frac{\sigma'}{E}, \qquad (4.55)$$

тобто величина $\boldsymbol{\varepsilon'}$ така ж сама, як і при пружному навантаженні від нуля до напруження $\boldsymbol{\sigma'}$.

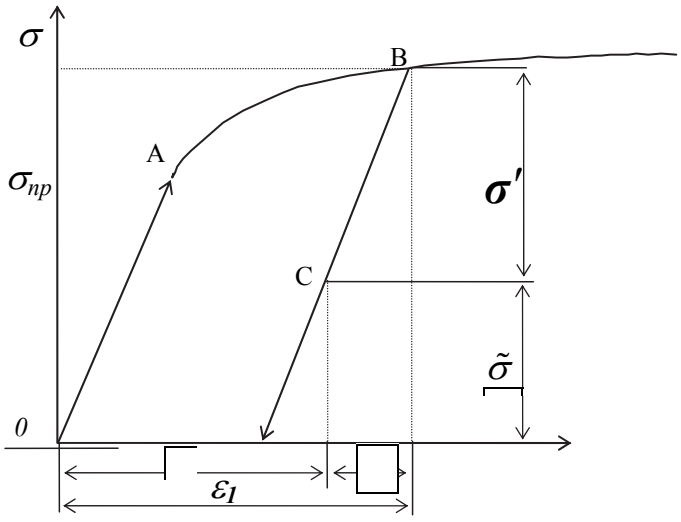


Рис. 4.1. Теорема Ільюшина

Таким чином, для обчислення залишкової деформації стрижня необхідно з повної деформації, що відповідає найбільшому напруженню, відняти пружну деформацію, яка відповідає значенню напруження, на величину якого зменшилося найбільше напруження. Ця закономірність, очевидна при одновісному розтягненні стрижня, залишається справедливою й у загальному випадку просторового напруженого стану тіла, якщо виконуються умови, що формулюються у так званій теоремі про розвантаження, доведеній А. А. Ільюшиним. Розглянемо її докладніше.

Переміщення точки тіла (а також деформації та напруження) у деякий момент розвантаження дорівнюють різниці між їхніми значеннями у момент початку розвантаження та пружними переміщеннями (деформаціями, напруженнями), що з'явились у ненавантаженому тілі під впливом зовнішніх сил, що дорівнюють різниці навантажень до та після розвантаження. При цьому необхідно, щоб навантаження та розвантаження були простими. Розвантаження, як і навантаження тіла, називається простим, якщо зовнішні сили у процесі пасивної деформації змінюються пропорційно одному параметру.

Такий принцип простого віднімання від повних початкових значень переміщень, деформацій та напружень тих їхніх значень, що відповідають зазначеним вище фіктивним силам (та повинні підраховуватись у припущенні лінійно-пружного тіла, що деформувалось), має обмеження. Його не можна застосовувати тоді, коли при розвантаженні з наступним переходом навантаження через нуль узагальнене напруження, що має інший знак, ніж при першому навантаженні, досягає або перевищує значення границі пружності. Слід зазначити, що з урахуванням так званого ефекту Баушингера ця нова границя може виявитися меншою за звичайну границю пружності.

З цієї теореми випливає, що при повному звільненні від зовнішніх сил, що залишились у тілі, напруження, деформації та переміщення дорівнюють різниці між їхніми значеннями, визначеними за теорією пластичності для заданих зовнішніх сил, та значеннями напружень, деформацій та переміщень, що для цих самих зовнішніх сил віднімаються за теорією пружності.

Основи теорії малих пружно-пластичних деформацій

Розрахунки за границями пружності при одновісному напруженому стані виконують на основі діаграми матеріалу. У випадку неодновісного напруженого стану необхідно мати залежності компонентів напружень від компонентів деформацій за границями пружності. Ці залежності встановлюються теоріями пластичності.

Основна задача теорії пластичності частково аналогічна задачі теорії пружності – за заданими зовнішніми силами або деформаціями деяких частинок тіла знайти деформації та напруження у точках тіла; визначити залишкові деформації, якщо навантаження частково або повністю зняте; з'ясувати, якими будуть деформації при повторних навантаженнях; визначити навантаження, при яких відбувається руйнування.

Всі теорії пластичності поділяють на дві групи. Теорії однієї групи називаються деформаційними. Вони утворюють подібні згідно з законами для пружної області залежності між компонентами тензора напружень і тензора деформації, тобто напруження зв'язуються повною накопиченою величиною пластичної деформації, а остання залежить не тільки від миттєвого напруження, але й від пластичної передісторії.

У другій групі розглядаються зв'язки між нескінченно малими приростами деформацій та напружень, а також самими напруженнями. В окремому випадку одержують залежності швидкостей деформацій від напружень. Ці теорії називають теоріями течії.

Протиріччя цих теорій розкрито у роботах А. А. Ільюшина. Доведено, що у випадку активної деформації, що з’являється при простому навантаженні, та у випадку малих деформацій всі відомі теорії пластичності є окремими випадками загальної та всі вони справедливі тільки при простому навантаженні. Нижче викладається теорія малих пружно-пластичних деформацій, що достатньо вірогідно описує властивості твердих тіл при малих пружних і пластичних деформаціях.

Всі ж теорії пластичності, основані на умові пластичності, не дозволяють при заданих зовнішніх силах та знайдених напруженнях визначити деформації. Окрім зовнішніх сил мають бути задані й переміщення на межі області пластичності, що не завжди можливо, а також треба враховувати властивість зміцнення матеріалу.

Математичний апарат теорії малих пружно-пластичних деформацій складають такі рівняння:

1. Три статичних рівняння, єдині для пружного та пластичного тіл:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}+\mathrm{X}_\rho=\rho\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2};$$
$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial \mathbf{x}}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial \mathbf{y}}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}+\mathrm{Y}_\rho=\rho\frac{\partial^2 \varsigma}{\partial t^2};\qquad (4.56)$$
$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}+\mathrm{Z}_\rho=\rho\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2},$$

де *X, Y, Z* – проекції об'ємної сили;

$\upsilon,\varsigma,\omega$ – компоненти зміщень.

2. Шість геометричних співвідношень, також спільних для механіки деформівного тіла:

$$\varepsilon_x=\frac{\partial \upsilon}{\partial x};\varepsilon_x=\frac{\partial \varsigma}{\partial y};\varepsilon_z=\frac{\partial \omega}{\partial z};$$
$$\gamma_{xy}=\frac{\partial \upsilon}{\partial y}+\frac{\partial \varsigma}{\partial x};\gamma_{yz}=\frac{\partial \varsigma}{\partial z}+\frac{\partial \omega}{\partial y};\gamma_{zx}=\frac{\partial \omega}{\partial x}+\frac{\partial \upsilon}{\partial z}.\qquad (4.57)$$

3. Шість фізичних рівнянь, що характеризують конкретні властивості пружно-пластичного тіла, виражених через компоненти напружень та деформацій:

$$\sigma_x-\sigma_{c\mathrm{p}}=2G'\varepsilon_x;\sigma_y-\sigma_{cp}=2G'\varepsilon_y;\sigma_z-\sigma_{cp}=2G'\varepsilon_z;\qquad (4.58)$$
$$\tau_{xy}=G'\gamma_{xy};\tau_{yz}=G'\gamma_{yz},\tau_{zx}=G'\gamma_{zx},$$

де *G*' – узагальнений модуль деформації:

$$G'=G\left(1-\omega\left(\varepsilon\right)\right)=\frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}.\qquad (4.59)$$

Тут ω – функція Ільюшина.

4. Вирази для інтенсивності напружень і деформацій і рівняння, що зв'язує їх між собою:

$$\sigma_i=E\left(1-\omega\right)\varepsilon_i\ .\qquad (4.60)$$

Основні положення теорії малих пружно-пластичних деформацій є узагальненням деяких висновків закону Гука для неодновісного напруженого стану. В основу теорії покладено такі гіпотези.

1. Об'ємна деформація прямо пропорційна середньому нормальному напруженню, причому коефіцієнт пропорційності дорівнює модулю пружної об'ємної деформації. Іншими словами, відносне змінення об'єму є пружною деформацією та пропорційне середньому тиску, оскільки через пластичну деформацію змінення об'єму не відбувається.

Відносне змінення об'єму

$$\Delta = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3k}, \tag{4.61}$$

де k – об'ємний модуль пружності:

$$k = \frac{E}{3(1-2\nu)}.$$

Тут ν – коефіцієнт Пуассона.

Оскільки $\sigma_{ср} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ і $\Delta = 3\varepsilon_{ср} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$, то

$$\sigma_{ср} = 3k\varepsilon_{ср}. \tag{4.62}$$

Експериментально доведено, що змінення об'єму зазвичай невелике, і тому ним можна знехтувати. У такому випадку можна говорити про нестисливість матеріалу та записати умову цього

$$\varepsilon_{ср} = 0.$$

Як випливає з наведених формул, припущення щодо рівності об'ємної деформації нулю еквівалентне припущенню, що об'ємний модуль пружності дорівнює нескінченності або що коефіцієнт поперечної деформації дорівнює половині.

2. Напрямки головних нормальних напружень збігаються з напрямками головних лінійних деформацій, а головні дотичні напруження пропорційні головним кутовим деформаціям. Іншими словами, компоненти девіатора деформацій пропорційні компонентам девіатора напружень, а самі вони коаксіальні (напрямні тензори напружень і деформацій збігаються). Згідно з цим

$$\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_{ср}}{\sigma_x - \sigma_{ср}} = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_{ср}}{\sigma_y - \sigma_{ср}} = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_{ср}}{\sigma_z - \sigma_{ср}} = \frac{\frac{\gamma_{xy}}{2}}{\tau_{xy}} = \frac{\frac{\gamma_{yz}}{2}}{\tau_{yz}} = \frac{\frac{\gamma_{zx}}{2}}{\tau_{zx}} = \psi, \tag{4.63}$$

де ψ – деяка функція напружень.

У границях пружності ψ — стала величина, що дорівнює

$$\psi = \frac{1}{2G}. \tag{4.64}$$

З наведеного співвідношення (4.63) одержуємо

$$\begin{aligned} \varepsilon_x - \varepsilon_{ср} &= \psi(\sigma_x - \sigma_{ср}); \gamma_{xy} = 2\psi\tau_{xy}; \\ \varepsilon_y - \varepsilon_{ср} &= \psi(\sigma_y - \sigma_{ср}); \gamma_{yz} = 2\psi\tau_{yz}; \\ \varepsilon_z - \varepsilon_{ср} &= \psi(\sigma_z - \sigma_{ср}); \gamma_{zx} = 2\psi\tau_{zx}. \end{aligned} \tag{4.65}$$

Якщо підставити компоненти цих деформацій у вираз для інтенсивності деформацій, враховуючи при цьому співвідношення для інтенсивності напружень, то одержимо

$$\psi = \frac{2}{3}\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}. \qquad (4.66)$$

Рівняння (4.65) за зовнішнім виглядом схожі з аналогічними залежностями між напруженнями та деформаціями у пружній області, але значно складніші за них, бо сталий коефіцієнт $2G$ замінено в них на відношення інтенсивності напружень до інтенсивності деформацій, а останні самі є функціями напружень і деформацій.

Рівняння (4.65) відображають також пропорційність компонентів девіатора напружень компонентам девіатора деформацій і пропорційність головних деформацій головним дотичним напруженням, а тому й співвісність напрямних девіаторів напружень і деформацій:

$$\bar{D}_\sigma = \bar{D}_\varepsilon \quad \text{або} \quad \frac{1}{\tau_i} D_\sigma = \frac{2}{\gamma_i} D_\varepsilon .$$

Оскільки $\tau_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_i$ та $\gamma_i = \sqrt{2}\varepsilon_i$, то

$$D_\sigma = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} D_\varepsilon , \qquad (4.67)$$

що у проекціях на координатні осі й приводить до рівняння (4.65).

3. Інтенсивність напружень для кожного матеріалу є цілком певною і не залежить від виду напруженого стану та є функцією інтенсивності деформацій. Відповідно до цього для визначення залежності інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій можна скористатися результатами випробувань на розтягнення. Графік залежності інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій називатимемо діаграмою деформування матеріалу.

Вирази для інтенсивності напружень і деформацій при одновісному напруженому стані мають вигляд

$$\sigma_i = \sigma ;$$
$$\varepsilon_i = \varepsilon - \varepsilon_{сер} . \qquad (4.68)$$

Враховуючи, що при одновісному розтягненні $\sigma_{сер} = \frac{\sigma}{3}$, а також що

$$\sigma_{сер} = 3k\varepsilon_{сер} ,$$

де $$k = \frac{E}{3(1-2\nu)},$$

одержуємо

$$\varepsilon_i = \varepsilon - \frac{1-2\nu}{3E}\sigma . \qquad (4.69)$$

За допомогою цих формул можна за діаграмою розтягнення матеріалу обчислити величини ε_i та $\boldsymbol{\sigma_i}$.

Розглянемо поділ деформації на пружну та пластичну. У границях пружності $\psi = \dfrac{1}{2G}$, тому у формулах (4.65) візьмемо

$$\psi = \frac{1}{2G} + \varphi . \tag{4.70}$$

Оскільки

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}; k = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \sigma_{сер} = 3k\varepsilon_{сер},$$

одержимо

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right] + \varphi(\sigma_x - \sigma_{сер});$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} + 2\varphi\tau_{zx}; \tag{4.71}$$

$$\varphi = \frac{3}{2}\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} - \frac{1}{2G}.$$

Інші доданки у рівнянні (4.72) є компонентами пластичної деформації, які визначають за формулами

$$\varepsilon_{сер} = \varphi(\sigma_x - \sigma_{сер}),$$

$$\gamma_{zxp} = 2\varphi\tau_{xz}. \tag{4.72}$$

Підставляючи у вираз для інтенсивності деформацій компоненти пластичної деформації та враховуючи співвідношення для інтенсивності напружень, одержуємо

$$\varepsilon_{ip} = \frac{2}{3}\varphi\sigma_i, \tag{4.73}$$

тому

$$\varphi = \frac{2}{3}\frac{\varepsilon_{ip}}{\sigma_i}. \tag{4.75}$$

Тоді залежності (4.72) набувають вигляду

$$\varepsilon_{xp} = \frac{2}{3}\frac{\varepsilon_{ip}}{\sigma_i}(\sigma_x - \sigma_{сер}), \tag{4.76}$$

$$\gamma_{zxp} = 3\frac{\varepsilon_{ip}}{\sigma_i}\tau_{zx}\,.$$

4. Тіло ізотропне. Припущення, що ізотропія є природним розширенням допущень класичної теорії пружності на пластичну область, є задовільним. Водночас при різких зміненнях напрямку навантаження може спостерігатися значний вплив анізотропії.

Тема 5. Наближені методи розв'язання задач пластичного деформування

Розгляд різних пружно-пластичних і пластичних задач показує, що їх розв'язання пов'язане зі значними труднощами. Тому в теорії пластичності ще більшою мірою, ніж у теорії пружності, мають значення приблизні методи розв'язання. Найпоширенішими з них є варіаційні методи, а також методи, в яких пружно-пластична задача зводиться до послідовності пружних задач у результаті застосування процесу послідовних наближень.

Розглянемо так званий метод змінних параметрів пружності. В основі цього методу лежить подання залежностей деформацій від напружень з теорії пружно-пластичних деформацій у формі узагальненого закону Гука, згідно з яким параметри пружності залежать від напруженого стану у точці й тому різні для різних точок тіла. Використовуючи співвідношення

$$\varepsilon_{сер} = \frac{\sigma_{сер}}{3K} + \theta\alpha \quad , \tag{5.1}$$

де θ — лінійна деформація, що виникає при нагріванні (температурна деформація);

α – коефіцієнт лінійного розширення;

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)};$$

$$\sigma_x - \sigma_{сер} = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i}(\varepsilon_x - \varepsilon_{сер});\ \tau_{xy} = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}\gamma_{xy}, \tag{5.2}$$

маємо

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E^*}[\sigma_x - \nu^*(\sigma_y + \sigma_z)\ \ ] + \theta;\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G^*}, \tag{5.3}$$

де E^*, G^*, ν^* – так звані змінні параметри пружності:

$$E^* = \frac{\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}}{1+\frac{1-2\nu}{3E}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}}; \quad \nu^* = \frac{\frac{1}{2}-\frac{1-2\nu}{3E}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}}{1+\frac{1-2\nu}{3E}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}};$$

$$G^* = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}. \qquad (5.4)$$

З цих формул випливає, що зв'язок між змінними параметрами пружності мають такий самий вигляд, що й для пружних сталих E, G і ν, а саме:

$$G^* = \frac{E^*}{2\left(1+\nu^*\right)}. \qquad (5.5)$$

В окремому випадку для так званого нестисливого тіла, в якого $\nu = \frac{1}{2}$,

$$E^* = 3G^* = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad \nu^* = \frac{1}{2}, \qquad (5.6)$$

тобто змінний модуль пружності збігається із січним модулем, а змінний коефіцієнт поперечної деформації дорівнює 0,5.

Для розв'язання пружно-пластичної задачі згідно з методом змінних параметрів пружності використовується процес послідовних наближень. У першому наближенні приймається, що змінні параметри пружності дорівнюють параметрам пружності, і розв'язується пружна задача, у результаті чого визначаються напруження та деформації першого наближення $\sigma_{X1},\ldots,\tau_{ZX1},\ldots,\gamma_{ZX1}$. За цими величинами у кожній точці тіла з допомогою таких формул розраховують інтенсивності напружень і деформацій у першому наближенні σ_{i1} і e_{i1}:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_x-\varepsilon_y\right)^2+\left(\varepsilon_y-\varepsilon_z\right)^2+\left(\varepsilon_z-\varepsilon_x\right)^2+\frac{3}{2}\left(\gamma_{xy}^2+\gamma_{yz}^2+\gamma_{zx}^2\right)};$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2+\left(\sigma_z-\sigma_x\right)^2+6\left(\tau_{xy}^2+\tau_{yx}^2+\tau_{zx}^2\right)}. \qquad (5.7)$$

У координатах e_i, σ_i напружений та деформований стани деякої точки тіла зображуються точкою 1, що лежить на промені, тангенс кута нахилу якого пропорційний величині $3G$. У другому наближенні вноситься поправка для величини $3G$. Вона береться такою, що дорівнює відношенню інтенсивності

напруження $\boldsymbol{\sigma}_{i1}^{*}$ до відповідної інтенсивності деформацій за діаграмою деформування:

$$3G_1^{*} = \frac{\sigma_{i1}^{*}}{\varepsilon_{i1}}. \qquad (5.8)$$

За величинами $\boldsymbol{\sigma}_{i1}^{*}$ і ε_{i1} визначають також параметри E_1^{*} та $\boldsymbol{\nu}_1^{*}$. Параметри E_1^{*}, G_1^{*} та $\boldsymbol{\nu}_1^{*}$ будуть різними у різних точках тіла. Таким чином, виникає задача визначення напружень у неоднорідному тілі, параметри пружності у різних точках якого різні. Далі розв'язують цю задачу, визначають напруження та деформації $\sigma_{x2},\ldots,\tau_{zx2},\ldots,\varepsilon_{x2},\ldots,\gamma_{zx2}$, що є другим наближенням. За цими величинами у кожній точці тіла з допомогою формул (5.7) підраховують інтенсивності напружень і деформацій у другому наближенні σ_{i2}, ε_{i2}.

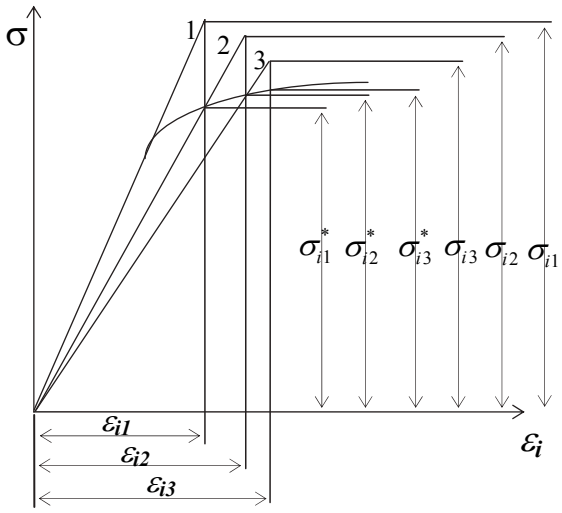


Рис. 5.1. Метод змінних параметрів пружності

У координатах σ_i, ε_i напружений та деформований стани деякої точки тіла зображуються точкою 2, що лежить на промені, тангенс кута нахилу якого пропорційний величині $3G$.

У третьому наближенні величину $3G$ приймають такою, що дорівнює відношенню інтенсивності напружень $\boldsymbol{\sigma}_{i2}^{*}$ до відповідної інтенсивності деформацій за діаграмою деформування:

$$3G_2^{*} = \frac{\sigma_{i2}^{*}}{\varepsilon_{i2}}. \qquad (5.9)$$

За величинами $\boldsymbol{\sigma}_{i2}^{*}$ та ε_i знаходять також параметри $\boldsymbol{E}_2^{*}$ та $\boldsymbol{\nu}_2^{*}$, що використовуються для визначення напружень і деформацій третього наближення $\sigma_{x3},\ldots,\tau_{zx3},\ldots,\varepsilon_{x3},\ldots,\gamma_{zx3}$.

Розрахунки необхідно продовжувати доти, доки одержані результати розрахунків *n*-го наближення відрізнятимуться від результатів розрахунків *n-1*-го наближення на задану величину з необхідною точністю. Розрахунки показують, що процеси завжди є збіжними.

Теорема Клапейрона

У теорії пружності теорема Клапейрона формулюється таким чином: робота зовнішніх сил на відповідних їм переміщеннях дорівнює подвоєній

потенціальній енергії деформації тіла.

Розглянемо узагальнення цієї теореми у випадку нелінійних залежностей між напруженнями та деформаціями. Припустимо, що тіло займає об'єм *W*, обмежений поверхнею *S*, і на одній частині поверхні задано поверхневі сили $X_\nu Y_\nu Z_\nu$, а на іншій – переміщення $\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z$.

Робота прикладених до тіла зовнішніх сил на відповідних їм переміщеннях буде

$$A = \int_W \left(Xu_x + Yu_y + Zu_z \right) dW + \int_S \left(X_\nu u_x + Y_\nu u_y + Z_\nu u_z \right) ds , \quad (5.10)$$

де *X, Y* і *Z* – компоненти об'ємної сили, а u_x, u_y, u_z – компоненти переміщення точок тіла.

Підставимо у другий інтеграл співвідношення з рівняння рівноваги елементарного об'єму і перетворимо його за формулою Остроградського – Гаусса. Тоді

$$\int_S \left(X_\nu u_x + Y_\nu u_y + Z_\nu u_z \right) dS = \int_S \left[\begin{array}{l} \left(\sigma_x u_x + \tau_{xy} u_y + \tau_{xz} u_z \right) l + \left(\tau_{yx} u_x + \sigma_y u_y + \tau_{yz} u_z \right) m + \\ + \left(\tau_{zx} u_x + \tau_{zy} u_y + \sigma_z u_z \right) n \end{array} \right] dS ,$$

де *l, m, n* – напрямні косинуси нормалі до поверхні *S*.

Додаючи цю величину до першого інтеграла та використовуючи диференціальні рівняння рівноваги і залежності компонентів деформації від компонентів переміщення, одержуємо

$$A = \int_W \left(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \nu_{xy} + \tau_{yz} \nu_{yz} + \tau_{zx} \nu_{zx} \right) dW . \quad (5.11)$$

Ця формула є узагальненням теореми Клапейрона. У границях пружності вираз у круглих дужках дорівнює подвійній потенціальній енергії деформації, віднесеної до одиниці об'єму *W*:

$$2\Pi = \sigma_x \varepsilon_x + ... + \tau_{zx} \nu_{zx} . \quad (5.12)$$

З виразу (5.11) одержуємо

$$A = 2 \int_W \Pi \, dW . \quad (5.13)$$

Таким чином, робота зовнішніх сил на відповідних їм переміщеннях дорівнює подвійній потенціальній енергії деформації тіла.

Принцип мінімуму повної енергії

Зробимо такі ж вхідні припущення, що й у попередньому підрозділі. Надамо точкам нескінченно малі переміщення $\delta u_x, \delta u_y, \delta u_z$, сумісні з крайовими умовами. Робота прикладених до тіла зовнішніх сил на можливих переміщеннях дорівнює

$$\delta A = \int_W \left(X\delta u_x + Y\delta u_y + Z\delta u_z \right) dW + \int_S \left(X_\nu \delta u_x + Y_\nu \delta u_y + Z_\nu \delta u_z \right) dS. \quad (5.14)$$

Зазначимо, що другий інтеграл фактично береться лише по тій частині поверхні, на якій задано поверхневі сили, бо на іншій її частині, де задано переміщення, їхні варіації дорівнюють нулю. Підставляючи у другий інтеграл (5.10) співвідношення з рівняння рівноваги елементарного об'єму, маємо

$$\int_S \left(X_\nu \delta u_x + Y_\nu \delta u_y + Z_\nu \delta u_z \right) dS =$$

$$= \int_S \left[\begin{array}{l} \left(\sigma_x \delta u_x + \tau_{xy} \delta u_y + \tau_{xz} \delta u_z \right) l + \left(\tau_{yx} \delta u_x + \sigma_y \delta u_y + \tau_{yz} \delta u_z \right) m + \\ + \left(\tau_{zx} \delta u_x + \tau_{zy} \delta u_y + \sigma_z \delta u_z \right) n \end{array} \right] dS. \quad (5.15)$$

Перетворюючи цей інтеграл за формулою Остроградського – Гаусса та використовуючи диференціальні умови рівноваги й залежності компонентів деформацій від компонентів переміщення, одержуємо

$$\delta A = \int_W \left(\sigma_x \delta\varepsilon_x + \sigma_y \delta\varepsilon_y + \sigma_z \delta\varepsilon_z + \tau_{xy} \delta\gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta\gamma_{yz} + \tau_{zx} \delta\gamma_{zx} \right) dW. \quad (5.16)$$

Введемо поняття потенціалу деформації як функції компонентів деформацій $\Pi\left(\varepsilon_x, ..., \gamma_{zx}\right)$, частинні похідні від якої дорівнюють відповідним компонентам напружень:

$$\sigma_x = \frac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon_x}, ..., \tau_{zx} = \frac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{zx}}. \quad (5.17)$$

Потенціал деформації має вигляд

$$\Pi = \frac{9}{2} K \varepsilon_{сер}^2 + \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i. \quad (5.18)$$

Перший доданок у цій формулі являє собою питому потенціальну енергію змінення об'єму, а другий – питому потенціальну енергію змінення форми. Другий доданок у певному масштабі дорівнює площі, обмеженій діаграмою деформування матеріалу.

Диференціюючи вираз (5.18) за компонентами деформації, одержимо

$$\begin{array}{l} \dfrac{\partial \Pi}{\partial \varepsilon_x} = \dfrac{9}{2} K 2\varepsilon_{сер} \dfrac{1}{3} + \sigma_i \dfrac{\partial \varepsilon_i}{\partial \varepsilon_x} = 3K\varepsilon_{сер} + \sigma_i \dfrac{1}{9} \cdot \dfrac{2\left(\varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z + \varepsilon_x\right)}{\varepsilon_i} = \\ = \sigma_{сер} + \dfrac{2}{3} \cdot \dfrac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \left(\varepsilon_x - \varepsilon_{сер} \right) = \sigma_x; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dfrac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{zx}} = \sigma_i \dfrac{1}{9} \cdot \dfrac{\frac{3}{2} 2\gamma_{zx}}{\varepsilon_i} = \dfrac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \gamma_{zx} = \tau_{zx}. \end{array} \quad (5.19)$$

Таким чином, вираз (5.18) є потенціалом деформації.

Підставляючи співвідношення (5.17) у формулу (5.16), маємо

$$\delta A = \int_W \delta \Pi dW \tag{5.20}$$

або

$$\delta\left(\int_W \Pi dW \right) = 0.$$

Величина у круглих дужках називається повною енергією системи:

$$E = \int_W \Pi dW - A.$$

Таким чином,

$$\delta E = 0. \tag{5.21}$$

Визначення другої варіації повної енергії системи доводить, що знак її додатний. Отже, дійсна форма рівноваги тіла відрізняється від усіх можливих форм тим, що для неї повна енергія набуває мінімального значення.

Принцип можливих змінень напруженого стану. Принцип мінімуму додаткової роботи

Зробимо такі ж вхідні припущення, що й у двох попередніх підрозділах. Зіставимо дійсні напружені стани у різних точках тіла, які характеризуються компонентами напружень $\sigma_x,...,\tau_{zx}$, зі всіма близькими напруженнями, що задовольнять диференціальні рівняння рівноваги та умови на поверхні:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma_x + \delta\sigma_x\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tau_{yx} + \delta\tau_{yx}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tau_{zx} + \delta\tau_{zx}\right) + X + \delta X = 0,\\
&\qquad\qquad\qquad

$$\int_W \left(u_x \delta X + u_y \delta Y + u_z \delta Z\right) dW + \int_S \left(u_x \delta X_\nu + u_y \delta Y_\nu + u_z \delta Z_\nu\right) dS. \quad (5.24)$$

Підставимо у другий інтеграл співвідношення (5.24). Тоді

$$\int_S \left(u_x \delta X_\nu + u_y \delta Y_\nu + u_z \delta Z_\nu\right) dS = \int_S \begin{bmatrix} \left(u_x \delta\sigma_x + u_y \delta\tau_{xy} + u_z \delta\tau_{xz}\right) l + \\ + \left(u_x \delta\tau_{yx} + u_y \delta\sigma_y + u_z \delta\tau_{yz}\right) m + \\ + \left(u_x \delta\tau_{zx} + u_y \delta\tau_{zy} + u_z \delta\sigma_x\right) n \end{bmatrix} dS. \quad (5.25)$$

Так само, як і вище, перетворимо другий інтеграл за формулою Остроградського – Гаусса, використовуючи диференціальні рівняння (5.23) та залежності компонентів деформацій від компонентів переміщень:

$$\int_W \left(u_x \delta X + u_y \delta Y + u_z \delta Z\right) dW + \int_S \left(u_x \delta X_\nu + u_y \delta Y_\nu + u_z \delta Z_\nu\right) dS =$$

$$= \int_W \left(\varepsilon_x \delta\sigma_x + \varepsilon_y \delta\sigma_y + \varepsilon_z \delta\sigma_z + \gamma_{xy} \delta\tau_{xy} + \gamma_{yz} \delta\tau_{yz} + \gamma_{zx} \delta\tau_{zx}\right) dW. \quad (5.26)$$

Введемо поняття додаткової роботи як функції компонентів напруження, частинні похідні від якої за компонентами напружень дорівнюють відповідним компонентам деформацій:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial R}{\partial \sigma_x}; \ldots; \gamma_{zx} = \frac{\partial R}{\partial \tau_{zx}}. \quad . \quad (5.27)$$

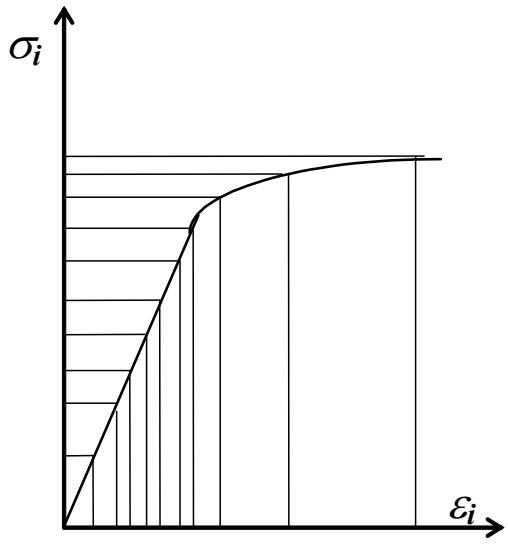


Рис. 5.2. Потенціальна енергія змінення форми

Ці співвідношення заміняють відомі у теорії пружності формули Кастильяно. У границях пружності частинні похідні беруться від питомої потенціальної енергії деформації.

Додаткова робота

$$R = \frac{\sigma_{сер}^2}{2K} + \int_0^{\sigma_i} \varepsilon_i d\sigma_i . \qquad (5.28)$$

Перший доданок у цій формулі являє собою питому потенціальну енергію змінення об'єму, а другий – питому потенціальну енергію змінення форми. Другий доданок у певному масштабі дорівнює площі, заштрихованій на рис. 5.2 горизонтальними лініями.

Диференціюючи вираз (5.16) за компонентами напружень, одержуємо

$$\frac{\partial R}{\partial \sigma_x} = \frac{\sigma_{сер}}{3K} + \varepsilon_i \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_x} = \varepsilon_{сер} + \varepsilon_i \frac{\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z + \sigma_x}{2\sigma_i} =$$

$$= \varepsilon_{ср} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left(\sigma_x - \sigma_{сер} \right) = \varepsilon_x \qquad . \qquad (5.29)$$

.....

Таким чином, доведено, що вираз (5.28) є додатковою роботою всього тіла, яку визначають за виразом

$$\tilde{R} = \int_W R dW . \qquad (5.30)$$

Підставляючи співвідношення (5.27) у формулу (5.26), одержуємо

$$\int_W \left(u_x \delta X + u_y \delta Y + u_z \delta Z \right) dW + \int_S \left(u_x \delta X_\nu + u_y \delta Y_\nu + u_z \delta Z_\nu \right) dS = \delta R. \qquad (5.31)$$

Рівняння (5.31) є математичною формою так званого принципу можливих змінень напруженого стану тіла, згідно з яким сума робіт приросту усіх зовнішніх сил на переміщеннях точок прикладання цих сил дорівнює приросту додаткової роботи всього тіла.

У границях пружності додаткова робота дорівнює потенціалу деформації або питомій потенціальній енергії, тому і сума робіт приросту всіх зовнішніх сил на переміщеннях точок прикладання цих сил дорівнює приросту потенціальної енергії тіла.

З формули (5.31) випливає, що

$$\delta \tilde{R} = 0 ,$$

якщо за відсутності об’ємних сил робота приросту зовнішніх сил дорівнює нулю, що має місце, коли на частині поверхні задано напруження $\left(\delta X_\nu = \delta Y_\nu = \delta Z_\nu = 0 \right)$, а на іншій її частині переміщення дорівнюють нулю $\left(u_x = u_y = u_z = 0 \right)$.

Визначення другої варіації додаткової роботи доводить, що знак її додатний. Отже, з усіх статичних можливих напружених станів лише для істинного напруженого стану додаткова робота для всього тіла R набуває мінімального значення.

Теорема Кастильяно

У теорії пружності теорема Кастильяно формулюється таким чином: частинна похідна від потенціальної енергії деформації тіла, яка береться за величиною будь-якої з прикладених до тіла зовнішніх сил, дорівнює проекції переміщення точки прикладання цієї сили на напрямок її дії.

Розглянемо узагальнення цієї теореми у випадку нелінійних залежностей між напруженнями та деформаціями. Визначимо через P зосереджені сили, прикладені до тіла; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – напрямні косинуси ліній дії цих сил, а через u_{xi}, u_{yi}, u_{zi} – проекції переміщення точок прикладання зосереджених сил P на осі x, y і z.

З варіаційного рівняння (5.31), вважаючи, що одна з сил одержує нескінченно малий приріст δP_i, визначаємо

$$\left(u_{xi}\alpha_i + u_{yi}\beta_i + u_{zi}\gamma_i\right)\delta P_i = \delta\tilde{R}. \qquad (5.32)$$

Вираз у круглих дужках дорівнює проекції переміщення точки прикладання сили P_i на напрямок дії сили δ_i.

Отже,

$$\delta_i = \frac{\delta\tilde{R}}{\partial P_i}. \qquad (5.33)$$

Таким чином, частинна похідна додаткової роботи тіла за величиною будь-якої з прикладених до тіла зовнішніх сил дорівнює проекції переміщення точки прикладання цієї сили на напрямок її дії.

Нагадаємо найбільш загальну систему рівнянь руху

$$m\vec{\omega} - \sum\vec{F} = 0. \qquad (5.34)$$

Виділимо всередині металу малий об'єм dW, обмежений поверхнею dS. Оскільки цей об'єм має густину ρ, то на нього впливатимуть інерційні сили, що для всього об'єму є однаковими:

$$\int_W \vec{\omega}\,\rho\,dW. \qquad (5.35)$$

Крім того, на той самий об'єм впливатиме масова сила

$$\int_W \vec{P}\,\rho\,dW, \qquad (5.36)$$

де $\vec{P}$ – сила, що діє на одиницю поверхні;

На поверхні діятимуть поверхневі сили

$$\int_s \vec{P}_n dS, \qquad (5.37)$$

де $\vec{P}_n$ – сила, яка діє на одиницю поверхні.

Рівняння динаміки набуває вигляду

$$\int_W \left(\vec{P} - \vec{\omega}\right) \rho \, dW + \int_S \vec{P}_n dS = 0 . \qquad (5.38)$$

Якщо припустити, що під час руху суцільного середовища підінтегральні функції залишаються безперервними, то після перетворення поверхневого інтеграла в об'ємний рівняння за формулою Остроградського – Гаусса (5.38) можна записати в диференціальній формі:

$$\vec{P} - \vec{\omega} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z}\right) = 0 , \qquad (5.39)$$

де

$$\vec{p}_x = i\sigma_{xx} + j\tau_{xy} + k\tau_{xz} ; \qquad (5.40)$$

$$\vec{p}_y = i\tau_{yx} + j\sigma_{yy} + k\tau_{yz} ; \qquad (5.41)$$

$$\vec{p}_x = i\tau_{zx} + j\tau_{zy} + k\sigma_{zz} . \qquad (5.42)$$

Підставляючи значення сил $\vec{p}_x, \vec{p}_y, \vec{p}_z$ у рівняння

$$\vec{P} - \vec{\omega} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \vec{P}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{P}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{P}_z}{\partial z}\right) = 0 , \qquad (5.43)$$

одержуємо три скалярні рівняння руху:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \dfrac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \dfrac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \dfrac{\partial V_x}{\partial z} = X - \dfrac{1}{\rho}\left(\dfrac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right); \\ \dfrac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \dfrac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \dfrac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \dfrac{\partial V_y}{\partial z} = Y - \dfrac{1}{\rho}\left(\dfrac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \dfrac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right); \\ \dfrac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \dfrac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \dfrac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \dfrac{\partial V_z}{\partial z} = Z - \dfrac{1}{\rho}\left(\dfrac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \dfrac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right). \end{cases} \qquad (5.44)$$

Ці рівняння є відомими рівняннями руху суцільного середовища, записаними в напруженнях. Ліва частина цих рівнянь враховує інерційні зусилля, що виникають при нерівномірному русі окремих частинок суцільного середовища, причому інерційні зусилля можуть бути двох видів.

Члени $\frac{\partial V_x}{\partial t}, \frac{\partial V_y}{\partial t}, \frac{\partial V_z}{\partial t}$ враховують інерційні сили, що з часом виникають унаслідок змінення швидкості течії частинок суцільного середовища в даній точці. Це локальні члени рівняння руху. В технологічних процесах ОМТ ці члени враховують інерційні сили, пов'язані з нерівномірним ходом робочого органа обладнання, наприклад повзуна на кривошипних пресах при

ОМТ. Інші члени лівої частини рівняння враховують інерційні сили, що виникають в окремих точках тіла внаслідок змінення швидкості під час течії залежно від координат

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z}; \tag{5.45}$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z}; \tag{5.46}$$

$$V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}. \tag{5.47}$$

Перші члени правої частини рівняння *X, Y, Z* враховують сили ваги. Якщо дією сили ваги та інерційної сили знехтувати, то рівняння руху набуває вигляду

$$\operatorname{div} T_\sigma = 0. \tag{5.48}$$

Це рівняння рівноваги в скалярній формі широко відоме. Його використовують як в теорії пружності, так і в теорії пластичності.

Таким чином, застосування рівняння руху дає можливість враховувати інерційні сили, що виникають при високошвидкісних процесах ОМТ, оцінити вплив характеристик обладнання на процес деформації.

Фізичні закономірності теорії течії

Для того щоб записати основні рівняння теорії течії металів, необхідно знати зв'язок між компонентами напружень, деформацій і швидкостей деформацій. З'ясування характеру цього зв'язку для пластичного деформування металу в загальному вигляді є складною задачею, що до нинішнього часу не розв'язана. Для випадку простого навантаження ця залежність визначена.

Просте навантаження — це навантаження тіла, при якому головні осі напружень, деформацій і швидкостей деформацій збігаються одна з одною і не відхиляються в процесі деформування. Іншими словами, при простому навантаженні максимальні подовження і швидкості руху частинок орієнтовані у напрямку дії максимальних напружень, а мінімальні — у напрямку дії мінімальних напружень.

Для середовищ, які вважаються ізотропними, подібний вигляд залежності між напруженнями, деформаціями і швидкостями деформацій є наслідком самого припущення про характер середовища. Що стосується пластичного деформування металу, то здійснення згаданого вище виду зв'язку потребує певного характеру навантаження внаслідок дії ефекту

Баушингера, так званого простого навантаження, при якому напрямні тензори напружень, деформацій і швидкостей деформацій збігаються, тобто

$$\bar{D}_\sigma = \bar{D}_\varepsilon = \bar{D}_{\dot{\varepsilon}}. \tag{5.49}$$

Напрямні тензори пов'язані з відповідними девіаторами відомими співвідношеннями:

$$D_\sigma = \sigma_{2i}\bar{D}_\sigma; \tag{5.50}$$

$$D_\varepsilon = \varepsilon_{2i}\bar{D}_\varepsilon; \tag{5.51}$$

$$D_{\dot{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}_{2i}\bar{D}_{\dot{\varepsilon}}. \tag{5.52}$$

Звідси випливає, що за умов простого навантаження між девіаторами напружень, деформацій і швидкостей деформацій має місце залежність

$$\frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} = \frac{\sigma_{yy}}{\varepsilon_{yy}} = \frac{\sigma_{xy}}{\varepsilon_{xy}} = b. \tag{5.53}$$

Згідно з цією залежністю зв'язок між девіаторами напружень і швидкостями деформацій через їхні інші інваріанти визначається рівністю

$$D_\sigma = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}D_{\dot{\varepsilon}}. \tag{5.54}$$

Інші інваріанти девіаторів пов'язані з інтенсивностями напружень і швидкостей деформацій такими співвідношеннями:

$$\sigma_{2i} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_i; \tag{5.55}$$

$$\varepsilon_{2i} = \frac{1}{\sqrt{2}}\varepsilon_i, \tag{5.56}$$

де

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_{xx}-\sigma_{yy}\right)^2 + \left(\sigma_{yy}-\sigma_{zz}\right)^2 + \left(\sigma_{zz}-\sigma_{xx}\right)^2 + 6\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)};$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\dot{\varepsilon}_{xx}-\dot{\varepsilon}_{yy}\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{yy}-\dot{\varepsilon}_{zz}\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{zz}-\dot{\varepsilon}_{xx}\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2 + \dot{\varepsilon}_{zx}^2\right)}.$$

Зважаючи на це, рівняння зв'язку між девіаторами напружень і швидкостей деформацій через їхні інтенсивності набуває вигляду

$$D_\sigma = \frac{\sigma_{2i}}{\dot{\varepsilon}_{2i}}D_{\dot{\varepsilon}}$$

або

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}-\sigma_{cep},\tau_{xy},\tau_{xz} \\ \tau_{yx},\sigma_{yy}-\sigma_{cep},\tau_{yz} \\ \tau_{zx},\tau_{zy},\sigma_{zz}-\sigma_{cep} \end{pmatrix} = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i} \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx}-\dot{\varepsilon}_{cep},\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xy},\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{xz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yx},\dot{\varepsilon}_{yy}-\dot{\varepsilon}_{cep},\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{yz} \\ \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zx},\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{zy},\dot{\varepsilon}_{zz}-\dot{\varepsilon}_{cep} \end{pmatrix}, \quad (5.57)$$

що приводить до таких рівнянь зв'язку між компонентами напружень і швидкостей деформацій за умови простого навантаження:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{cep}+\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\left(\dot{\varepsilon}_{xx}-\dot{\varepsilon}_{cep}\right); \tau_{xy}=\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{xy}; \\ \sigma_{yy} &= \sigma_{cep}+\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\left(\dot{\varepsilon}_{yy}-\dot{\varepsilon}_{cep}\right); \tau_{yz}=\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{yz}; \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{cep}+\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\left(\dot{\varepsilon}_{zz}-\dot{\varepsilon}_{cep}\right); \tau_{zx}=\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{zx}. \end{aligned} \quad (5.58)$$

У результаті аналізу експериментальних досліджень ряду авторів А. А. Ільюшин довів, що у випадку простого навантаження при складному напруженому стані залежність між інтенсивностями напружень і деформацій точно збігається з діаграмою розтягнення зразка, тобто інтенсивність напружень є цілком означеною функцією інтенсивності деформацій:

$$\sigma_i = \psi\left(\varepsilon_i\right), \quad (5.59)$$

де

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy}\right)^2+\left(\varepsilon_{yy}-\varepsilon_{zz}\right)^2+\left(\varepsilon_{zz}-\varepsilon_{xx}\right)^2+\frac{3}{2}\left(\varepsilon_{xy}^2+\varepsilon_{yz}^2+\varepsilon_{zx}^2\right)}.$$

Компоненти деформацій пов'язані зі швидкостями деформацій у випадку простого навантаження диференціальними співвідношеннями:

$$\frac{d\varepsilon_{xx}}{dt}=\dot{\varepsilon}_{xx}, \frac{d\varepsilon_{xy}}{dt}=\dot{\varepsilon}_{xy}. \quad (5.60)$$

Наведені вище фізичні закономірності мають місце при постійній температурі. Якщо температура зразка змінюється, то це передусім відбивається на його механічних властивостях, унаслідок чого залежність між напруженнями і деформаціями стає більш складною:

$$\sigma_i = \psi\left(\varepsilon_i, T\right). \quad (5.61)$$

Для простого навантаження необхідно мати не тільки спеціальне навантаження, але й цілком означене поле температур. За наявності неоднорідного поля температур в матеріалі може виникнути анізотропія механічних властивостей.

Однак, незважаючи на появу анізотропності, багато важливих практичних задач можуть розглядатися з точки зору простої деформації, а особливо у випадку формозмінення вісесиметричних заготовок.

Розглянемо випадок простого навантаження. При цьому будемо зважати на те, що досліди Девіса (1943–1945 рр.) з випробування спільної дії осьового розтягнення і внутрішнього тиску при постійному відношенні величини сили, що розтягує, до внутрішнього тиску, довели, що і за наявності значних деформацій, аж до руйнування зразків, залежність між інтенсивностями напружень і деформацій залишається такого самого, що і у випадку простого випробування на розтягання.

Коефіцієнт жорсткості

Для в'язких рідин залежність між девіаторами напружень і швидкостей деформацій, як відомо, має вигляд

$$D_\sigma = 2\mu D_{\dot\varepsilon}, \qquad (5.62)$$

де μ – коефіцієнт в'язкості, що для даної температури є сталою величиною і змінюється тільки зі зміною температури:

$$\mu = \mu(T). \qquad (5.63)$$

Використовуючи умови нестисливості у вигляді

$$\varepsilon_{сер} = 0,$$

для випадку руху нестисливої в'язкої рідини відповідно до $D_\sigma = 2\mu D_{\dot\varepsilon}$ можна записати залежність між напруженнями і швидкостями деформації у вигляді:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}-\sigma_{сер}, \tau_{xy}, \tau_{xz} \\ \tau_{yx}, \sigma_{yy}-\sigma_{сер}, \tau_{yz} \\ \tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_{zz}-\sigma_{сер} \end{pmatrix} = \frac{2}{3}\mu \begin{pmatrix} \dot\varepsilon_{xx}-\dot\varepsilon_{сер}, \frac{1}{2}\dot\varepsilon_{xy}, \frac{1}{2}\dot\varepsilon_{xz} \\ \frac{1}{2}\dot\varepsilon_{yx}, \dot\varepsilon_{yy}-\dot\varepsilon_{сер}, \frac{1}{2}\dot\varepsilon_{yz} \\ \frac{1}{2}\dot\varepsilon_{zx}, \frac{1}{2}\varepsilon_{zy}, \dot\varepsilon_{zz}-\dot\varepsilon_{сер} \end{pmatrix}; \qquad (5.64)$$

$$\sigma_{xx}-\sigma_{сер} = 2\mu(\dot\varepsilon_{xx}-\dot\varepsilon_{сер}),\ \sigma_{сер} = -p,\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{сер} = 0;$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -p + 2\mu\dot\varepsilon_{xx}; \tau_{xy} = \mu\dot\varepsilon_{xy}; \\ \sigma_{yy} &= -p + 2\mu\dot\varepsilon_{yy}; \tau_{yz} = \mu\dot\varepsilon_{yz}; \\ \sigma_{zz} &= -p + 2\mu\dot\varepsilon_{zz}; \tau_{zx} = \mu\dot\varepsilon_{zx}. \end{aligned} \qquad (5.65)$$

Для простої пластичної деформації за умови незмінності об'єму залежність між напруженнями і швидкостями деформацій така:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{сер} + 2\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot\varepsilon_i}\dot\varepsilon_{xx}; \tau_{xy} = \frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot\varepsilon_i}\dot\varepsilon_{xy};$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{сер} + 2\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{yy}; \tau_{yz} = \frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{yz}; \quad (5.66)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{сер} + 2\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{zz}; \tau_{zx} = \frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}\dot{\varepsilon}_{zx}.$$

Порівняння цих систем рівнянь показує, що вони тотожно збігаються за умови

$$p = -\sigma_{сер}, \mu = \frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}. \quad (5.67)$$

Отже, для опису процесу пластичної течії металу при простій деформації можуть використовуватися відповідні рівняння течії в'язкої рідини, якщо в них замість коефіцієнта в'язкості взяти вираз

$$\frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i} = \mu. \quad (5.68)$$

У подальшому цю величину називатимемо коефіцієнтом жорсткості. Цей коефіцієнт залежить від механічних властивостей металу, а також від деформацій, що одержуються тілом, і швидкостей деформацій.

У розгорнутому вигляді маємо такий вираз для коефіцієнта жорсткості:

$$\mu_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Phi\left[\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_{xx}-\varepsilon)^2 + (\varepsilon_{yy}-\varepsilon)^2 + (\varepsilon_{zz}-\varepsilon)^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}\right]}{\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\dot{\varepsilon}_{xx}-\dot{\varepsilon})^2 + (\dot{\varepsilon}_{yy}-\dot{\varepsilon})^2 + (\dot{\varepsilon}_{zz}-\dot{\varepsilon})^2 + \frac{3}{2}(\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2 + \dot{\varepsilon}_{zx}^2)}}. \quad (5.69)$$

Функція враховує механічні властивості металу та його зміцнення в процесі течії, а комбінації вихідних деформацій та їхніх швидкостей відбивають вплив самого процесу.

Уведення поняття "коефіцієнт жорсткості" дозволяє для опису пластичної течії металу користуватися також, як і у випадку в'язкої рідини, загальними рівняннями механіки суцільних середовищ. Однак слід зауважити, що коефіцієнт не характеризує в'язкості металів у звичайному розумінні. Уподібнення пластичної течії твердого металу течії в'язкої рідини має тільки формальний характер і фізичного сенсу не має.

Початкові та граничні умови

Початкові умови в задачі про пластичну течію металу характеризуються значеннями швидкостей у початковий момент часу, тобто функціями, що визначають компоненти швидкості при $t = 0$ для всієї розглядуваної області:

$$V_x(x,y,z,t) = \varphi_1(x,y,z);$$
$$V_y(x,y,z,t) = \varphi_2(x,y,z); \qquad (5.70)$$
$$V_z(x,y,z,t) = \varphi_3(x,y,z).$$

У випадку стаціонарної течії питання про початкові умови не виникає.

Граничні умови при течії рідини, якщо потік обмежується твердими стінками, зводяться до відсутності відносних зміщень частинок рідини на поверхні контакту. Це означає, що на поверхні контакту нормальна та дотична складові швидкості руху рідини дорівнюють нулю. Якщо рідина обмежена вільною поверхнею, то нормальна складова швидкості збігається зі швидкістю переміщення поверхні розриву, а напруження на поверхні нормальні до неї.

При пластичній течії металу питання про граничні умови значно складніше. Експериментально доведено, що, наприклад, при стисканні на поверхні контакту можуть одночасно існувати зони, де відбувається ковзання частинок металу по поверхні контакту, і зони, де таке ковзання відсутнє.

Пояснюється це спільним впливом сил тертя та умовою пластичності. Відомо, що умова пластичності обмежує значення контактних дотичних напружень. У зв'язку з цим, якщо сили тертя малі, відбувається ковзання частинок металу по поверхні контакту, якщо ж контактні дотичні напруження, спричинені силами тертя, перевищують межу, що відповідає умові пластичності, виникає гальмування течії.

Зони, де це спостерігається, називають зонами застою, або зонами прилипання. Внаслідок сил тертя на контактній поверхні можна уникнути взагалі появи означених зон.

Питання про граничні умови на контактній поверхні при пластичному стисненні розглядалося низкою авторів. Найбільш докладно це питання досліджено Е. П. Унксовим.

Рівняння пластичної течії

Згідно з залежностями, розглянутими вище, для напружень і швидкостей деформації при вивченні питання про коефіцієнт жорсткості можна записати так:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{сер} + 2\mu_i\dot{\varepsilon}_{xx}; \tau_{xy} = \mu_i\dot{\varepsilon}_{xy};$$
$$\sigma_{yy} = \sigma_{сер} + 2\mu_i\dot{\varepsilon}_{yy}; \tau_{yz} = \mu_i\dot{\varepsilon}_{yz}; \qquad (5.71)$$
$$\sigma_{zz} = \sigma_{сер} + 2\mu_i\dot{\varepsilon}_{zz}; \tau_{zx} = \mu_i\dot{\varepsilon}_{zx}.$$

Швидкості деформацій пов'язані зі швидкостями течії рівняннями:

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x}; \dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y};$$
$$\dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y}; \dot{\varepsilon}_{yz} = \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z}; \qquad (5.72)$$
$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \dot{\varepsilon}_{zx} = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}.$$

Рівняння руху суцільного середовища, записані в напруженнях, мають вигляд:

$$\frac{dV_x}{dt} = X + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right);$$
$$\frac{dV_y}{dt} = Y + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right); \qquad (5.73)$$
$$\frac{dV_z}{dt} = Z + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right).$$

У випадку в'язкої рідини коефіцієнт в'язкості при однорідному температурному полі, як відомо, від координат не залежить, і тільки за умов неоднорідного поля температур він стає функцією координат. При пластичній течії металу коефіцієнт пластичної в'язкості (коефіцієнт жорсткості) є також функцією координат, тому у загальному випадку пластичної течії металу має місце умова

$$\mu_i = \mu_i (x, y, z). \qquad (5.74)$$

Диференціюючи (5.71) і зважаючи на (5.72) — (5.74), одержимо загальні рівняння пластичної течії в декартовій системі координат:

$$\rho\left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y\frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z\frac{\partial V_x}{\partial z}\right) = \rho X + \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \mu_i\left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right) +$$
$$+ \frac{2\partial \mu_i}{\partial x}\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial \mu_i}{\partial y}\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial \mu_i}{\partial z}\left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z}\right); \qquad (5.75)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x\frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y\frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z\frac{\partial V_y}{\partial z}\right) = \rho Y + \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \mu_i\left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2}\right) +$$

$$+ \frac{2\partial \mu_i}{\partial y}\frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x}\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial \mu_i}{\partial z}\left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z}\right); \qquad (5.76)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_z}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_z}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)=\rho Z+\frac{\partial\sigma}{\partial z}+\mu_i\left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)+$$

$$+\frac{2\partial\mu_i}{\partial z}\frac{\partial V_z}{\partial z}+\frac{\partial\mu_i}{\partial x}\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}+\frac{\partial V_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial\mu_i}{\partial y}\left(\frac{\partial V_z}{\partial y}+\frac{\partial V_y}{\partial z}\right);$$

У випадку пластичного деформування з малими швидкостями впливом інерційних сил можна знехтувати, і тоді ліві частини наведених вище рівнянь дорівнюють нулю. Система має вигляд $\operatorname{div} T_\sigma = 0$, тобто є системою рівнянь для квазістатичних процесів. Інколи так і чинять, коли швидкості деформування незначні. Швидкість деформування – це швидкість пересування робочого органа обладнання, наприклад повзуна преса. У деяких випадках доводять (експериментально), що інерційний додаток становить менше 15 або 10 %, і його вважають незначним (просто не враховують, прирівнюють до нуля).

У більшості випадків високошвидкісного навантаження так чинити не можна, бо інерційні складові істотно збільшують величину роботи деформації. Тому задачу пластичного деформування вирішують із застосуванням зазначених вище залежностей.

У рекомендованій літературі наведено рівняння руху в довільній ортогональній криволінійній системі координат. Як зразок запишемо систему рівнянь руху в полярних координатах, що використовується при розв'язанні задач для вісесиметричних тіл (тіла обертання):

$$\rho\left(\frac{\partial V_r}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_r}{\partial r}+\frac{V_\theta}{r}\frac{\partial V_r}{\partial\theta}+\frac{V_r\partial V_z}{\partial z}-\frac{V_\theta}{r}\right)=$$

$$=\rho F_r+\frac{\partial\sigma}{\partial r}+\mu_i\left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial^2 V_r}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial r}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial V_\theta}{\partial\theta}-\frac{V_r}{r^2}\right)+$$

$$+2\frac{\partial V_r}{\partial}\frac{\partial\mu_i}{\partial r}+\frac{\partial\mu_i}{\partial\theta}\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial V_r}{\partial\theta}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial r}-\frac{V_\theta}{r^2}\right)+\frac{\partial\mu_i}{\partial z}\left(\frac{\partial V_z}{\partial r}+\frac{\partial V_r}{\partial z}\right);$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_\theta}{\partial r}+\frac{V_\theta}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial\theta}+\frac{V_z\partial V_\theta}{\partial z}+\frac{V_rV_\theta}{r}\right)=$$

$$=\rho F_\theta+\frac{1}{\rho}\frac{\partial\sigma}{\partial\theta}+\mu_i\left(\frac{\partial^2V_\theta}{\partial r^2}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2V_\theta}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2V_\theta}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial r}+\frac{2\partial V_r}{r\partial\theta}-\frac{V_\theta}{r^2}\right)+ \quad (5.77)$$

$$+\frac{2}{r^2}\frac{\partial V_\theta}{\partial\theta}\frac{\partial\mu_i}{\partial\theta}+\frac{\partial\mu_i}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial\theta}+\frac{\partial V_\theta}{\partial r}-\frac{V_\theta}{r^2}\right)+\frac{\partial\mu_i}{\partial z}\left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial r}\right);$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_z}{\partial r}+\frac{V_\theta}{r}\frac{\partial V_z}{\partial\theta}+\frac{V_z\partial V_z}{\partial z}\right)=$$

$$=\rho F_z+\frac{\partial\sigma}{\partial z}+\mu_i\left(\frac{\partial^2V_z}{\partial r^2}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2V_z}{\partial\theta^2}+\frac{\partial^2V_z}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial r}\right)+$$

$$+2\frac{\partial V_z}{\partial z}\frac{\partial\mu_i}{\partial z}+\frac{\partial\mu_i}{\partial\theta}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial z}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial V_z}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial\mu_i}{\partial r}\left(\frac{\partial V_z}{\partial r}+\frac{\partial V_r}{\partial z}\right);$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial V_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial V_z}{\partial z}+\frac{V_r}{r}=0.$$

У випадку рівнянь руху в координатах X, Y, Z для системи рівнянь в полярних системах координат при пластичному деформуванні з малими швидкостями впливом інерційних сил можна знехтувати і тоді ліві частини наведених вище рівнянь стають такими, що дорівнюють нулю.

Схеми розв'язання задач пластичної течії для статичного та динамічного навантажень

Задачу з визначення зусиль і роботи деформування для кожної конкретної схеми, наприклад для осаджування зразка в циліндричній системі координат, розв'язують за формулою

$$P=\int_0^r\int_0^{2\pi}\sigma_{zz}rdrd\varphi, \quad (5.78)$$

де P – зусилля деформування.

Роботу деформування визначають як

$$A=P\Delta h. \quad (5.79)$$

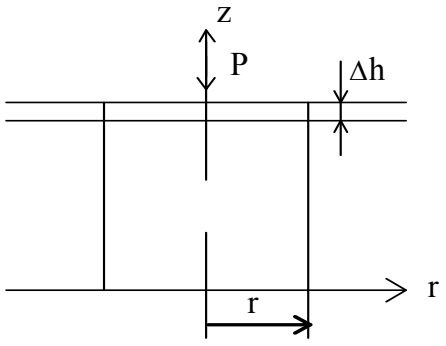


Рис. 5.3.
Осаджування заготовки

Коли Δh велике, то переміщення розподіляють на декілька ділянок. При високошвидкісній або імпульсній обробці така методика неприйнятна. У випадку високих швидкостей руху частинок металу з'являються інерційні сили, а ці інерційні складові приводять до більших розбіжностей з експериментом і становлять похибку 300…400 %.

Наявність інерційних сил може суттєво змінити проходження процесу. Вплив інерційних сил можна простежити на осаджуванні циліндричного зразка. Якщо при малій швидкості осаджування осідання супроводжувалося утворенням бочкоподібної форми, то при такій самій величині імпульсу сили у випадку великої швидкості деформації остання локалізується в основному біля верхньої частини зразка. Цю обставину слід враховувати при аналізі швидкісних процесів ОМТ.

При розгляді динамічних процесів за основу беруть рівняння руху, що використовуються при описі руху рідини та газів. У загальному випадку рівняння має вигляд

$$\operatorname{div} T_\sigma = \rho m \frac{dV}{dt}. \qquad (5.80)$$

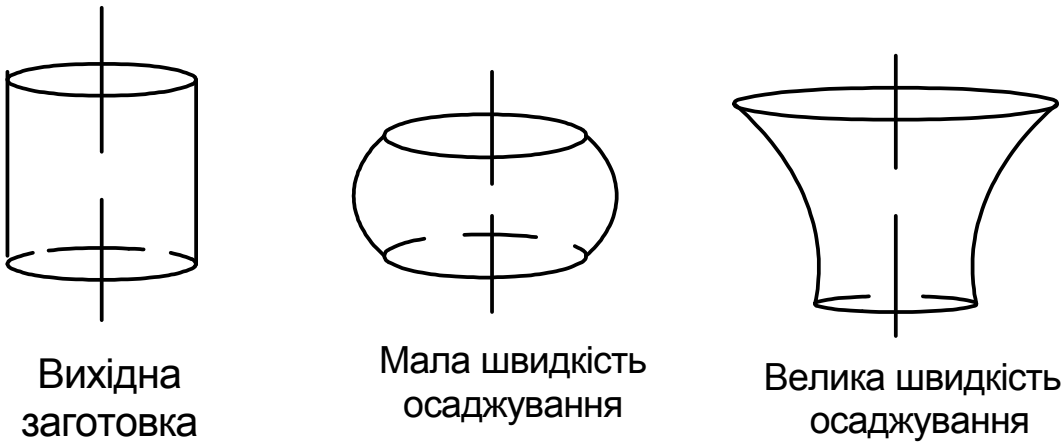


Рис. 5.4. Вплив швидкості

Для використання класичних рівнянь гідромеханіки велику роль відіграв той факт, що вдалося вибрати таку характеристику для металу, що мала б розмірність в'язкості. Це – коефіцієнт жорсткості

$$\mu_i = \frac{1}{3}\frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_i}. \qquad (5.81)$$

Він залежить від інтенсивності напружень і узагальненої швидкості деформації. Таким чином, можна зазначити, що жодної аналогії коефіцієнту в'язкості μ_i не існує. Значення коефіцієнта μ_i – різне для різних точок об'єму металу — характеризує конкретний технологічний процес (прокатку,

штампування, витяжку тощо) і μ_i залежить від фізико-механічних властивостей металу $\left(t, \dot{\varepsilon}_i\right)$.

Отже, методика розрахунку енергетичних параметрів процесів оброблення металів базується на рівнянні руху, а рівняння рівноваги — його окремий випадок.

Основою теорії пластичної течії є знаходження вектора швидкості $\bar{V} = f\left(V_x, V_y, V_z\right)$ або поля швидкостей. Це найтрудомісткіший етап методики.

Слід відзначити вимоги до поля швидкостей:

1. Поле швидкостей мусить забезпечити кінцевість формозмінення заготовки (тобто відображати весь процес деформування).

2. Поле швидкостей не повинно зазнавати розривів:

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0 \; ; \; \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 .$$

3. Поле швидкостей мусить мати простий математичний вираз (проекції швидкостей повинні мати простий математичний вираз). Через спрощення втрачається точність. У теорії пластичної течії припускається похибка 10…15 %.

Поле швидкостей у ряді випадків вдається визначити розв'язанням рівняння нерозривності за відомих граничних кінематичних умов.

Метод ліній ковзання

Аналіз за допомогою методу ліній ковзань основано на розподілі деформацій, який геометрично подібний до змінення форми деформованої області. Умови рівноваги враховують тільки в цій області, рівновагою поза нею нехтують. Найчастіше деякі прийняті допущення ускладнюють застосування методу в реальних формотворчих завданнях. Більшість припущень в методі ліній ковзань подібні до тих, які роблять у методі верхньої оцінки, тобто матеріал вважають однорідним, ізотропним, ідеально жорстко-пластичним середовищем; температурні, часові й швидкісні ефекти не враховуються; дотичні напруження на поверхні «інструмент-заготовка» постійні, що може бути або в умовах відсутності тертя, або в присутності тертя прилипання.

Незважаючи на багато обмежень у разі плоского деформованого стану метод є найбільш корисним при аналізі металодеформувальних процесів.

Останнім часом через впровадження нових комп'ютерно-орієнтованих методів застосування методу ліній ковзань зменшується.

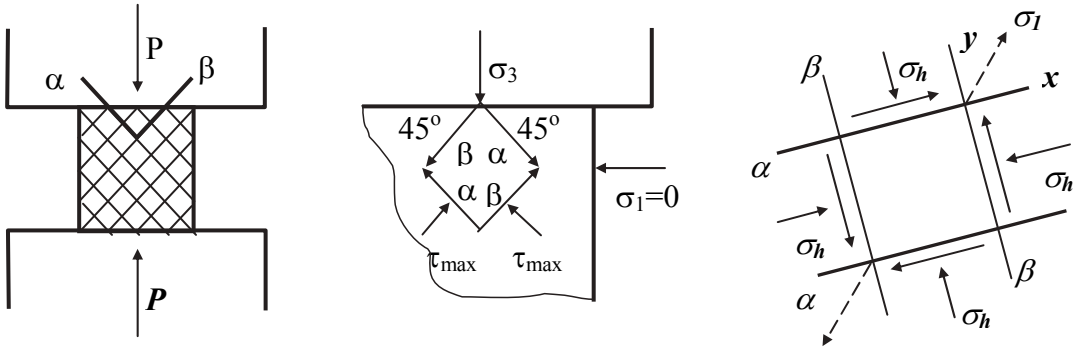


Рис. 5.5. Лінії ковзання

Поле ліній ковзання або поле площин максимальних дотичних напружень – це двовимірний вектор креслення, який показує напрямки максимальних або мінімальних дотичних напружень у будь-якій точці вздовж лінії. Ці лінії мають властивості, які задовольняють умови статичної рівноваги, пластичності й можливого поля течії матеріалу без жодного врахування рівнянь пластичності та швидкостей деформацій. Уздовж дотичних до цих ліній дотичні напруження максимальні, а лінійні деформації дорівнюють нулю. Оскільки дотичні напруження завжди супроводжуються парними дотичними напруженнями, поле ліній ковзання завжди залишається сіткою ліній, які перетинають одна одну під кутом 90 ^{0}. Зазвичай їх позначають α і β, і лінії дії великих головних напружень лежать у першому і третьому квадрантах

Поля ліній ковзань зазвичай будують на основі попереднього досвіду, методом проб і помилок. Починають з задання умов рівноваги на межі і вирішують задачу, намагаючись задовольнити швидкісні умови і умови нерозривності всередині деформівної області. Оскільки пластична деформація відбувається завдяки чистому зрізу, уздовж лінії ковзання дотичні напруження дорівнюють τ_{max} = =k, тобто напруженню, виміряного при початку течії при чистому зрізі. Напружений стан у будь-якій точці в зоні пластичної деформації можна бути розглядати як комбінацію цього напруження з гідростатичною компонентою σ_h, яка не впливає на текучість матеріалу. Як показано на рис. 5.5, головні напруження σ_1 і σ_3 мають значення

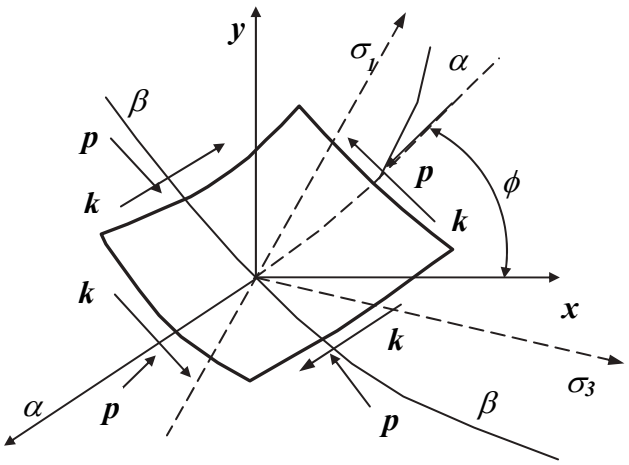


Рис. 5.6. Кут ϕ і головні напруження

$\sigma_{сер}+k$ і $\sigma_{сер}-k$ відповідно і діють під кутом 45 ^{o} до ліній ковзання. Отже, якщо σ_h відома, величину і напрямок обох головних напружень можна знайти з поля ліній ковзання, знаючи границю текучості матеріалу.

Розгляд умов рівноваги показує, що змінення в $\sigma_{сер}$ між двома точками безпосередньо пов'язане з кутом між дотичними до ліній ковзання в цій точці, як показано на рис. 5.6. У простих випадках, наприклад стиснення циліндричного зразка між двома плоскими пластинами без урахування тертя, лінії ковзання плоскі, і в цих умовах σ_h постійне. Для більшості ж металообробних операцій лінії ковзання можуть бути як постійної, так і змінної кривизни. Кут ϕ – кут між дотичною до лінії α і віссю ***x***, виміряний проти годинникової стрілки.

Розв'язання за допомогою методу ліній ковзання використовують для плоского деформованого стану, коли для нестисливого, ідеально пластичного матеріалу головні напруження пов'язані таким чином:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}\left(\sigma_1 + \sigma_3\right). \tag{5.82}$$

Якщо всі головні напруження виразити через гідростатичний тиск, то отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_h - k = -p - k; \\ \sigma_2 &= \sigma_h = -p; \\ \sigma_3 &= \sigma_h + k = -p + k. \end{aligned} \tag{5.83}$$

Повністю систему напружень при плоскому деформованому стані можна розглядати як чистий зріз з накладеним гідростатичним тиском. Значення напружень на площинах *xy* можна отримати як

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -p - k \sin 2\phi; \\ \sigma_y &= -p + k \sin 2\phi; \\ \tau_{xy} &= k \cos 2\phi, \end{aligned} \tag{5.84}$$

де p – нормальний або гідростатичний тиск або напруження.

Базове рівняння виходить з того факту, що змінення p можна знайти з кутового повороту дотичної до лінії ковзання між двома точками. Абсолютне значення p може бути знайдено, якщо одну з точок взяти на межі, де воно відоме з граничних умов. Отже, маємо

:

$$\begin{aligned} p_A + 2k\phi_A &= p_B + 2k\phi_B; \\ \Delta p = \Delta\sigma_h &= p_A - p_B + 2k\phi_A - 2k\phi_B; \\ \Delta p &= 2k\Delta\phi. \end{aligned} \tag{5.85}$$

Сітка ліній ковзання має бути побудована таким чином, щоб змінення ϕ було однаковим уздовж даної сім'ї ліній, при переміщенні від одного перетину до іншого перетину лініями іншої сім'ї. Іншими словами, з рис. 5.7 різниця кутів ϕ між точками *A* і *C* може бути визначена двома шляхами: від *A* до *D* і *C*, а також від *A* до *B* і *C*, що дає таке змінення кута ϕ:

$$\begin{matrix} \phi_A - \phi_B = \phi_D - \phi_C \\ \phi_A - \phi_B = \phi_B - \phi_C \end{matrix}. \qquad (5.86)$$

Ця еквівалентність у зміненні кута ϕ з урахуванням вимоги перпендикулярності дозволяє визначити цю зміну ще до побудови ліній.

Порядок вирішення завдання пластичного деформування за допомогою методу побудови поля ліній ковзання така:

1. Побудова поля ліній ковзання, яке задовольняє всі граничні умови на певних граничних поверхнях і прийняті жорстко-пластичні допущення.

2. Отримання розподілу швидкостей за допомогою певних швидкісних граничних умов.

3. Перевірка позитивності інтенсивності роботи пластичного деформування в досліджуваній зоні.

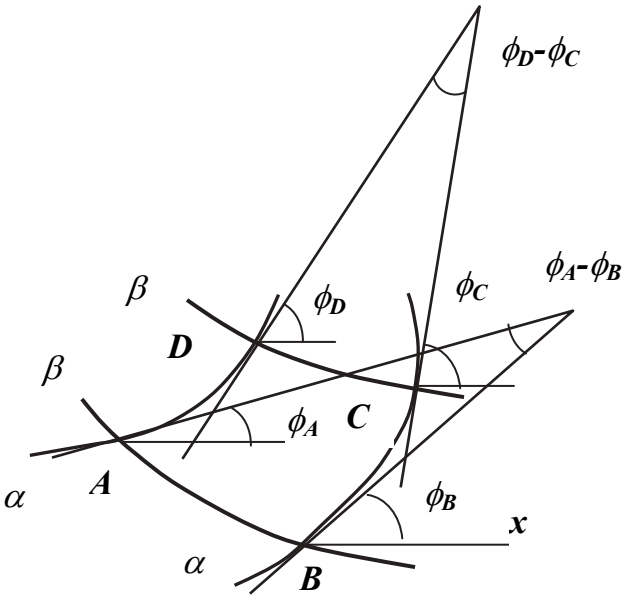


Рис. 5.7. Змінення кута ϕ

4. Перевірка відсутності порушення критерію пластичності в зоні, в якій прийнято відсутність деформацій.

При побудові полів ліній ковзання слід зазначити, що лінії становлять 45 ° з поверхнями, на яких відсутнє напруження, в місцях контакту з інструментом за відсутності тертя і на вісесиметричних поверхнях. Якщо на контактній поверхні тертя досягає максимального значення *k*, то кут виходу ліній ковзання дорівнює 90 °.

5. Лінії ковзання перетинають траєкторії головних напружень під кутом π/4.

6. Змінення середнього нормального напруження при русі вздовж лінії ковзання пропорційне куту її повороту.

7. Кут між дотичними до двох ліній ковзання однієї сім'ї в точках перетину їх лініями іншої сім'ї залишається постійним. Наслідок: якщо який-небудь відрізок лінії ковзання даної сім'ї є відрізком прямої, то і всі інші відрізки ліній ковзання цієї сім'ї, що відсікаються одними і тими ж лініями ко-

взання іншої сім'ї, будуть також відрізками прямих і довжина їх буде однаковою.

8. Радіуси кривизни ліній ковзання змінюються на величину відстаней, пройдених по лініях ковзання іншої сім'ї.

9. Кути нахилу ліній ковзання при виході на контур залежать від величини дотичного напруження на контурі.

МСЕ в задачах пластичного деформування. Метод скінченних елементів

Протягом багатьох років метод верхнього оцінювання використовували для обчислення зусиль деформування і течії металу в обробці металів тиском. Поле швидкостей за цим методом зазвичай знаходять на основі картини перебігу металу зразка, отриманої експериментально. При цьому підході постають труднощі у разі складної геометрії зразка. Застосування цього методу обмежується простими завданнями металообробки через труднощі знаходження чітко сформульованих прийнятних полів швидкостей або труднощів, пов'язаних з описом складної течії матеріалу.

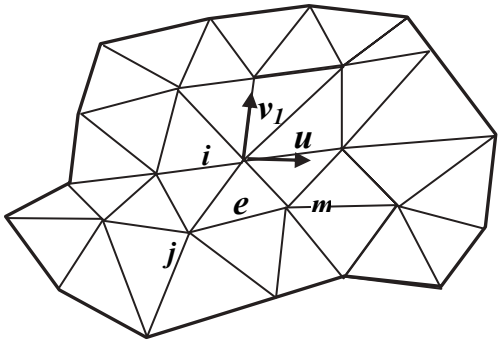


Рис. 5.8. Сітка СЕ

У жорстко-пластичному або жорстко-віскопластічному методі скінченних елементів (МСЕ) використовуються практично ті ж самі математичні принципи, як і в методі верхнього оцінювання. Ці методи відрізняються вибором пробних функцій. В МСЕ оброблювану заготовку розділяють на області, які називаються елементами, як показано на рис. 5.8. Уважається, що елементи взаємозв'язані в дискретній кількості вузлових точок, розташованих на своїх межах.

Потім для кожного елемента встановлюються пробні функції (або допустимі поля швидкостей), що задаються зазвичай постійними, які виражаються у вузлах швидкостями. Пробні функції в кожній області комбінуються у формі допустимих полів швидкостей, які задовольняють необхідні вимоги, крім вимоги постійності об'єму. Останнє посилюється варіаційним принципом, який також дозволяє обчислити середнє напруження.

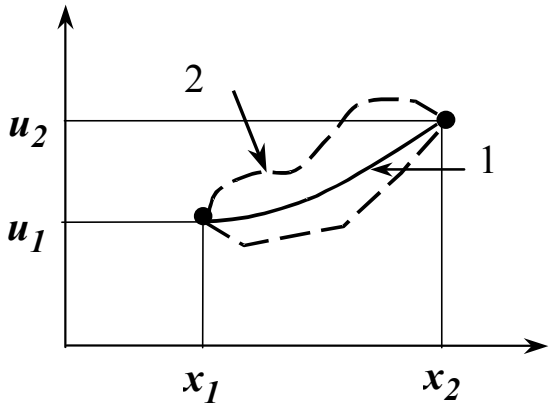


Рис. 5.9. Розв'язання функціонала

Нехай функціонал розв'язується як

$$\Pi = \int_{x_1}^{x_2} F\left(x, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \ldots \right) dx , \qquad (5.87)$$

де залежна змінна u є функцією незалежної x. Інтеграл з рівняння (5.87) визначено в двовимірній області або домені [x_1, x_2], як показано на рис. 5.9, де 1 – остаточне стаціонарне рішення, 2 – попереднє нестаціонарне рішення.

У механіці функціонали мають фізичний зміст, такий, як, наприклад, потенціальна енергія тіла, що деформується. У варіаційних методах для задач пропонується приблизне, орієнтовне рішення і функціонал виражається на основі орієнтовного розв'язання.

Серед усіх можливих рішень, що задовольняють граничні умови, вибирається те, яке робить функціонал *П* стаціонарним, тобто таким, що існує при своєму мінімумі або максимумі. Математична процедура, яка використовується для вибору правильного рішення з безлічі попередніх рішень, називається обчисленням варіацій. Будь-яке попереднє рішення в околі точного рішення можна подано сумою точного рішення *u* і варіації δu:

$$\bar{u} = u + \delta u . \qquad (5.88)$$

Варіація *u = u (x)* визначається як нескінченно мале довільне змінення u при фіксованому значенні залежної змінною x, тобто $\delta x = 0$. Варіації в функціоналі відповідають варіаціям рішення. Отже, мінімізуючи функціонал можна просто першу варіацію функціонала *П* зробити гранично малою величиною, тобто він стає стаціонарним. Цю умову можна виразити як

$$\delta\Pi = \int_{x_1}^{x_2} \partial F dx = 0 . \qquad (5.89)$$

Варіаційний принцип визначає скалярну величину або функціонал, який визначається інтегралом вигляду

$$\Pi = \int_{\Omega} F\left(u, \frac{\partial u}{\partial x}, \ldots \right) d\Omega + \int_{\Gamma} E\left(u, \frac{\partial u}{ux}, \ldots \right) d\Gamma , \qquad (5.90)$$

де Π – стаціонарний функціонал; *u* – невідома функція, яка може бути в матричній формі: $u = \sum N_i a_i$. Тут a_i – вузловий параметр; *F* і *E* – функції *u(x,…)* і їх похідних, а Γ – крива, що обмежує закриту область Ω.

Можна зробити Π стаціонарним щодо варіацій за u серед допустимих функцій, що задовольняють такі загальні граничні умови:

$$B_1(u) = 0 \text{ на } \Gamma_1,$$

$$B_2(u) = 0 \text{ на } \Gamma_2, \qquad (5.91)$$

де $\Gamma_1 + \Gamma_2 = \Gamma$.

У підсумку маємо, що розв'язок задачі є функція *u,* яка робить Π стаціонарним щодо малих змінень δu.

Концепція скінченних елементів і пробних функцій має деяку перевагу перед методом верхнього оцінювання. Процедура вирішення вільна від геометричних обмежень, тому будь-яка оброблювана заготовка може бути поділена на кінцеву кількість елементів. Крім того, складання варіаційного функціонала та його похідних (матриці жорсткості) на елементному рівні відбувається однаково по всій деформівній заготовці. Ця властивість МСЕ дозволяє обробляти широкий клас граничних задач однаковим чином.

У практиці масового металообробного виробництва в більшості операцій зазвичай необхідно перетворювати початкову просту форму заготовки на більш складну, при цьому одержувати необхідні точність і властивості. Бажана форма зазвичай виходить за допомогою матриць різних форм. Тому метод аналізу, за яким можна обробляти різні граничні умови на матриці, необхідний, щоб реалізувати повністю переваги МСЕ у розробленні технологічних процесів кування і штампування.

Головний недолік МСЕ – більша кількість комп'ютерного часу, необхідного для розрахунків.

Основи алгоритму МСЕ

На відміну від завдань, в яких використовують диференціальне числення, завдання, які вирішуються за допомогою МСЕ, називаються дискретними. Наступні шість кроків резюмують МСЕ процедуру в постановці і розв'язанні будь-якої задачі.

1. Дискретизація континууму. Дискретизація континууму може бути подана як процес розділення даного тіла на еквівалентну систему скінченних елементів. Для двовимірної області СЕ може бути трикутником або чотирикутником. Для тривимірного аналізу СЕ може бути тетраедром, гексаедром, призмою. Хоча цей процес автоматизовано, істотна відповідальність лежить на інженері. Він повинен вирішити, які форми, кількість і розташування СЕ дасть найбільш близьке до дійсності уявлення про дане тіло.

2. Вибір моделі переміщень. Вибрана функція переміщень або модель являє собою тільки приблизну модель дійсного розподілу переміщень. Наприклад, функцію переміщень зазвичай подають у вигляді полінома, кількість членів якого обмежується. Отже, на цьому етапі виконують перше значне наближення. Три фактори, що впливають на вибір моделі переміщення: розмірність і тип моделі переміщень; окремі величини переміщень; вимоги, які задовольняє модель.

3. Розв'язання матриці жорсткості елемента. Матриця складається з коефіцієнтів рівнянь рівноваги, отриманих на підставі властивостей матеріалу і геометрії задання за допомогою принципу мінімуму потенціальної енергії. Матриця жорсткості співвідносить вузлові переміщення з вузлови-

ми навантаженнями. Співвідношення між прямокутною матрицею жорсткості, вектором вузлових навантажень і вектором вузлових переміщень виражається системою алгебраїчних лінійних рівнянь:

$$[k]\{x\} = \{F'\}. \qquad (5.92)$$

Матриця жорсткості залежить від моделі переміщень, геометрії елементів, властивостей матеріалу і рівнянь стану.

4. Складання системи алгебраїчних рівнянь. Цей процес включає складання відповідних глобальних матриць і векторів для цілого тіла з індивідуальних матриць жорсткості і векторів навантажень елементів. В основі процесу лежить той факт, що взаємодії у вузлах потребують переміщень у вузлах, однакових для всіх суміжних елементів. Загальні співвідношення рівноваги знову ж виражаються в рівнянні спільності для всього тіла:

$$[K]\{X\}=\{R'\}. \qquad (5.93)$$

Наведені рівняння не можуть бути розв'язані відповідними модифікаціями з урахуванням граничних умов. Граничні умови є результатом того, що переміщення можуть бути задані на межі тіла.

5. Алгебраїчні рівняння, складені на четвертому кроці, розв'язуються для невідомих переміщень. Для лінійної задачі рівноваги – це безпосереднє застосування прийомів матричної алгебри. Для нелінійної ж задачі розв'язання складається з послідовності кроків, кожен крок включає модифікацію матриці жорсткості і/або вектора навантажень.

6. Обчислення напружень і деформацій в елементах відповідно до вузлових переміщень. Середнє значення напружень і деформацій береться в центрі елемента.

Метод верхнього оцінювання

Метод верхнього оцінювання використовують для аналізу формозміни і силового режиму деформування таких операцій ОМТ, які можуть бути зведені до плоских. Методика аналізу базується на двох основних рівняннях методу верхнього оцінювання

$$F = \frac{1}{v_t}[\sum_{i_c=0}^{n_c}(A_c v_c \tau_c)_{ic} + \sum_{i_d=0}^{n_d}(A_d v_d \tau_d)_{id}]; \qquad (5.94)$$

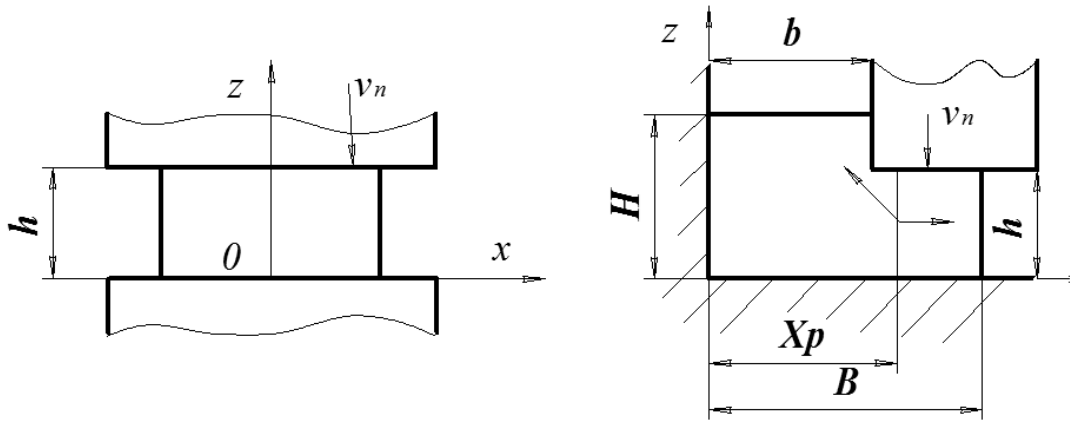
$$\frac{\partial P_d}{\partial R_p} = 0, \qquad (5.95)$$

де P_∂ – зусилля деформування, Н; v_n – швидкість інструменту, м/с; n_k – кількість контактних поверхонь блоків з інструментом; F_k – площа контактної поверхні жорсткого блока з інструментом, м^2; V_k – швидкість зміщення жорсткого блока по контактній поверхні, м/с; τ_k – дотичне напруження на контактній поверхні (напруження тертя), Н/ м^2; n_p – кількість поверхонь розри-

ву швидкостей, які поділяють заготовку на блоки; F_p – площа поверхні розриву швидкостей, м^2; V_p – стрибок швидкості на поверхні розриву, м/с; τ_s – напруження текучості на зрушення деформівного матеріалу заготовки, Н/м^2; R_p – координата поверхні розділу течії, м.

З цих рівнянь випливає, що для вирішення завдання необхідно побудувати годограф швидкостей, визначити швидкості v_k і v_p, обчислити площі F_k і F_p та вибрати значення напружень τ_k і τ_s. Послідовність вирішення завдань методом верхнього оцінювання така.

1. Перший етап аналізу – вибір координатної системи. Найчастіше її прив'язують до нерухомого інструменту (рис. 5.10). У деяких випадках доцільно координатні осі поєднати з осями симетрії заготовки. Використовується тільки одна координатна система – *XOZ.*



а б

Рис. 5.10. Схеми деформування плоскими бойками

2. Другий етап формулювання граничних умов. На горизонтальних поверхнях інструменту граничні умови очевидні. Для деформування плоскими бойками (див. рис. 5.10, а), якщо нижній бойок нерухомий, а верхній рухається зі швидкістю v_n, граничні умови записуємо у вигляді

$$z = 0;\ v_z = 0;\ z = h;\ v_z = -v_n;\ x = 0;\ v_x = 0, \qquad (5.96)$$

а граничні умови (див. рис. 5.10 б):

$$x = 0;\ v_x = 0;\ x = b;\ v_z = -v_n;\ x = 0;\ v_x = 0. \qquad (5.97)$$

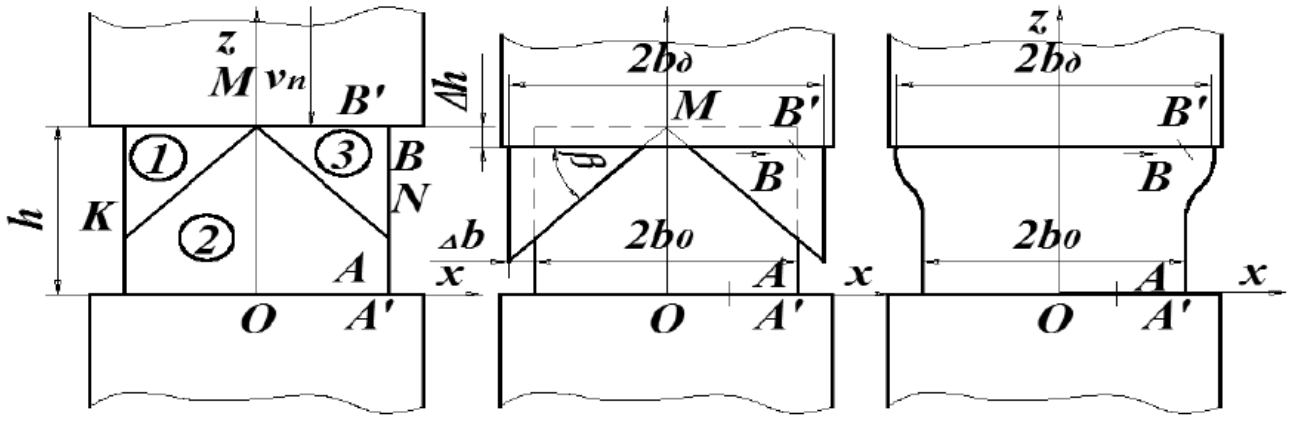
Однак у деяких випадках граничні умови не очевидні. Наприклад, при осаджуванні по схемі, наведеній на рис. 5.10, б, є два ступені свободи течії: вправо від поверхні $x = x_p$ й вліво від неї. Звідси виникає гранична умова вигляду

$$x = x_p;\ \ v_x = 0. \qquad (5.98)$$

Значення x_p може бути і невідомо. Воно буде визначено з принципу мінімуму повної енергії деформації.

3. Третій етап – розділення заготовки на жорсткі блоки. При розділенні слід врахувати не тільки динамічні, а й умови контактного тертя і температурно-швидкісні умови.

Заготовку слід розділяти на блоки похилими лініями (рис. 5.11).



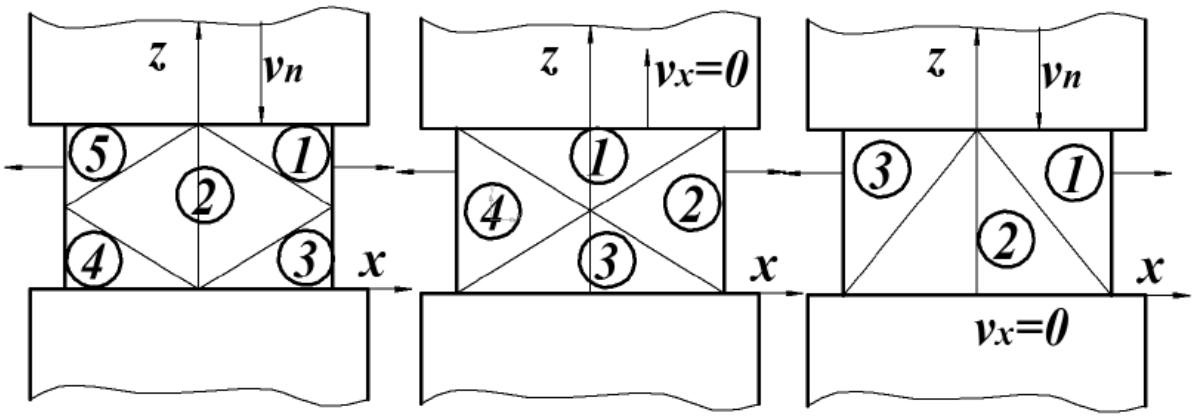
а б в

Рис. 5.11. Схема розділення заготовки на блоки і її формозмінення

Візьмемо, наприклад, розділення, показане на рис. 5.11, а. Переміщення верхнього бойка вниз виявляється можливим тільки в тому випадку, якщо блоки 1 і 3 зміститься вниз і вліво по площинах *KM* і *MN* (див. рис. 5.11, а). Після їх зміщення на Δh заготовка набуде вигляду, показаного на рис. 5.11, б. При осаджуванні реальної металевої заготовки розриви згладжуються (див. рис. 5.11, в). Нескінченно близько лежать одна від одної частинки матеріалу заготовки *A* і *A*' в процесі осаджування не зміщуються одна відносно одної, це обумовлено тим, що блок 2 – жорсткий

Такий стан є можливим у тому випадку, якщо: а) нижній торець заготовки не змазаний, бойок шорсткий і заготовка прилипає до бойка $(\tau \to k)$; б) нижня частина заготовки більш холодна, а тому в ній напруження текучості більше, ніж у верхній. Частинки *B* і *B',* вибрані таким же чином, своє відносне положення змінюють. Частинка *B'* належить інструменту, а тому зміщується тільки вниз, частинка *B* належить блоку 3 і під час осідання заготовки разом з блоком переміщується вниз на Δh і вправо на $\Delta h\ ctg\beta$. Таке переміщення виявляється можливим у двох випадках: а) верхній торець заготовки змазаний, бойок полірований, а заготовка не прилипає до бойка $(\tau_k << k)$; б) верхня частина заготовки гарячіша, тому в ній напруження текучості менше, ніж в нижній.

З цих прикладів видно, що розділення, показані на рис. 5.12, коректні для таких умов: рис. 5.12, а – $\tau_k << k$; рис. 5.12, б – $\tau_k \to k$; рис. 5.12, в – на верхньому бойку $\tau_k << k$, на нижньому – $\tau_k \to k$.



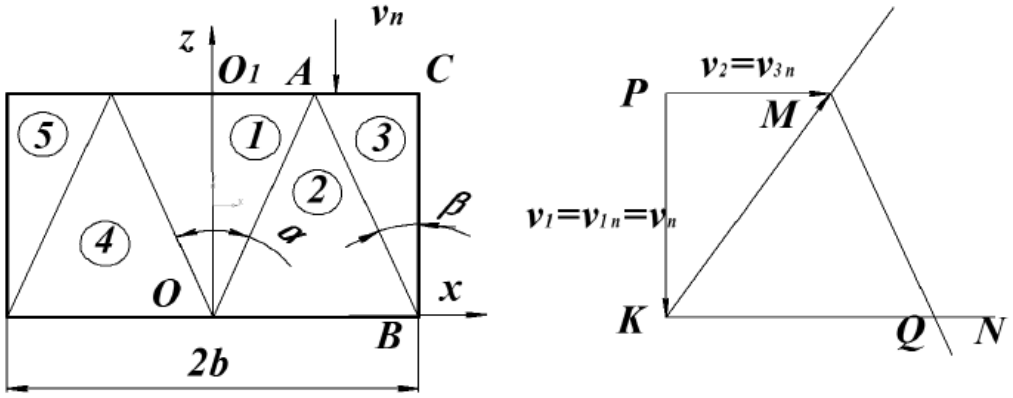
а б в

Рис. 5.12. Схеми розділення заготовки на блоки

4. Четвертий етап аналізу – побудова годографа за рівнянням

$$v_i = v_{in} + v_{io}. \qquad (5.99)$$

Тут v_i , v_{in} , v_{io} – вектори повної швидкості блока з номером *i,* переносний і відносний. Розглянемо найпростіший приклад (рис. 5.13).



а б

Рис. 5.13. Схема розділення заготовки на блоки (а)
і годограф швидкостей (б)

Через симетрію заготовки розглянемо тільки праву частину і для неї побудуємо годограф. Починаємо побудову з блока 1. Від полюса відкладаємо вектор повної швидкості блока 1. Це вектор v_1, який дорівнює v_{1n} , і за умови $z = h$, $v_z = - v_n$ отримуємо $v_1 = v_{1n} = v_n$. $v_1 = v_{1n}$ внаслідок симетрії заготовки (блок 1 у цьому разі не зміщується ні вліво, ні вправо).

Блок 2 рухається разом з блоком 1 і може зміщуватися внаслідок руху блока 1 по лінії ОА. Тому беремо $v_1 = v_{2n}$. v_{20} спрямовано з кінця вектора v_1 (точка *K*) по лінії *KL* так, щоб *KL* || *OA.* Уздовж *KL* спрямовано вектор v_{20}, який невідомий. Однак відомо, що блок 2 може рухатися тільки вздовж осі ОХ. Це твердження виражає граничну умову $z = 0$, $v_z = 0$. Тому з полюса *P* проводимо *PM* || *OX*. Отримуємо трикутник *PKM*, сторони якого відображають векторне рівняння (5.98) для блока 2 (*i = 2*).

$PK = v_1 = v_{2n}$; $KL = v_{20}$, отже, $PM = v_2$. Таким чином, швидкісний стан блока 2 відображають вектори v_{2n}, v_{20}, v_2, при цьому

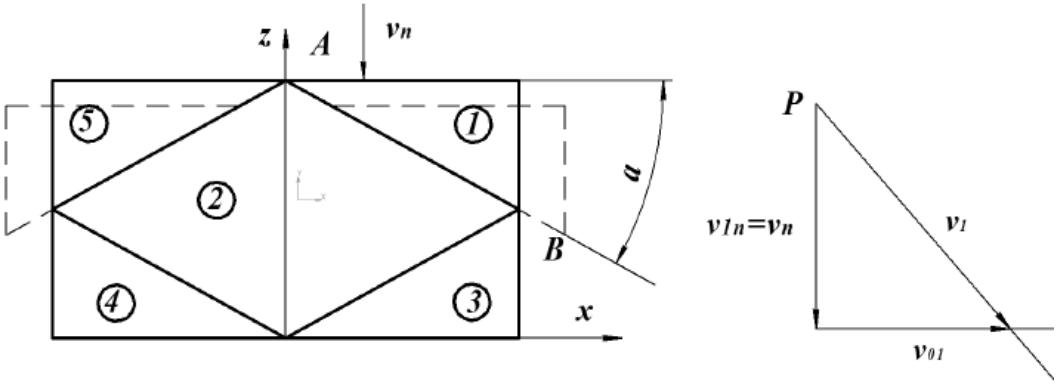
$$v_{2n} = v_n,\ v_{20} = \frac{v_n}{\cos\alpha};\ v_2 = v_n tg\alpha. \qquad (5.100)$$

Блок 3 рухається разом з блоком 2 і може зміщуватися відносно нього по лінії *AB.* Тому беремо $v_2 = v_{3n}$; v_{3n} спрямовуємо з кінця вектора v_2 (точка *M*) по лінії *MN* так, щоб *MN* || *AB* . Уздовж *MN* спрямовано вектор v_{30}, але його розмір невідомий. Однак відомо, що блок 3 може рухатися тільки разом з верхнім бойком. Тому його вертикальна швидкість має дорівнювати v_n. З кінця вектора v_1 (точка *K*) проводимо *KQ* || *PL.* Полюс *P* з'єднуємо з точкою Q. Отримуємо трикутник *PLQ*, сторони якого відображають векторне рівняння (5.98) для блока 3 (i = 3). Дійсно, $PL = v_2 = v_{3n}$, $LQ = v_{30}$, отже, $PQ = v_3$. Таким чином, швидкісний стан блока 3 відображають вектори v_{3n}, v_{30} і v_3, при цьому

$$v_{3п} = v_п tg\alpha;\ v_{3o} = \frac{v_п}{\cos\beta};\ v_3 = \sqrt{v_п^2 + (v_п tg\alpha + v_{3o}\sin\beta)^2}. \qquad (5.101)$$

У полюсі *P* мають обов'язково збігатися вектори повної швидкості v_i для будь-якого блока *i*. Зазвичай відносні швидкості позначають v_{3-2}. Це означає, що вектор відображає відносну швидкість переміщення блока 3 відносно блока 2.

Розглянемо один з випадків, коли для побудови годографа потрібно застосувати інверсію і змінити розташування координатної системи: поєднати її з осями симетрії. Звернемося до рис. 5.14, а. Спроба побудувати годограф описаним вище способом не вдається. Дійсно, якщо взяти $v_{1n} = v_n$, $v_{10} = v_x$ і v_1 спрямувати уздовж *AB,* то отримаємо годограф, показаний на рис. 5.14.

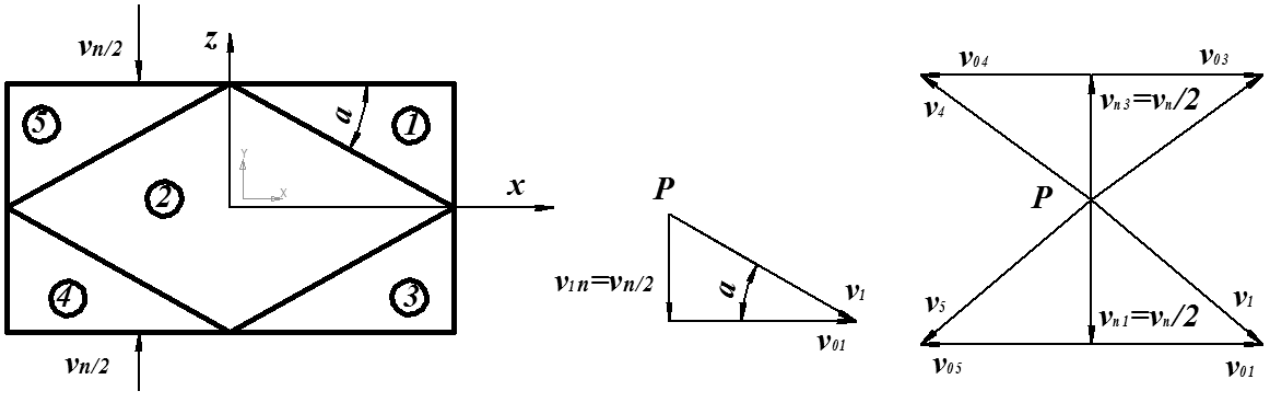


а б

Рис. 5.14. Схема деформації і годограф швидкостей для осаджування за рис. 5.12, а

Як видно зі схеми (рис. 5.14, а) і годографа (рис. 5.14, б), перехід до побудови годографа для блоків 2 і 3 не виходить. Це пов'язано с тим, що ми не знаємо, чи рухається блок 2 по осі *Z*, а якщо рухається, то з якою швидкістю.

Щоб побудувати годограф, перенесемо осі координат у центр заготовки і на всю систему накладемо швидкість $+v_z = 0{,}5v_n$. Тоді отримаємо схему, показану на рис. 5.15. Ця схема враховує подвійну симетрію форми заготовки. Тому можна розглядати 1/4 заготовки. Але можна побудувати і повний годограф для всіх блоків.



а б в

Рис. 5.15. Схема деформації (а) і годографи швидкостей (б, в)

П'ятий етап визначення F_k і F_p для кожного блока. $F_{k1} = OA \cdot L = h \cdot tg\alpha \cdot L$ (див. рис. 5.15). Тут L – розмір заготовки по осі y; $F_{k2} = OB \cdot L = b \cdot L$; $F_{k3} = AC \cdot L = L \cdot (b - h \cdot tg\alpha)$.

Як видно , F_{ki} – це площі поверхні і-го блока, що безпосередньо примикають до інструменту.

Також очевидно, що F_{pi} – це площі поверхонь розриву швидкостей, тобто тих поверхонь, які поділяють суміжні блоки. Наприклад, $Fp = OA \cdot L = hL/\cos\alpha$. З креслення заготовки значення F_{pi} знаходять за допомогою простих геометричних співвідношень.

Шостий етап – вибір σ_s і τ_k за довідниками. Беремо $\tau_s = \sigma_s/2$. Значення τ_k задаємо або за формулою Зібеля $\tau_k = \mu\sigma_s$, або за формулою Кулона $\tau_k = \pm\mu\sigma_n$.

Сьомий етап – визначення зусилля деформування за формулою (5.94). Для кожного виділеного блока з креслення знаходимо відповідні значення F_{ki}, і F_{pi}, з годографа визначаємо v_{ki} і v_{pi} і підставляємо їх у рівняння (5.94).

Модуль 2
ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Тема 6. Роль обробки металів тиском (ОМТ) та класифікація методів ОМТ

Процеси обробки металів тиском (ОМТ) порівняно з іншими визначаються як процеси, в яких відбувається пластична деформація по всій товщині, головним результатом процесу є збереження маси. Хоча значні пластичні деформації виникають при утворенні стружки під час різання металу, подібні процеси не розглядаються як процеси пластичного деформування, а тільки як процеси, що відбуваються зі зменшенням маси. Тому металообробку або формоутворення металу за допомогою пластичної деформації визначають як операцію, в якій змінення форми оброблюваної деталі або заготовки не супроводжується видаленням значної кількості металу як головним методом змінення форми. Деякі процеси, такі, як різання металу, зачистка, вирубка, пробивка і т. п., можуть включати різання металу і появу стружки. Проте вони належать до процесів ОМТ, оскільки основна їх частина відбувається з пластичним формозміненням або вони є важливою частиною подальшого формозмінення, наприклад вирубка заготовок для подальшої глибокої витяжки.

ОМТ полягає в деформації заготовки до певної форми за допомогою інструментів, штампів або матриць. Проектування інструменту і процесу залежить від характеристик деформівного матеріалу, умов на поверхні інструмент–матеріал, механізму пластичної деформації, застосовуваного обладнання та вимог до готової деталі.

Процес гарячої ОМТ давно використовують для забезпечення міцності, ударної в'язкості, надійності й якості різноманітних деталей. Вироби, спроектовані з деталей, виготовлених методами ОМТ, здатні витримувати найбільш високі навантаження. У результаті останніх досягнень, що полягають у переведенні раніше не оброблюваних методами ОМТ матеріалів на отримання їх пластичним деформуванням розширило граничні показники при проектуванні. З економічної точки зору поковки також привабливі завдяки притаманним їм надійності, допусків і легкості, з якою вони можуть бути піддані подальшому обробленню.

Результатом керування деформацією під час процесів ОМТ є поліпшені механічні характеристики металу. Найчастіше заготовки попередньо обробляють для поліпшення дендритної структури злитка і для видалення дефектів, уникнення порушення суцільності литої структури. Так отримують найкращу орієнтацію зерен, що виявляється у важливій анізотропії показників міцності, пластичності, ударної в'язкості і втомної міцності. Поковки проектуються з метою максимально наблизити форму до кінцевої деталі, тому коефіцієнт використання матеріалу істотно вище, ніж у деталей,

отриманих механічним обробленням з прокату. Наскільки близько можна наблизити розміри поковки до кінцевої деталі залежить від ступеня компромісу між ціною на складну оснастку для ОМТ і на ціну подальшої механічної обробки. Порівняно зі зварними конструкціями поковки є міцнішими через властиве для зварювання непроварення і наявність мікротріщин зварного шва.

Проектувальники визнають зростаючу роль ударної в'язкості й утомної міцності в загальній надійності деталей механізмів. Ковані поковки мають в'язкість і міцність для опору номінальним навантаженням плюс пластичність для опору руйнуванню під дією непередбачених ударних навантажень, які можуть перевищувати розрахункові. Завдяки правильно орієнтованій структурі будови поковки можуть мати максимально можливі для певного матеріалу механічні властивості, більші, ніж при інших процесах обробки, а отже, і найбільший термін експлуатації.

У результаті маємо більше відношення міцності до ваги, що може бути використано для зменшення товщини, ваги конструкцій без порушення вимог безпеки. Економія ваги, навіть для дешевих матеріалів, може бути наслідком великої економії протягом усього життя деталі. Крім очевидних переваг економії ваги завдяки високому відношенню міцності до ваги, можливі й інші економічні переваги, наприклад економія ваги означає меншу площу для подальшої механічної обробки, що досягається також і застосуванням різних довідних операцій ОМТ.

Поковки мають високі показники однотипності й одноманітності одержуваних деталей. Їх виробляють шляхом ретельно контрольованих послідовностей переходів, уникаючи випадкової течії матеріалу. Стабільність у структурі й властивостях, починаючи від різних частин деталі і закінчуючи від партії до партії, забезпечує відтворювану реакцію на подальше температурне оброблення, найменші відхилення в оброблюваності різанням і постійні властивості остаточно оброблених деталей.

Розмірні характеристики поковок також украй стабільні. Поковки одна за одною є копією штампувального завершального рівчака, тому можливість передачі спотворення форми виключається. При досить великих термінах виробництва, коли знос штампів стає впливовим чинником, застосовують різні заходи підтримки визначальних розмірів штампів для утримання будь-яких відхилень у межах допуску.

Із застосуванням різних довідних операцій економічно доцільним є випуск поковок самих різних розмірів і форм. Проте деталі з невеликими отворами, внутрішніми порожнинами і карманами, а також жорсткими обмеженнями на форму потребують більш трудомісткої обробки і, отже, доцільним є випуск таких деталей тільки великих розмірів.

Характерна для поковок однорідність подрібненої кристалічної структури забезпечує хороше термооброблення різними способами і отримання після цього максимально можливих механічних характеристик.

Поковки зі зварюваних матеріалів майже не мають структурних дефектів і мають гарну кристалічну структуру. Отже, поковки можна зварювати будь-якими методами зварювання з отриманням міцного і надійного зварного шва.

Майже повна відсутність внутрішніх мікротріщин і включень біля поверхні забезпечує сприятливі умови для подальшої обробки різанням (гострінням, фрезеруванням, свердлінням), давильними процесами, електрохімічними методами, а також нанесенням покриттів електро- і плазмовим напиленням. Однорідність поковок і відсутність поверхневих включень підвищує економічність обробки різанням, оскільки зменшується знос різального інструменту і небезпека його поломки внаслідок стикання з підповерхневими дефектами.

Поковки легко піддаються процесам збирання за допомогою рознімних, зварних, клепаних та інших з'єднань. Крім того, поковки можуть бути спроектовані таким чином, щоб взагалі уникнути подальшого збирання.

У багатьох випадках поковки готові для застосування у зборці без додаткової обробки різанням. Іноді необхідно обробити тільки остаточними методами робочі поверхні, нанести декоративні та захисні покриття.

Важливим питанням у виробництві дорогих і складних деталей є уникнення браку, що характерно для авіаційного виробництва, коли методами ОМТ можна виготовити всі комплектуючі деталі без жодного випадку браку.

ОМТ розвивається з доісторичних часів, коли почали обробляти метали, які знаходились у вільній формі, такі, як золото або метеоритне залізо, цинк, свинець, мідь та інші. Найбільш ранні свідоцтва про найпростіші кування золота і міді зустрічаються в різних районах Середнього Сходу близько 8000 років до н. е. Оброблення цих матеріалів було грубим, оскільки процеси металургійного очищення руди були невідомі. Близько 4000 року до н. е. такі процеси були відкриті для міді, що стало початком «Мідного століття», коли були відкриті способи впливу на міцність металу шляхом його кування (зміцнення). У пошуках способів збільшення міцності були відкриті різні сплави міді та свинцю («Бронзовий вік») і заліза з вуглецем («Залізний вік»). Останній почався в 1200 р. до н. е., що пояснюється відсутністю методів досягнення високих температур, необхідних для виплавки та очищення залізної руди.

До XIII століття більшість процесів ОМТ виконувалося вручну. У цей час був винайдений падаючий молот для кування смуг і пластин. Після підйому молота енергією падаючої води коваль дозволяв йому падати під силою власної ваги, виконуючи удар по ковадлу. Такий порівняно простий пристрій використовували до минулого століття.

Розвиток прокатного устаткування привело до розвитку і кувального. У записах Леонардо да Вінчі 1480 р. знаходимо ескізи прокатного обладнання для отримання свинцевих пластин. У 1495 році да Вінчі отримав лист

металу в ручному двовалковому прокатному стані. Однак отримання продукції прокату гарячекатаного листа заліза великого розміру затрималося на 200 років унаслідок обмеженого постачання заліза. До XVIII століття прокатні стани приводилися в рух енергією води.

Під час індустріальної революції наприкінці XVIII століття було винайдено багато процесів отримання заліза і сталі. Виникла потреба в кувальному обладнанні великої потужності. Були винайдені високошвидкісний паровий молот, в якому молот підіймався енергією пара, і гідравлічний прес, в якому тиск створювався в гідросистемі. Методами ОМТ одержували продукцію, яка варіювалася від вогнепальної зброї до частин локомотивів. Подібним чином парові двигуни стимулювали і прокатне виробництво.

За останні 100 років спостерігався розвиток нових типів обладнання для ОМТ і нових матеріалів з особливими властивостями і застосуванням. Нові типи обладнання включали механічні й гвинтові преси, високошвидкісні послідовні прокатні стани. Завдяки цьому з'являлися такі нові матеріали, як низьковуглецеві сталі, сплави на основі алюмінію, титану та нікелю.

За останні 20 років створення спрощених методів математичного аналізу формоутворювальних процесів привело до можливості отримання високоякісної продукції і підвищенню ефективності ковальсько-штампувального виробництва. Розвиваються нові процеси з нових матеріалів, удосконалюються методи регулювання поведінкою матеріалу під час процесів ОМТ і спрощеного проектування оснащення та інструменту. Набули поширення такі нові методи, як радіальні, ротаційні, прецизійні, ізотермічні процеси ОМТ, металопорошкове виробництво і процеси листового штампування, в яких використовують явище надпластичності. Розвиток процесів ОМТ привів до розширення можливостей оброблення нових високоміцних, температуроміцних матеріалів, що поєднують міцність і ударну в’язкість. Розвиток комп'ютерної техніки стимулювало застосування скінченно-елементного аналізу, що поліпшило як методи проектування оснащення і технологічних процесів, так і розуміння поведінки матеріалу. Маючи відомості про характеристики матеріалу, про умови в робочій зоні (тертя, теплопередача) і геометрію заготовки на виході програми скінченно-елементного аналізу, отримують потрібні навантаження, розподіл напружень, деформацій і температур.

Для класифікації процесів ОМТ використовують безліч критеріїв. Основні з них такі:

1. Відбувається чи ні деформаційне зміцнення як при холодному, так і гарячому обробленні металів.

2. Тип напруженого стану в оброблюваній деталі в процесі ОМТ.

3. Чи мають місце під час формоутворення істотні змінення товщини деталі як при об'ємному штампуванні, так і обробленні листових матеріалів.

4. Розмір зони деформування, деформація локальна або загальна.

5. Форма деформації, чи є вона стаціонарною чи ні.

6. Швидкість деформації, чи є вона низькою, середньою або високою.

7. Первинні процеси, такі, як прокатка смуг і листів; вторинні процеси формоутворення, такі, як глибока витяжка та ін.

8. Тривалі процеси, такі, як прокатка і видавлювання, і періодичні, як об'ємне штампування в закритих штампах.

9. Відбувається чи ні отримання стружки.

Зазвичай процеси підрозділяють на такі види:

1. Згідно виду оброблюваної заготовки:

а) об'ємне штампування – вихідний матеріал має форму напівфабрикату, прутка та інші. оброблювана деталь має мале відношення поверхні до об'єму; деформування спричиняє великі змінення у формі і поперечному перерізі; пружною післядією зазвичай нехтують;

б) листове штампування – вихідним матеріалом є листовий прокат; оброблювана деталь має велике відношення поверхні до об'єму; деформація спричиняє великі змінення у формі, але невеликі в товщині; пружна післядія зазвичай значна.

2. Залежно від впливу деформації і температури на властивості:

а) гаряче оброблення – відбувається динамічне відновлення (відпочинок) без ознак зміцнення, температура деформування $0.7T_п < T < 0.8T_п$, де $T_п$ - температура початку плавлення;

б) тепле (напівхолодне) оброблення – відбувається деяке зміцнення, температура деформування $0.3T_п < T < 0.5T_п$;

в) холодне оброблення – відбувається повне зміцнення, температура деформування $T < 0.3T_п$.

3. Залежно від виду деформації:

а) стаціонарне оброблення – безперервне волочіння дроту;

б) нестаціонарне оброблення – об'ємне штампування;

в) змішане оброблення – видавлювання.

4. Залежно від схеми напруження:

а) стиснення – осадження, протяжка, калібрування, чеканення, видавлювання в закритих штампах, видавлювання, обтиск, прокатка, обкатка зустрічна і силова;

б) розтягнення – роздача, обтягування, формування рифтів;

в) стиснення і розтягнення – волочіння, глибока витяжка і скручування;

г) гнуття – по прямій і вигнутій лініях;

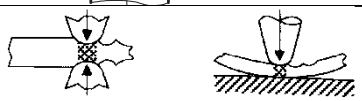
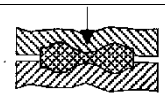
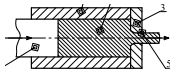
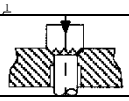
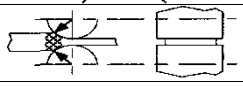
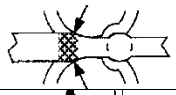
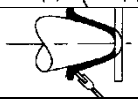
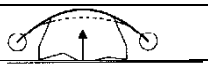
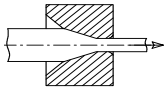
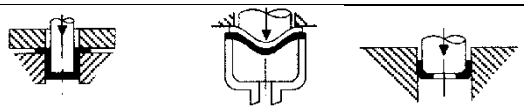
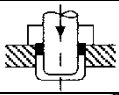
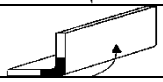
д) кручення;

е) зріз – обкатка вигином, об'ємне гнуття.

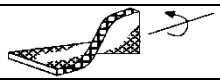
Однією з головних класифікаційних ознак поділ процесів проводять залежно від (1) руху інструменту відносно оброблюваної деталі, (2) геометрії інструменту, (3) геометрії оброблюваної деталі, (4) співвідношення геометрії інструменту і деталі (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Класифікація процесів ОМТ

Схема напруження	Процес	Схема процесу
Стиснення	Осаджування	
	Протягування	
	Чеканення	
	Штампування в закритих штампах	
	Видавлювання	
	Редуціювання	
	Обтиск	
	Прокатка	
	Періодична прокатка	
	Видавлювання на токарних станках (обкатка)	
	Силова обкатка	
Розтягування	Роздача	
	Обтягування с розтягуванням	
	Формоутворення рельєфу	
Стиснення і розтягнення	Волочіння	
	Глибока витяжка і згортка	
	Вигладжування	
Гнуття	Гнуття по прямій лінії	
	Гнуття по кривій лінії	

Закінчення табл. 6.1

Схема напруження	Процес	Схема процесу
Зсув	Обкатка зсувом	
	Пресування зсувом	
Кручення	Кручення	

Тема 7. Підготовка металу до ОМТ. Структура технологічних процесів ОМТ

Для кування і об'ємного штампування застосовують різні метали, що деформуються, і сплави, такі, як вуглецеві і леговані сталі, високолеговані сталі, жароміцні сплави, алюміній і його сплави, магній і сплави на його основі, мідь і мідні сплави, титан і його сплави, а також молібден, вольфрам, ніобій та ін.

Для кування і об'ємного гарячого штампування застосовують в основному сталь. Залежно від хімічного складу сталь буває вуглецева і легована; від призначення – конструкційна й інструментальна; від способу отримання – мартенівська, бесемерівська, томасівська; від способу розкислювання – спокійна, напівспокійна, кипляча. Киплячу сталь застосовують для плющення і в окремих випадках для кування. Недолік спокійної сталі – менший вихід придатного для штампування металу через збільшену додаткову частину. Напівспокійні сталі для кування застосовують рідко.

Низько- і середньовуглецеві і низько- і середньолеговані сталі не виявляють крихкого стану в широкому інтервалі температур при осаджуванні з мірою деформації 80 %, вони мають великий запас пластичності і належать до високопластичних металевих матеріалів.

Сталі високовуглецеві і високолеговані допускають одноразову деформацію при осаджуванні приблизно до 60 %, належать до матеріалів середньої пластичності. За наявності хімічної неоднорідності пластичність сталі знижується. Кількість і форма розподілу неметалічних включень і газонасиченість литого металу можуть спричинити крихкий стан сталей під час гарячої обробки тиском, якщо ці включення і газові пори досягають великих розмірів і розташовуються ланцюжком по межах зерен. Окрім різних сталей для кування і гарячого об'ємного штампування застосовують жароміцні сплави, основними складовими елементами яких є залізо, хром, нікель, вольфрам, молібден, ніобій, ванадій та ін. Для об'ємного штампування і кування широко застосовують також алюмінієві і магнієві сплави.

До алюмінієвих сплавів належать пластичні сплави АМц, Амг і АВ; сплави середньої пластичності – Д1, Д6, Д16, АК6, АК5; сплави низької пластичності –

АК8, В95, В96. До магнієвих сплавів належать сплави МА1, МА2, МА3, МА5, ВМ65-1. Для об'ємного штампування застосовують також мідні сплави – латуні і бронзи, такі, як Л62, Л59, ЛН65-5, ЛЖМц 59-1-1, БрАМц-9-2, БрАЖ-9-4, БрАЖМц10-3-1, 5 та ін. До титанових сплавів, що деформуються, слід віднести сплави ВТ1, ВТ3, ВТ3-1, ВТ4 та ін. Кольорові метали і сплави поставляють для вільного кування і об'ємного штампування у вигляді пресованих або катаних прутків і зливків.

Сталеві заготовки для кування і об'ємного штампування

Початковими сталевими заготовками для кування і об'ємного штампування є зливки, тиснені болванки (блюми) і сортовий прокат. Зливок є заготовкою для великих кованих поковок, маса яких обчислюється в тоннах, а мінімальна площа найбільшого поперечного перерізу перевищує 1200 см^2 (> 390 мм, сторона квадрата > 350 мм). Зливки рідко застосовують для об'ємного штампування.

Залежно від габаритів і конструкції виробів зливки з конструкційної сталі можна виготовляти масою від 1200 кг до 350 т. Зливки з легованої сталі відливають меншою масою. Форма зливків є усіченою пірамідою з відношенням довжини до середнього поперечного розміру від 2 до 3. Поперечний переріз буває квадратним, багатокутним (6, 8, 12 – кутним) і круглим. Зливки, призначені для кування, відливають широким кінцем догори, щоб усадкова раковина розташовувалася в «додатку» (рис. 7.1). Знизу зливка є донна частина – піддон. Між донною і додатковою частинами знаходиться корпус зливка, який є металом, придатним для виготовлення поковок.

По перерізу і довжині зливки мають неоднакові механічні характеристики. Це є наслідком неоднорідності макроструктури і хімічної неоднорідності зливка, зокрема нерівномірного розподілу вуглецю. У зливках може бути значна кількість дефектів: усадкова дірчатість, плени, ліквацийна зона, тріщини, газові пухирі і неметалічні включення.

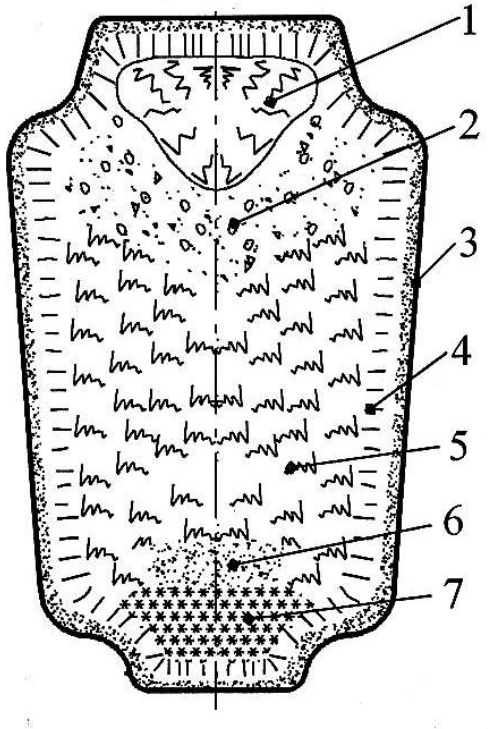


Рис. 7.1. Схема будови стального зливка: 1 – усадкова раковина; 2 – усадкова дірчатість; 3 – зона щільної дрібнозернистої будови; 4 – зона стовпчастих кристалів; 5 – зона середніх и крупних зерен; 6 – частина зливка зі щільною зернистою будовою; 7 – донна частина зливка, забрудненого домішками

Обтиснута болванка (блюм) є заготовкою для середніх кованих поковок, площа найбільшого поперечного перерізу яких знаходиться в межах від 130 до 1200 см^2 або діаметр від 130 до 400 мм. Обтиснуту болванку застосовують також для великих штампованих поковок. Переріз болванки – квадратний з увігнутими сторонами і закругленими кутами. Розміри перерізу коливаються від 140 до 450 мм (ГОСТ 4692-57), а довжина болванки – від 1 до 6 м.

Сортовий прокат є заготовкою для переважної більшості штампованих поковок. Сортовий прокат застосовують також при виготовленні дрібних кованих поковок, площа найбільшого поперечного перерізу яких лежить в межах від 20 до 130 см^2.

Оброблення початкових матеріалів для заготовок

Зачищення і правка початкового матеріалу. На поверхні зливків і прокату бувають різні місцеві дефекти (плени, тріщини тощо). Окрім цього, прокат може бути зігнутим. Перед обробленням металу місцеві дефекти видаляють, а зігнутий прокат правлять. Дефекти видаляють вирубуванням пневматичним зубилом, зачищенням абразивним кругом, вогневим зачищенням (виплавкою зварювальним електродом) у холодному (вуглецеві сталі) або підігрітому (інструментальні сталі) стані. При видаленні дефектів із зливків найбільш дешевим є вогневе зачищення без підігрівання. При великій кількості дефектів роблять суцільне зачищення усієї поверхні металу на обдирних, стругальних або фрезерних верстатах. Правку прокату перед обробленням на заготовки роблять на кривошипних або гідравлічних пресах.

Види оброблення початкового матеріалу для заготовок. Зливки і прокат готують до кування або штампування по-різному. Зливки обробляють в процесі самого кування, коли спеціальним інструментом (сокирами) відрубують донну і прибуткову частини. Зливки з інструментальної і високолегованої сталей розрізають на пилах. Процес різання на пилах буде розглянуто нижче.

Катаний метал для заготовок обробляють такими основними способами: різанням на прес-ножицях і кривошипних пресах; різанням пилами і абразивами; ламанням в холодноламах; газовим різанням.

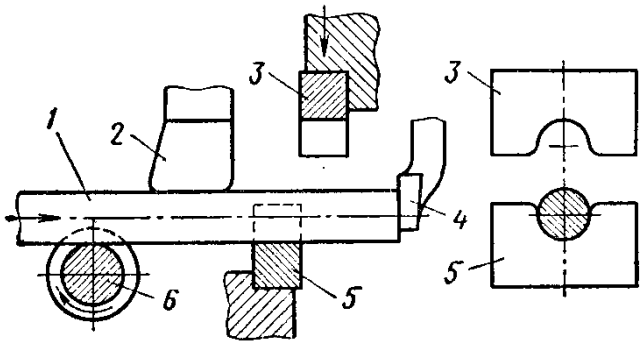


Рис. 7.2. Схема укладення прутка для різання на ножницях

Існують також оброблення прутків: рубанням на молотах вільного кування, різким електрозварюванням (оплавленням) і електроіскровим різанням. Слід назвати новий спосіб безвідходного оброблення прутків для заготовки – рубання на установках вибухової дії.

Різання на прес-ножицях і кривошипних пресах. Різання на

прес-ножицях є основним способом оброблення прутків із сталі (рис. 7.2). Прес-ножиці є ексцентриковими пресами різної конструкції, на яких ріжуть прутки діаметром від 15 до 300 мм. На кривошипних пресах проводять різання прокату діаметром менше 40 мм

Схему різання показано на рис. 7.3. Два ножі 2 і 5 закріплені в гніздах повзуна і станини ножиць. По упору 3 встановлюють довжину заготовки 4, а притискач 1 притискує пруток до нижнього ножа. Виникаюча пара сил спочатку повертає пруток на кут φ_3 від первинного положення, незважаючи на наявність притиску. Відрізувана частина прутка в процесі різання обертається більше, ніж інший пруток, і до моменту закінчення різання має кут $\varphi_П$. Повороту прутка перешкоджає сила притиску *Q*, тому кут невеликий. Сили $P_в$ і $P_н$ є рівнодійними нерівномірного зминального напруження, що діє по торцях ножів. Кромки ножів мнуть метал і зрізують його на глибину *C*, причому утворюється блискучий поясочок, перпендикулярно до якого діє пара сил *T*. Урізування ножів супроводжується утягненням сусідніх ділянок металу.

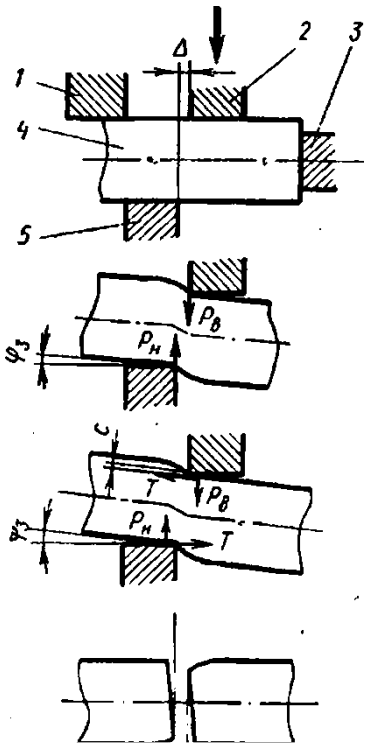


Рис. 7.3. Схема різання пруткана ножицях

На ліву частину прутка діє сила $P_н$ і сила притиску Q, які перешкоджають повороту цієї частини прутка, тоді як на праву частину діє сила $P_в$, що повертає відрізуваний кінець. З урахуванням сили Q і маси прутка сили, що діють з боку верхнього і нижнього ножів, неоднакові і $P_н > P_в$. В останню мить зрізання, зважаючи на велику концентрацію напруження, від кромок ножів утворюються тріщини, що йдуть одна назустріч одній, відбувається сколювання, і заготовка відділяється від прутка. Тріщини збігаються в одну тільки при певному оптимальному проміжку між ножами Δ.

При проміжку, меншому оптимального, тріщини заходять одна за одну і утворюється нова тріщина, що сполучає кінці попередніх, а на поверхні сколу утворюються так звані козирки, які при подальшому штампуванні або куванні можуть дати затиски на поверхні поковки. Великий проміжок Δ призводить до великого утягання і задиркам. Те ж відбувається при затупленні ножів. Практично рекомендується робити проміжок Δ в межах 2…4 % від товщини (діаметра) прутка, що розрізається

Для зменшення перекосу зрізу потрібно збільшити силу притиску або різальні кромки ножів виконати під кутом не 90°, а 84°. Велике значення при різанні має правильна конструкція ножів. Ножі конструюють таким чином. Габаритні розміри ножів встановлюють відповідно до розмірів ножового простору прес-ножиць або штампа. Ширина ножів *b* визначається їх конструкцією. Висота ножів визначається відстанню між опорними плитами у момент розкриття

ножів і необхідною величиною перекриття, яка відвертає ножі від зіткнення у разі неправильного налагодження або послаблення кріплення ножів.

Різання сталевих прутків з низьковуглецевої або низьколегованої сталі діаметром менше 150 мм роблять у холодному стані. Середньовуглецеві і леговані сталі перед різанням заздалегідь підігрівають до температури 450…550 ^{0}C, оскільки, зважаючи на знижену пластичність цих сталей, з'являються торцеві тріщини. Таке ж нагрівання застосовують і для низьковуглецевої сталі при діаметрі більше 80 мм, якщо зусилля ножиць недостатнє і бажано знизити зусилля зрізу.

Для отримання чистішого зрізу низьковуглецеві сталі нагрівають до 250…300 ^{0}C. Ці температури знаходяться в зоні синьоламкості сталі, коли опір деформації збільшується, а в'язкість знижується, внаслідок чого і виходить чистіший зріз. Таке підігрівання використовують рідко.

Високовуглецеві і леговані сталі перед різанням іноді нагрівають до температури 700 ^{0}C для зниження зусилля зрізу і зменшення можливості утворення тріщин. Вище 700 ^{0}C сталі не нагрівають, оскільки утворюється окалина, сильно спотворюється площина зрізу і з'являються великі вм'ятини при різанні.

Продуктивність різання дуже велика. При холодному різанні прутка діаметром 65 мм продуктивність коливається від 1000 до 2000 штук у годину при довжині заготовок від 100 до 1500 мм.

Слід сказати про новий вид прес-ножиць, в яких різання відбувається з одночасним скручуванням, що покращує якість різання. Зусилля різання P, необхідне для різання ножами, що відповідають профілю прокату, розраховують за формулою

$$P = i\,\sigma_в\,F.$$

де і – коефіцієнт для сталі, який дорівнює 0,6…0,9; $\sigma_в$ – границя міцності при розтягуванні металу, що розрізається, при температурі різання, МПа; F – площа перерізу металу, що розрізається, м^2. Приблизно

$$P = 0{,}7(0{,}8)\,\sigma_в F.$$

У технічних характеристиках ножиць зазвичай вказується максимальний переріз прокату, що допускається, з границею міцності при розтягуванні $\sigma_в$ = 450 МПа.

Різання на пилах. Різанням на пилах виконують переважно оброблення прутків з кольорових металів і сплавів, які не можна різати на прес-ножицях внаслідок того, що відбувається зминання. Різання на пилах застосовують також для оброблення прутків з високовуглецевої або легованої сталі і при великих профілях прокату з конструкційної сталі. Пили бувають дискові та стрічкові. Дискові пили мають діаметр диска від 200 до 800 мм. При діаметрі диска 800 мм можна розрізати прутки діаметром до 300…350 мм. На стрічкових пилах можна розрізати відразу декілька прутків, що збільшує продуктивність.

Прутки на пилах розрізають у холодному стані з охолодженням емульсією. Торець виходить рівний і перпендикулярний до осі заготовки. Якість різан-

ня на пилах найвища порівняно з іншими видами різання, за винятком електроіскрового різання. Продуктивність різання на пилах нижча, ніж на пресножицях. При різанні на дискових пилах відхід металу на пропил становить від 3 до 8 мм, що відповідає товщині диска.

Окрім пил з різальними зубами іноді застосовують дискові пили тертя – беззубі або з тупими зубами. Колова швидкість обертання дисків таких пил становить 125 м/с. При натисненні на метал він розігрівається від тертя в місці контакту і оплавляється, таким чином, відбувається його прорізання. Основним недоліком пил тертя є різкий шум.

Анодно-механічні пили застосовують при різанні нікелевих сплавів типу німонік і деяких інших пластичних і міцних сплавів. Ці пили мають електродиски без зубів. До диска підводиться електричний струм (дуга), який при різанні проходить через контакт, – проміжок між диском і металом, що розрізає, і виходить швидке оплавлення в місці контакту. Окрім дискових анодно-механічні пили бувають також стрічковими.

Різання абразивами, що обертаються, абразивними дисками застосовують при обробленні високолегованих крихких сталей і сплавів.

Ламання на штампах-холодноламах. Ламання на штампах-холодноламах застосовують для оброблення сталевих прутків з великих профілів діаметром 100…150 мм, особливо з легованої сталі. Штампи-холоднолами встановлюють на кривошипних або гідравлічних пресах. Є спеціальні горизонтальні гідравлічні преси-холоднолами.

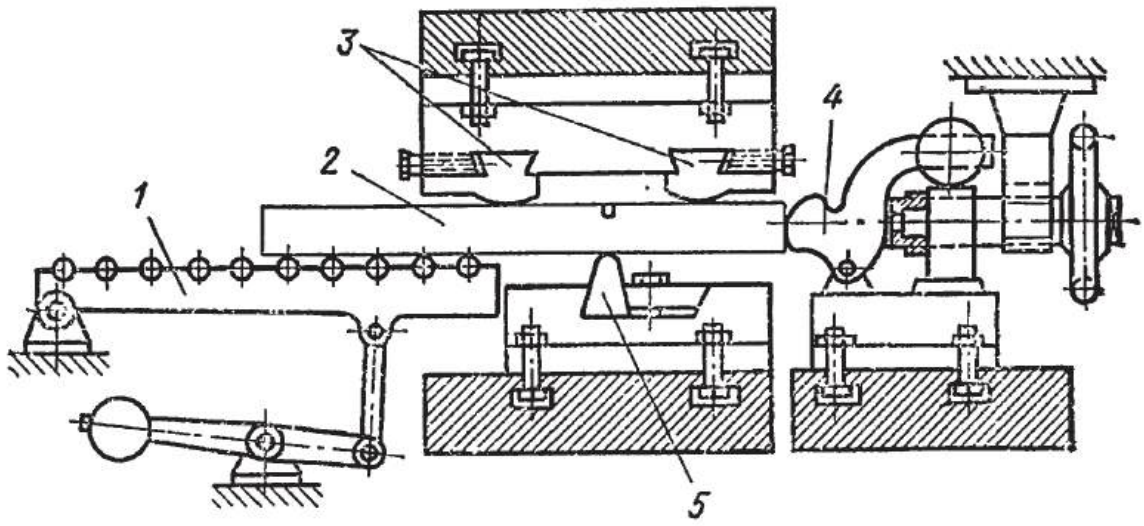


Рис. 7.4. Схема холодного ламання з регульованим упором і хитким рольгангом:
1 – хиткий рольганг; 2 – надрізана штанга; 3 – сухарі;
4 – регульований упор; 5 – нерухомий ніж

Схему різання на штампах-холодноламах показано на рис. 7.4. Пруток, що розділяється на заготовки, зазвичай укладають на ніж, на який тиснуть

опори, прикріплені до повзуна преса. Може бути також і зворотна схема – з кріпленням ножа до повзуна. На ламаному прутку різанням на пилах або газовим різанням роблять надріз глибиною *h* = 10 мм. Ширина надрізу b, що отримується пилою або ножівкою, залежить від інструменту (5 мм). Надріз газовим різаком має ширину *b* = 5 мм. Пруток встановлюють на ніж так, щоб надріз знаходився прямо навпроти ножа. При натисненні внаслідок високої концентрації напруження в місці надрізу з'являється тріщина і відбувається крихкий злам. Торець заготовки при ламанні виходить досить рівним, іноді з нахилом. На торці залишається сходинка від надрізу перед ламанням, що утруднює установлення заготовки в штампі при штампуванні осаджуванням в торець. За видом зламу контролюють якість металу. Продуктивність при ломанні на штампах-холодноламах висока і наближається до продуктивності при різанні на прес-ножицях.

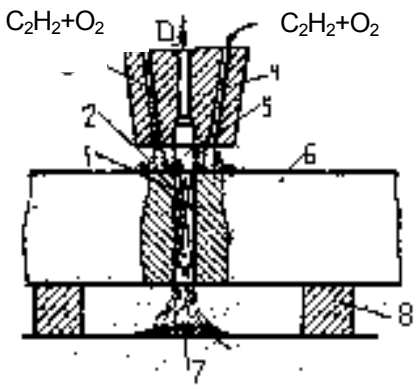


Рис. 7.5. Схема газового різання:
1 – порожнина розділу; 2 – підігрівальне полум'я; 3 – підігрівальний мундштук; 4 – різальний мундштук, 5 – різальний кисень; 6 – заготовка; 7 – шлак; 8 – підкладка

Газове різання. Газове різання застосовують для оброблення прутків із сталі. Обробленню підлягають переважно великі профілі зі стороною квадрата до 300 мм. Схему газокисневого різання показано на рис. 7.5. Суміш ацетилену і кисню подається через підігрівальний мундштук. Полум'я спрямовується в початкову точку розрізу і швидко нагріває метал до температури його горіння. Потім через центральний отвір пальника подається кисень і метал згоряє. Шлаки розплавляються і видуваються з порожнини зрізу. Для газового різання потрібні певні властивості металу, перелічені нижче.

1. Температура займання металу має бути нижча температури плавлення (умова можливості здійснення процесу). За температуру займання приймають температуру, при якій метал інтенсивно окиснюється струменем кисню, що діє на його нагріту поверхню. Високоякісне газове різання можливе при згорянні металу в твердому стані. Сталь, що містить вуглецю більше 0,7 %, при різанні одночасно горить і розплавляється, внаслідок чого порожнина розділу виходить широкою, а поверхня нерівною.

2. Оксиди металу мають бути рідкотекучими і мати нижчу температуру плавлення, ніж метал (умова, що забезпечує видування шлаку з порожнини розділу в рідкому стані).

3. Теплота, що виділяється при згорянні металу, і теплота підігрівального полум'я мають бути достатніми для підтримки нагрівання на рівні те-

мператури займання впродовж усього періоду різання (умова, необхідна для безперервності процесу різання).

4. Теплопровідність металу має бути як можна нижчою (умова, яка сприяє локалізації тепла в зоні різання)

5. У металі вміст елементів, які погіршують процес різання, має бути обмежений.

Цим умовам відповідають тільки низьковуглецеві і низьколеговані сталі. Високолеговані хромисті, хромонікелеві, вольфрамові та інші сталі не задовольняють перелічені умови і піддаються різанню лише кисневим флюсом.

Продуктивність ацетиленового різання порівняно невелика. Наприклад, квадрат розміром 100х100 мм розрізають за 1 хв. При інших видах палива продуктивність ще нижча. При різанні згоряє шар металу завтовшки від 3 до 10 мм, що іде у відхід. Окрім різаків для ручного різання існують машини і автомати.

Тема 8. Нагрівання металу перед ОМТ

Нагрівання металу для обробки тиском здійснюють з метою підвищення його пластичності і зменшення опору деформації. Це одна з найважливіших операцій обробки тиском, від якої значною мірою залежить точність розмірів виробів, їх якість, правильне використання устаткування, інструменту та ін. Нагрівання має забезпечити рівномірну температуру по перерізу заготовки, її мінімальне окиснення і зневуглецювання.

Розрізняють два основні способи нагрівання металу: прямий і непрямий. Якщо тепло передається металу внаслідок зіткнення його поверхні з яким-небудь середовищем (газоподібним, рідким), нагрітим до більш високої температури, то таке нагрівання є непрямим. Якщо тепло акумулюється безпосередньо в самому металі, а температура навколишнього середовища залишається нижче температури металу, то таке нагрівання називається прямим.

Непрямим є нагрівання металу в печах, розплавлених солях, електролітах. Прикладом прямого нагрівання може бути нагрівання металу, що відбувається при пропусканні через нього електричного струму (контактний, індукційний).

Чим вище теплопровідність металу, тим швидше відбувається проникнення теплоти всередину заготовки, тим менше потрібно часу на вирівнювання температури по поперечному перерізу виробу. Теплопровідність залежить від хімічного складу сталі: чим більше в ній легуючих елементів і вуглецю, тим менше її теплопровідність. З підвищенням температури теп-

лопровідність легованих сталей підвищується, а вуглецевих – знижується. Теплопровідності цих сталей вирівнюються при температурі 700…800 °С.

Теплоємність вуглецевих сталей менше теплоємності легованих сталей. Чим вище теплоємність металу, тим більше потрібно часу для вирівнювання температури по перерізу заготовки.

При нагріванні заготовки в усіх випадках має місце перепад температур по поперечному перерізу. Цей перепад тим більше, чим більше переріз заготовки, що нагрівається, і швидкість нагрівання. Внаслідок перепаду температур в металі створюється значне додаткове напруження, наявність якого за певних умов може призвести до його руйнування. Поява додаткового напруження в металі є наслідком нерівномірної зміни його об'єму при нагріванні та охолодженні.

При температурах вище 550 °С усі сталі, включаючи леговані, стають пластичнішими, тому подальше різке збільшення температури не порушує цілісності металу, що нагрівається. Відомо, що сталі, особливо низьковуглецеві, мають високу пластичність і при нижчих температурах (0…550 °С), тому швидкість їх нагрівання може бути значною і в цьому температурному інтервалі.

При температурі закінчення деформації границя міцності усіх сталей значно менше (у 5–8 разів) границі їх міцності у початковому стані. Це дозволяє здійснювати деформацію сталевих заготовок без їх руйнування і використати устаткування, потужність якого у декілька разів менше потужності, необхідної для деформації сталі в холодному стані.

Вибір способу нагрівання і типу нагрівального пристрою значною мірою визначаються розмірами заготовок, що нагріваються. Зливки, призначені для кування, пресування і плющення, нагрівають у полум'яних печах різної конструкції, в яких використовуються різні види палива: тверде, рідке, газоподібне.

Нагрівання заготовок для штампування виконують і непрямим, і прямим способами, тому вживані при цьому нагрівальні пристрої значно відрізняються. Особливо це характерно для індивідуального і дрібносерійного виробництв, що характерно для авіаційної промисловості.

Одне з головних завдань проектування і розроблення термічного режиму обробки металів тиском полягає у встановленні відповідного температурного інтервалу, тобто температур початку і кінця оброблення металу.

Розрізняють допустимий і технологічно необхідний, оптимальний інтервали оброблення. Допустимий інтервал температур залежить від складу і структури оброблюваного металу, а необхідний – визначається умовами технологічного процесу оброблення. Допустимий інтервал температур встановлюють на підставі металургійних і металознавчих даних про метали, які характеризуються відповідними діаграмами стану.

При виборі верхньої межі температурного інтервалу кування необхідно мати на увазі, що при високих температурах нагрівання інтенсивне окиснення металу відбувається не лише з поверхні заготовки, але й по межах зерен з частковим їх оплавлянням; при цьому зв'язок між зернами порушується, і метал при деформації руйнується. Це явище називається перепалом. Перепал є непоправним браком. Теоретично у сталі з вмістом вуглецю 0,2 % перепал настає при температурі 1470 °С, а у сталі з вмістом вуглецю 1,1 % С – при 1180 °С.

Нагрівання сталі вище верхньої межі температурного інтервалу супроводжується також інтенсивним зростанням зерна. Це явище називається перегріванням. Перегрівання також може бути результатом тривалої витримки металу і при нижчій температурі. У більшості випадків перегрівання можна виправити відпалом або нормалізацією, але це потребує виконання додаткових технологічних операцій, що негативно позначається на собівартості деталей.

Окрім окиснення сталі, що нагрівається, має місце ще і її зневуглецювання. Суть процесу зневуглецювання полягає в тому, що вуглець, який знаходиться у поверхневому шарі сталі, під шаром окалини, вигоряє. Внаслідок зневуглецювання погіршуються механічні властивості сталі. Процеси окиснення і зневуглецювання сталі залежать не лише від температури, але й від швидкості нагрівання, а також часу витримки сталі при температурі нагрівання. Ці параметри визначаються типом вживаного нагрівального пристрою.

У табл. 8.1 і 8.2 подано температури нагрівання і деформації деяких сплавів. Верхні значення температур належать до нагрівання і початку деформації при плющенні зливків, а нижні – при куванні й штампуванні.

Таблиця 8.1

Температура нагрівання і деформації деяких сталей

Сталь	Температура нагрівання, °С	Температура деформації, °С	
		Початкова	Кінцева
Низьковуглецеві	1150...1260	1120...1240	750...800
Вуглецеві, 0,5 … 0,8 % С	1150...1250	1120...1220	800...850
Марганцеві, що містять хром	1150...1230	1120...1210	800...850
Високовуглецеві	1070...1150	1040...1130	800...900
Інструментальні	1080...1140	1050...1120	850...900
Сталі ледебуритного класу	1090...1170	1060...1150	750...900
Перлітово-мартенситні сталі	1120...1200	1180...1190	750
Аустенітні	1150...1200	1120...1230	850...900
Аустенітні, жароміцні	1080...1210	1060...1190	900...950
Швидкорізальні	1100...1220	1080...1190	930...960

Таблиця 8.2

Температурні інтервали кування і штампування деяких кольорових сплавів.

Сплав	Температура деформації, °С	
	Початкова	Кінцева
АМц, Амг, АК6, АК6-1, АД31	470...420	350
Д1, АК8	470...440	400
АК2, АК4, АК4-1	470...420	350
МА2-1	420	300
ВМ17	420	350
ВМД1, МА13	480	400
ВТ1-00, ВТ1-0, ОТ4-0	1000...950	750...700
ОТ4-2	1100...1050	900...850
ВТ18, ВТ20	1150...1080	950
М1, М2, М3	950	800
ЛО90-1	900	850
ЛС59-1	780	640
БрА5, БрА7, БрАЖ 9-4	900	750
Бр Б2	800	650
БрКМц 3-1	780	600

Нагрівальні пристрої можна класифікувати:(1) за джерелом енергії – полум'яні печі й електричні установки; (2) за призначенням – ковальські і прокатні; (3) за принципом дії – з періодичним завантаженням і безперервним завантаженням (методичні).

У печах з періодичним завантаженням заготовки у процесі нагрівання залишаються нерухомими, завантаження і видача їх відбувається переважно через одне і те ж вікно; у методичних печах заготовки під час нагрівання пересуваються від місця завантаження до місця видачі.

У свою чергу, полум'яні печі підрозділяють:

(1) за типом вживаного палива – на печі, що опалюються твердим, рідким або газоподібним паливом; (2) за способом використання тепла газів, що відходять, – рекуперативні й регенеративні.

Вибір способу нагрівання і типу нагрівального пристрою визначається маркою металу, що нагрівається, і технологією його деформації. Для нагрівання сталей в основному застосовують полум'яні печі різної конструкції, а для нагрівання кольорових металів більшого поширення набули електропечі. Для нагрівання зливків застосовуються різні типи нагрівальних колодязів, шахтні печі, а також методичні печі, в яких зливок, що нагрівається, транспортується через різні температурні зони печі. Нагрівання зливків здійснюється також в камерних печах з одним або декількома вікнами, що закриваються. Гази, що відходять, видаляються через витяжну трубу. Гази, що відводять тепло, можуть бути використані для підігрівання палива і повітря, необхідного для під-

тримки горіння. Це тепло використовується в пристроях, що називаються рекуператорами і регенераторами, перші – безперервної дії, другі – періодичної.

У рекуператорах холодне повітря пропускається по трубах, зовні йдуть гази, що омивають. Регенератори є камерами, викладеними гратчастою вогнетривкою цеглою. Піч має мати два регенератори, які працюють поперемінно; один з регенераторів нагрівається газами, що проходять, а другий в цей час віддає холодному повітрю тепло, що проходить через нього, або газ.

Значного поширення набули нагрівальні печі з висувним черенем. Печі з двома череневими візками, що висуваються в обидві сторони печі, дозволяють використати їх без значних втрат часу.

У виробництві великих поковок застосовують тунельні печі з розташуванням зливків на окремих візках. Великі болванки підігрівають переважно в шахтних печах, а охолоджують в різних колодязних пристроях, у тому числі і не опалюваних.

Для опалювання печей використовують тверде, пилоподібне, рідке і газоподібне паливо, як тверде паливо – кам'яне вугілля, антрацит і кокс. У ковальсько-штампувальному виробництві для опалювання печей використовують в основному рідке і газоподібне паливо. Як рідке паливо застосовують мазут, що спалюється за допомогою спеціальних форсунок. Як газоподібне паливо застосовують природний газ і штучні гази. Газоподібне паливо спалюється за допомогою пальників низького і високого тиску.

Для нагрівання металу в ковальсько-штампувальних цехах застосовують різноманітні нагрівальні пристрої. Швидке нагрівання металу забезпечують як полум'яні печі, так і електропечі з металевими і карборундовими (силітовими) елементами опору. Печі з силітовими опорами забезпечують нагрівання металу до 1200…1250 ^{o}C, а печі з металевими опорами – до 900…950 ^{o}C.

При нагріванні металу в печах теплота передається випромінюванням, конвекцією і теплопровідністю. Випромінювання є основним механізмом теплопередачі від нагрівального середовища і стінок печі. Конвекцією передається тільки 5…10 % теплоти. Теплопровідність забезпечує поширення і вирівнювання температури по перерізу заготовок.

Електронагрівальні пристрої – досконалий тип установок для нагрівання металу перед штампуванням. Нагрівання сталі електроконтактним способом відбувається внаслідок проходження електричного струму через метал, що нагрівається, і джоулева тепла, що виділяється при цьому, кількість якого пропорційна квадрату сили струму *J*, опору металу *R* і часу проходження струму *t*, що нагріває:

$$Q = 0{,}24\ J\ 2Rt. \qquad (8.1)$$

При нагріванні електроіндукційним способом температура металу підвищується під впливом вихрових струмів, що виникають у поверхневих шарах заготовки (скін-ефект). У обох випадках теплота виникає в самому металі, але нерівномірно по перерізу заготовки.

Електролітне нагрівання металу ґрунтується на ефекті інтенсивного нагрівання катода при проходженні електричного струму через водні розчини солей. За короткий проміжок часу (0,012–0,001 с) біля катода (заготовки) виникає газова сорочка (водень), через яку струм проходить у вигляді мікророзрядів. Джерелами, що нагрівають метал, є розряди і теплота газового шару.

До переваг електронагрівання у полум'яних печах належать такі:

– економія і велика швидкість нагрівання металу, відсутність необхідності подання повітря в робочий простір, що значно зменшує окиснення металу;

– підвищення стійкості штампового оснащення через відсутність на металі окалини, що спричиняє абразивний знос інструменту;

– поліпшення умов праці і підвищення продуктивності;

– підвищення якості продукції.

Недоліки електронагрівання металу пов'язані з відносно високою вартістю установок і електроенергії, труднощами підігрівання (вторинного нагрівання) ще не охололих заготовок і складністю нагрівання фасонних заготовок. Нагрівання в електроліті і сольових ваннах застосовують для заготовок невеликого розміру.

Під час нагрівання сталеві заготовки покриваються шаром окалини в результаті окиснення металу. Залізо швидше окиснюється під дією кисню, повітря і кисневмісних газів. Гази, що містяться в атмосфері полум'яних ковальських печей і окиснюють сталь такі: кисень, водяна пара, вуглекислий газ. Утворення окалини на заготовках спричиняє значну втрату металу (вигоряння). Вигоряння металу за одне нагрівання становить 2…3 % від ваги заготовки. Чим більше тривалість нагрівання, тим більше вигоряє метал.

Великим недоліком, що є наслідком нагрівання ковальських заготовок у звичайних полум'яних печах, є зневуглецювання шару сталі, що знаходиться безпосередньо під окалиною. На поверхні заготовки концентрація вуглецю в металі залежить від складу атмосфери печі і температури металу. У практиці ковальського нагрівання величина зневуглецьованого шару коливається від 0,1 до 2 мм, а іноді і більше. Головними зневуглецювальними речовинами є вуглекислий газ і водяна пара.

Найбільш доступним і ефективним засобом зменшення окиснення металу при нагріванні ковальських заготовок є прискорення процесу нагрівання. Найбільш доступним і елементарним засобом прискорення нагрівання і зменшення окалини є раціональне завантаження печі. Слід уникати завантаження заготовок у піч "навалом" і віддавати перевагу поштучному способу завантаження і розкладання заготовок на черені печі.

Найважливішим способом скорочення часу нагрівання заготовок є збільшення температурного напору, тобто різниці між температурою печі і температурою нагрівання металу. При збільшенні температурного напору зменшується окалиноутворення відповідно до зменшення часу нагрівання металу. Підвищення температурного напору досягається формуванням спалювання палива або установленням в печах додаткових форсунок і пальників. При

швидкісному нагріванні підвищується продуктивність печі, зменшується вигоряння в три рази і практично не відбувається зневуглецювання сталі.

Зі швидкісних способів без окисненого електричного нагрівання в ковальсько-штампувальному виробництві найбільшого застосування набуло **індукційне** нагрівання. При індукційному нагріванні джерелом енергії є електромагнітне поле змінного струму, що створюється спеціальним генератором. Електромагнітні хвилі, проникаючи в метал, виділяють у ньому тепло Джоуля. Таким чином, головною особливістю індукційного нагрівання є виникнення джерела тепла в металі, що нагрівається. Це дозволяє значно прискорити процес нагрівання порівняно зі звичайним пічним нагріванням. Слід зазначити, що внаслідок явища поверхневого ефекту змінний струм, що циркулює в заготовці, яка нагрівається, не заповнює усього її перерізу. Чим більше частоти струму, тим вище густина струму в зовнішніх шарах заготовки і тим тонше поверхневий шар, що піддається нагріванню. Практично струм проникає лише на деяку глибину, яка залежить від частоти струму і фізичних властивостей металу, що нагрівається.

Швидкісне індукційне нагрівання не погіршує мікроструктури сталі, оскільки при такій швидкості нагрівання можливе зростання зерна уповільнюється. Внаслідок короткочасності нагрівання окалина практично відсутня. Для ковальських заготовок діаметром 120 мм і вище найбільш доцільно застосовувати індукційне нагрівання струмами промислової частоти (50 Гц).

Внаслідок повної надійності режиму нагрівання і відносно малої питомої витрати електроенергії значного поширення в промисловості набув **контактний спосіб електронагрівання** ковальських заготовок. Необхідною умовою для рівномірного електронагрівання при контактному способі є рівномірний переріз заготовок по усій довжині між контактами. Контактне електронагрівання має велику перевагу перед індукційним, оскільки відпадає необхідність в дорогому устаткуванні (двигуни, генератори, індуктори). Контактні електронагрівальні установки під'єднуються безпосередньо до цехової електросилової мережі, питома витрата електроенергії на нагрівання ковальських заготовок знижується на 15…20 %; через легкість переходу з нагрівання заготовок одного діаметра на інший експлуатація установок електроконтактного нагрівання має достатню гнучкість.

При нагріванні заготовок великого перерізу потрібен значний струм при дуже великих перерізах дротів, із складною конструкцією контактів, що значно ускладнює конструкцію установки в цілому і підвищує її вартість. Тому контактні електронагрівальні установки проектуються і виготовляються з розрахунку нагрівання заготовок діаметром до 75 мм; найбільш доцільним є застосування для контактного електронагрівання струму промислової частоти.

Безокиснювальне електронагрівання в **електроліті** становить інтерес у технології виготовлення точних штамповок. Електронагрівання ґрунтується на явищі нагрівання катода (заготовки) при напрузі струму від 200 В і вище. При цій напрузі на катоді інтенсивно виділяється водень, що утворює навколо за-

готовки газову оболонку. Внаслідок поганої теплопровідності водню на катоді, тобто на заготовці, виділяється велика кількість тепла і відбувається нагрівання заготовки.

Нагрівання в електроліті дає кращі результати при постійному струмі, оскільки в широких межах дозволяє регулювати швидкість і температуру нагрівання, що важливо для ковальських заготовок. Цей спосіб нагрівання є ідеальним з точки зору відсутності окиснення і зневуглецювання сталевих заготовок.

Як електроліт рекомендується застосовувати 15%-ний розчин кальцинованої соди Na_2CO_3 (165 г на 1 л води), який на відміну від інших електролітів не спричиняє корозії металевих деталей нагрівальних установок і прийнятним щодо задоволення вимог техніки безпеки. Температура електроліту вибирається в оптимальному інтервалі 30…60 ^oC з коливаннями в межах 5…10 ^oC.

Нагрівання в електроліті є найдешевшим з усіх методів електричного нагрівання за розміром капітальних витрат. Проте його недоліком є нестійкість режиму, необхідність застосування постійного струму великої сили і кінцевого нагрівання заготовок, а також розбризкування солей при штампуванні на молоті. Спосіб можна рекомендувати для нагрівання під висадку кінців заготовок діаметром 25…30 мм.

Печі опору конструктивно виконують так само, як і полум'яні, з тією лише різницею, що замість форсунок і пальників у стінках монтуються металеві або силітові елементи опору. Перші використовуються для нагрівання заготовок з кольорових металів і сплавів, а другі – для нагрівання сталевих заготовок. Значною перевагою печей опору є можливість точного регулювання температури робочого простору, але рентабельність їх експлуатації залежить від місцевих умов і визначається передусім вартістю електроенергії.

При виробництві ряду деталей, наприклад турбінних лопаток із спеціальних сталей і компресорних лопаток з титанових сплавів, для захисту металу від окиснення як мастило застосовують дисперсне скло. Подрібнене скло спочатку розчиняється в кремнійорганічній смолі. А потім перед нагрівом заготовок в печі розчин тонким шаром наноситься на їх поверхню. Скло покриває заготовки і тонкою плівкою, не стікаючи навіть зі сферичних поверхонь заготовок, забезпечуючи при штампуванні заповнення металом навіть порівняно тонких ребер і виступів.

Заслуговує на увагу безокисневе нагрівання металу в розплавленому склі, коли заготовка не лише нагрівається до температури штампування, але одночасно покривається тонким шаром скла, що при подальшому обробленні відіграє роль мастила.

На відміну від звичайних пічних (у тому числі й регульованих) атмосфер захисні або контрольовані атмосфери створюються шляхом спеціального введення в піч газів, нейтральних щодо металу, який нагрівається. Захисні атмосфери широко використовуються в термічних електричних і муфельних печах і нині почали застосовуватися в нагрівальних печах з температурою

850…950 °С. Захисні атмосфери застосовуються також і в електропечах опору для нагрівання заготовок з кольорових металів і сплавів під кування і штампування.

Разом з електропечами для високотемпературного нагрівання ковальських заготовок в захисній атмосфері можна застосувати полум'яні печі, обладнані муфелем.

Для гарячої обробки металів тиском дуже важливим є суворе дотримання температури нагрівання металу, для чого необхідно її надійно контролювати. У виробничих умовах температуру контролюють шляхом вимірювання її за допомогою пірометрів.

Тема 9. Устаткування для пластичної обробки. Класифікація ковальсько-пресового устаткування

Ковальсько-пресові машини відрізняються одна від одної не лише за конструкцією і розмірами, але й за принципом дії. Залежно від характеру дії робочих органів (бойків або штампів) на заготовку і облаштування механізмів, що приводять в рух ці робочі органи, усі ковальсько-пресові машини поділяють на п'ять основних груп: молоти, гідравлічні преси, механічні преси, горизонтально-кувальні машини, спеціальні машини.

Молотами називаються ковальські машини, призначені для оброблення металів ударами частин, що падають. Молоти поділяють на пароповітряні, пневматичні і з механічним приводом.

Енергія падаючого тіла (баби, поршня зі штоком, бойка) тим вище, чим більше його маса і чим вище швидкість. Для посилення удару падаючі частини молотів примусово розганяють дією пари, стисненого повітря та іншими енергоносіями. У сучасних молотах маса падаючих частин іноді доходить до 125 тонн, а швидкість їх у момент удару досягає 3…8 м/с. Тепер застосовують високошвидкісні молоти, в яких невеликі за масою падаючі частини, але швидкість удару досягає 20 м/с.

Гідравлічні преси порівняно з молотами деформують метал зі значно меншими швидкостями. Навіть у швидкохідних пресів швидкість руху інструменту не перевищує 30 см/с. Тому, попри те, що маса рухливих частин у гідравлічних пресів буває дуже велика – перевищуючи іноді 9800 кН [1000 т], основну роботу вони здійснюють не завдяки масі та швидкості руху, а завдяки тиску, що створюється в їх робочих циліндрах за допомогою рідини. Чим вище цей тиск і чим більше площі робочих циліндрів, тим значніше зусилля, що розвивається гідравлічним пресом. Нині в гідравлічних пресах використовуються тиски до 98 МПа [1000 атм]. Зусилля найбільш великих пресів доходить до 685 МН [70 000 т].

Механічні преси деформують заготовку тиском робочих органів (повзуна із закріпленим на ньому інструментом), які приводяться в дію за допомогою різних механізмів, що перетворюють обертальний рух електродвигуна на зворо-

тно-поступальний рух інструменту. Найчастіше в їх приводі використовують кривошипно-шатунні, важільні й рейкові механізми.

Механічні преси принципово відрізняються від гідравлічних, а також від молотів тим, що у них існує жорсткий зв'язок (система механічних передач) між робочими органами і електродвигуном. Але під час деформації поковки основну частину роботи здійснює не електродвигун.

У системі приводу механічних пресів зазвичай передбачається обертовий елемент з великим моментом інерції – крутень. При вмиканні електродвигуна крутень розганяється і запасає значну енергію. Під час робочого ходу, коли робочі органи преса з'єднуються з крутнем, він віддає частину накопиченої енергії на деформацію металу. При цьому швидкість його обертання дещо зменшується. Зазвичай падіння швидкості невелике, не перевищує 20 %. У паузах між робочими ходами електродвигун знову розганяє крутень до попередньої швидкості.

Горизонтально-кувальні машини по суті є різновидом механічних пресів, оскільки в їх приводі використовується такий же кривошипний механізм, як і у багатьох механічних пресах. Проте горизонтально-кувальні машини прийнято виділяти в особливу групу, оскільки вони мають ряд особливостей, які забезпечують їм високу продуктивність.

Спеціальні машини надзвичайно різноманітні як за принципом дії, так і за пристроєм. Ці машини призначено для здійснення спеціальних видів кування або штампування.

Найбільшого поширення серед них набули ротаційні машини, дія яких ґрунтується на тому, що заготовка пропускається між валками, що обертаються, і деформується ними або закріпленими на валках штампами. За характером деформації робота ротаційних машин близька до роботи прокатних станів.

Спеціальні машини набувають все більшого поширення завдяки високій продуктивності і хорошій якості отримуваних виробів.

Пароповітряні молоти

Пароповітряні молоти для здійснення роботи – деформації заготовок – використовують енергію пари або стисненого повітря. Пара поступає до молота від парового котла, стиснене повітря подається по трубопроводах від компресора.

Пара і стиснене повітря називаються енергоносіями, оскільки вони передають рухливим частинам молота свою енергію, накопичену парою при нагріванні, а повітрям – при стисненні в компресорі. Зазвичай тиск пари дорівнює 685…880 кПа (7…9 атм), стиснене повітря подається до молота під тиском до 685 кПа (7 атм).

За призначенням пароповітряні молоти поділяють на кувальні й штампувальні. На кувальних молотах куванням або в підкладних штампах виготовляють поковки малої і середньої маси. Найширше застосовуються молоти з

масою падаючих частин 0,5…5 т. Якщо для виготовлення поковки потрібно молот з масою падаючих частин більше 5 т, доцільніше використовувати кувальні преси. На кувальних молотах можна обробляти зливки масою до 2 т.

Штампувальні молоти є основним устаткуванням для гарячого штампування. Штампувальні молоти застосовуються з масою падаючих частин 0,5…30 т, але найпоширенішими є молоти з масою падаючих частин 0,5…9 т.

За способом використання пари або стисненого повітря пароповітряні молоти поділяють на молоти простої і подвійної дії.

У молотах простої дії пару (стиснене повітря) використовують тільки для підйому падаючих частин у верхнє положення. Робочий хід (хід вниз) здійснюється в цих молотах під дією маси падаючих частин.

У молотах подвійної дії пара або стиснене повітря не лише піднімає падаючі частини у верхнє положення, але й давить зверху на поршень при робочому ході. Тим самим він збільшує силу удару, розганяючи падаючі частини до більш високої швидкості.

Молот простої дії

По трубопроводу пара або стиснене повітря подається в нижню порожнину робочого циліндра 2 (рис. 9.1).

Діючи на поршень 3, енергоносій змушує його рухатися вгору. З поршнем 3 пов'язаний шток 4, до нижнього кінця якого кріпиться баба 5. На бабі 5 встановлюється верхній бойок 6. Таким чином, при впусканні пари або стисненого повітря усі падаючі частини піднімаються вгору.

Поблизу верхньої кришки по колу циліндра розташовані отвори 1, через які повітря, що знаходиться над поршнем, виходить в атмосферу.

Коли поршень 3, піднімаючись вгору, доходить до отворів 1 і перекриває їх, над поршнем виявляється замкнутий простір. При подальшому ході поршня вгору повітря, що знаходиться в цьому просторі, стискатиметься. Таким чином, створюється повітряна подушка, яка забезпечує плавне гальмування поршня у верхньому положенні.

Коли баба підніметься на достатню висоту, паророзподільний механізм припиняє подання енергоносія в циліндр і повітря з-під поршня випускається в атмосферу. Тиск в циліндрі різко падає. Під дією власної маси рухомі частини поч-

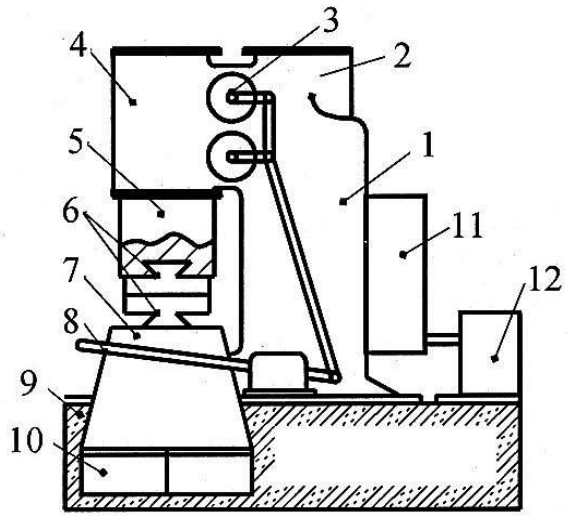


Рис. 9.1. Загальний вигляд пневматичного молота: 1 – станина; 2 – компресорний циліндр; 3 – повітророзподільний пристрій; 4 – робочий циліндр; 5 – шток-поршень; 6 – бойки; 7– шабот; 8 – педаль керування; 9 – фундамент; 10 – дубові бруси; 11 – редуктор; 12 – електродвигун

нуть падати вниз і бойок 6 ударить по заготовці.

Молоти простої дії прості за конструкцією і надійні в роботі. Проте вони не позбавлені недоліків. Передусім в цих молотах велика витрата енергоносія. У них не можна регулювати швидкість руху баби, тобто і силу удару. Нарешті, для того, щоб завдати удару такої ж сили, як і молотом подвійної дії, маса рухомих частин молота простої дії має бути значно більшою. Тому молоти простої дії витісняють досконаліші молоти подвійної дії.

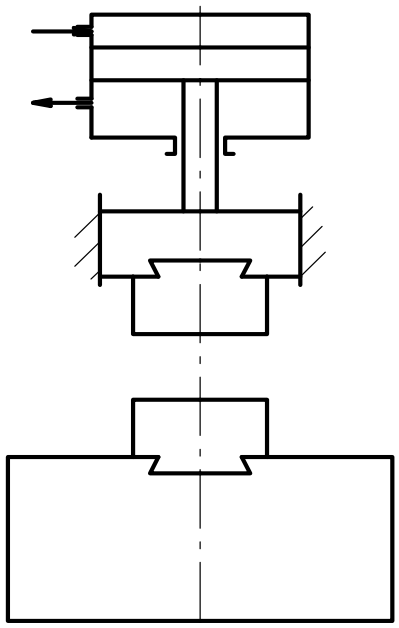


Рис. 9.2. Схема пароповітряного молота подвійної дії

У молотах подвійної дії енергоносій подається і в нижню, і у верхню порожнини робочого циліндра. Надходження його регулюється спеціальним розподільним органом-золотником, який у певних положеннях впускає енергоносій у циліндр і припиняє його подання.

На рис. 9.2 показано схему пароповітряного молота подвійної дії в стані ходу баби вниз для удару. Енергоносій поступає у верхню порожнину циліндра, тоді як в нижній порожнині відбувається вихлоп. Хід баби вгору здійснюється так само, як і у молота простої дії.

Залежно від призначення пароповітряні молоти можуть бути дуже різноманітні за конструкцією. Проте вони складаються з одних і тих же основних частин, зазвичай відрізняються за конструктивним виконанням: станини з фундаментною плитою, робочого циліндра, частин, що падають, шабота, паророзподільного пристрою з механізмами управління. Станина є основним елементом молота, на якому монтуються усі інші вузли машини. Станини поділяються на одностоякові і двохстоякові. Станина одностоякового молота має С-подібну форму, тому підхід до робочого простору забезпечується з трьох боків. Це створює значні зручності при роботі. Іноді для поліпшення умов роботи коваля шабот ставлять не паралельно фронту молота, а під деяким кутом (близько 35 градусів до осьової лінії станини).

Для забезпечення правильного руху частин, що падають, на станині зазвичай є спеціальні напрямні – сталеві пластинки з пазами, по яких ковзає баба. Завдяки напрямним шток молота досить стійкий і при ударі з ексцентриситетом. Тому молоти з напрямними зручні при роботі з підкладними штампами (коли неминучі ексцентриситети) і для операцій протягання.

Для виготовлення дрібних і середніх поковок іноді використовують молоти без напрямних. Правильний рух частин, що падають, в таких конструкціях забезпечується напрямними планками, які монтуються в нижній частині циліндра. Молоти без напрямних за конструкцією виявляються простішими, ніж молоти з напрямними, і вартість їх нижча. Крім того, їх зручніше обслуговувати,

оскільки підхід до робочого простору не закривається такими масивними напрямними. Проте напрям частин, що падають, у цьому випадку виявляється недостатньо надійним. Тому молоти без напрямних не рекомендується використовувати при роботі з ексцентриситетом. На рис. 9.3 показано пароповітряний кувальний молот, у якого напрямною є грандбукса.

Для виготовлення великих і важких поковок застосовуються двостоякові молоти.

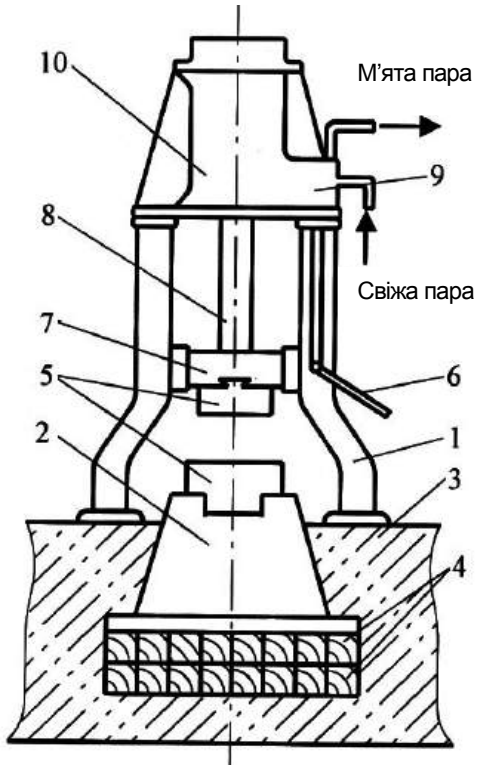


Рис. 9.3. Загальний вигляд кувального повітряного молота:
1 – станина; 2 – шабот; 3 – фундамент; 5 – бойки; 6 – рукоятка кування; 7 – баба; 8 – шток з поршнем; 9 – паророзподільний пристрій; 10 – робочий циліндр

Пневматичні молоти

Загальні відомості про пневматичні молоти. Пневматичні молоти приводяться в дію стисненим повітрям, що поступає не з цехової магістралі, а виробляється самим молотом за допомогою електродвигуна і компресорного циліндра.

Пневматичні молоти використовуються в основному для операцій кування. Вони будуються з масою частин, що падають, до 3 тонн, проте найбільшого поширення набули молоти, у яких маса частин, що падають, не перевищує 1 т.

Особливо широко пневматичні молоти використовують при куванні заготовок для інструменту і запасних частин.

У одноциліндрових молотах рух компресорного і робочого поршнів відбувається в одному циліндрі. При цьому компресорний поршень може бути розташований над робочим (так званий відкритий зверху циліндр) і під робочим (відкритий знизу циліндр) поршнем.

У молотах з циліндром, відкритим зверху, компресорний поршень приводиться в зворотно-поступальний рух кривошипним механізмом, а робочий поршень пов'язаний штоком з бабою. При русі компресорного поршня вгору під ним створюється розрідження. Внаслідок різниці тисків на робочий поршень (знизу – атмосферне, зверху – знижене) він разом з бабою піднімається вгору.

При ході компресорного поршня вниз повітря між поршнями стискається і баба завдає удару по поковці. Таким чином, робочий хід баби здійснюється завдяки її масі і тиску повітря, стисненого між робочим і компресорним поршнями, коли компресорний поршень опускається вниз, а піднімається – завдяки розрідженню в порожнині між поршнями, що виникає при ході компресорного поршня вверх.

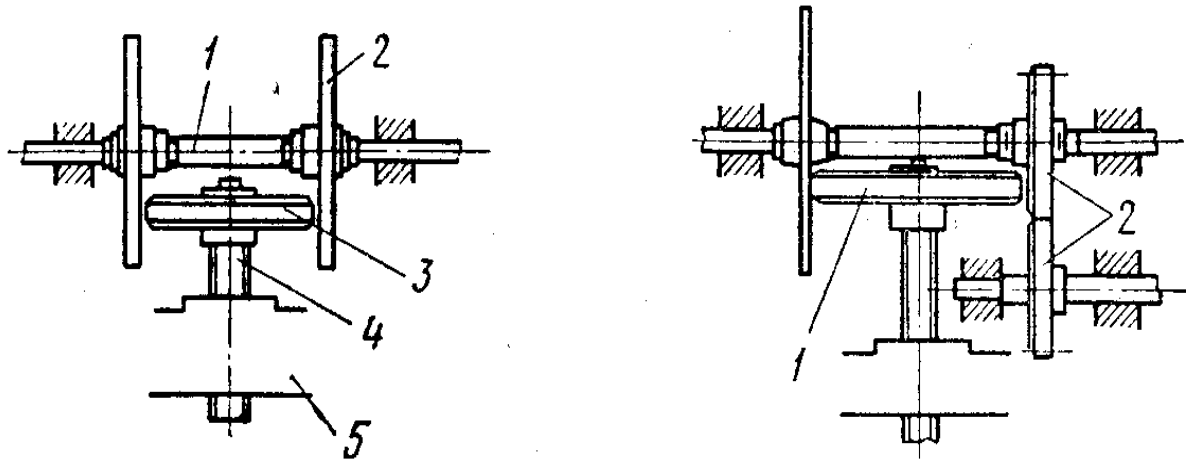
Молоти з механічним приводом

Гвинтові фрикційні молоти (преси) використовують для деформації поковки енергію, накопичену крутнем, що обертається.

За принципом дії ці машини дуже близькі до молотів (деформують матеріал завдяки кінетичній енергії рухомих частин), тому часто використовувана назва “преси” не відповідає характеру робочого процесу.

Гвинтові фрикційні молоти застосовують для гарячого штампування, холодного листового штампування, чеканення, холодного і гарячого гнуття, холодної правки і т. д.

Крутень молота приводиться в обертання ведучим диском, який притискається до крутня і передає йому рух завдяки силам тертя. За конструкцією приводу молоти поділяють на однодискові, дводискові (рис. 9.4, а), тридискові (рис. 9.4, б) і бездискові. Найбільшого поширення набули дводискові молоти.



а б

Рис. 9.4. Гвинтові фрикційні молоти:
а – схема приводу дводискового молота: 1 – горизонтальний вал; 2 – диски; 3 – крутень; 4 – гвинтовий шпиндель; 5 – верхня поперечина;
б – схема тридискового молота: 1 – крутень; 2 – диски піднімання

У дводисковому молоті рух від електродвигуна передається на горизонтальний вал 1 (рис. 9.4, а), на якому розташовані два диски 2. Відстань між дисками на 5…10 мм більше діаметра крутня 3, розташованого між ними. Диски можуть переміщатися в осьовому напрямку і по черзі притискатися до обода крутня. Якщо при увімкненому електродвигуні наблизити до обода крутня правий диск, то завдяки силам тертя крутень почне обертатися, захоплюючи гвинтовий шпиндель 4. Оскільки шпиндель проходить через нерухому гайку, встановлену у верхній поперечині 5 станин, при обертанні він почне "вигвинчуватися" з неї, піднімаючись вгору. Повзун повертається у верхнє крайнє положення. Після цього диск відводиться від крутня.

Швидкість підйому гвинтового шпинделя і пов'язаного з ним повзуна є змінною. На початку підйому вона максимальна, оскільки контакт між диском і крутнем відбувається по колу найбільшого радіуса. У міру підйому крутень наближається до осі диска, радіус кола контакту зменшується, а швидкість руху падає. Остаточна зупинка відбувається при відведенні диска і включенні гальма.

Для переміщення повзуна вниз до крутня притискається лівий диск. Крутень починає обертатися у зворотний бік, гвинт "угвинчується" в гайку, і повзун переміщується вниз. При цьому крутень накопичує енергію і, коли при наближенні штампа до заготовки лівий диск відводиться, рух відбувається за інерцією. Робочий хід – деформація заготовки – здійснюється завдяки кінетичній енергії частин, що рухаються. Витративши її, робочі частини преса зупиняються.

Для підйому повзуна до крутня знову притискається правий диск і прес повертається в початкове положення.

Гідравлічні преси

Дія гідравлічного преса грунтується на законі Паскаля, який свідчить про те, що тиск, який діє на рідину зовнішніми силами, передається нею по усіх напрямках без змінення.

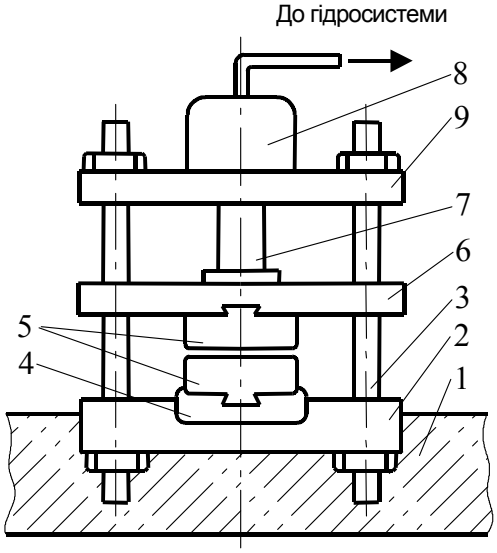


Рис. 9.5. Загальний вигляд гідравлічного преса: 1 – фундамент; 2 – нижня нерухома плита; 3 – колони; 4 – штампотримач; 5 – бойки; 6 – верхня рухома плита; 7 – шток-поршень; 8 – гідроциліндр; 9 – верхня нерухома плита

Рідина в пресі використовується як енергоносій. Вона передає енергію насоса робочому плунжеру, коли потрібно деформувати заготовку, і поворотним плунжерам, коли необхідно повернути поперечину в початкове положення. Між пресом і насосом у трубопроводі розміщується короб-

ка з клапанами або золотниками, що управляють потоком рідини, направляючи його або до робочого, або до поворотних циліндрів.

Робочий цикл гідравлічного преса складається з таких періодів: холостий хід, або хід наближення, коли поперечина наближається до заготовки; робочий хід, коли прес здійснює роботу, деформуючи заготовку; зворотний хід, при якому поперечина після завершення робочого ходу повертається в початкове положення. До робочого циклу входять також допоміжні операції: подання заготовки, видалення готового виробу та ін.

Холостий хід здійснюється рідиною низького тиску 0.39…1.18 МПа (4…12 кг/см^2). Джерелом низького тиску є система наповнення. Вона містить один або декілька наповнювальних баків, тобто закритих посудин, в яких рідина знаходиться під зазначеним вище тиском, а також наповнювальний клапан і трубопроводи. Іноді замість закритого застосовують відкритий бак, який ставиться вище рівня робочого циліндра, завдяки чому і створюється потрібний тиск.

У пресах малого зусилля холостий хід може здійснюватися від окремого насоса з малим тиском і поданням великого об'єму рідини. Робочий і зворотний ходи преса здійснюються під дією рідини високого тиску. Найбільш споживані тиски: 19,6; 31,4; 44,1 МПа (200, 320, 450 кг·см^2).

Існують два основні типи приводу рідиною високого тиску: насосний і мультиплікаційний. У свою чергу насосний привід буває чисто насосним і насосно-акумуляторним. Чисто насосний привід обслуговує тільки один прес. Звідси і друга його назва: індивідуальний. Рідина в робочі циліндри подається безпосередньо насосом. Такий привід економічний і компактний. Насос з редуктором і електродвигуном іноді встановлюють безпосередньо на пресі.

Насосно-акумуляторний привід частіше обслуговує декілька пресів відразу і відрізняється тим, що на шляху від насоса до преса ставиться акумулятор, тобто балон, в якому впродовж усього циклу роботи преса збирається, акумулюється рідина високого тиску. У потрібний момент (робочий, зворотний хід) акумулятор за короткий час віддає запас рідини, ніби компенсуючи бракувальну потужність насосів двигунів, забезпечуючи високу швидкість руху поперечини і необхідне зусилля преса.

Мультиплікатори є пристроями для додаткового підвищення тиску рідини перед поданням її в робочі циліндри.

У гідропресових установках зазвичай застосовують водні емульсії і олії. Використання води небажане головним чином через те, що вона спричиняє корозію трубопроводів і клапанних пристроїв.

Найбільш споживаною емульсією є 1–5%-ний розчин эмульсолу у воді. У вітчизняній промисловості використовують эмульсол Би (ГОСТ 1975-53), що складається з 85 % веретенної олії і 15 % асидолу.

У маслоприводах застосовують зазвичай олію веретенну 3 (ГОСТ 1707-51). Замість клапанних розподільників, як у разі застосування

емульсії або води, використовують простіші органи управління: золотники, а як джерела тиску – головним чином ротаційно-плунжерні насоси.

На відміну від молота робота гідравлічного преса здійснюється завдяки потенціальній енергії, накопиченій рідиною. Сили, що виникають у пресі при його роботі, замикаються в станині – рамі, утвореній колонами і поперечинами. На фундамент передається тільки маса преса. Тому, якщо фундамент молота роблять з розрахунком на сприйняття ним зусилля молота, а також інерційних сил, то при оснащуванні фундаментів гідравлічних пресів зазвичай враховують тільки масу преса.

Гідравлічні преси класифікують за конструктивними особливостями і технологічним призначенням. У першому випадку найбільш характерними ознаками є розташування циліндрів і тип станини.

Преси з вертикальним розташуванням робочих циліндрів називаються вертикальними, відповідно з горизонтальним розташуванням циліндрів – горизонтальними. У вертикальних пресах робочі циліндри найчастіше розташовують зверху станини.

Кривошипні машини

У ковальсько-штампувальному виробництві для гарячого і холодного штампування, витягування, гнуття, чеканення, прошивання тощо все ширше застосовують кривошипні машини. Цю загальну назву об'єднує в одну групу різноманітне за технологічним призначенням і конструкцією устаткування. Проте, незважаючи на різноманіття цих машин, для них характерна наявність у приводі кривошипних механізмів, що перетворюють обертальний рух електродвигунів на зворотно-поступальне переміщення інструменту.

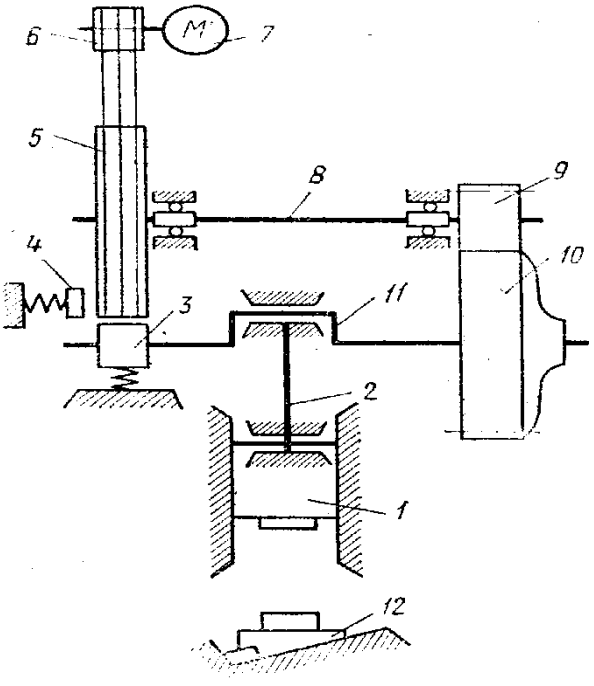


Рис. 9.6. Схема кривошипного преса: 1 – повзун; 2 – шатун; 3, 4 – тормоз; 5 – крутень; 6 – шків; 7 – електродвигун; 8 – вал; 9, 10 – зубчасті колеса; 11 – колінчастий вал; 12 – клиновий пристрій

Кривошипні преси мають ряд важливих переваг порівняно з молотами і гідравлічними пресами. Молоти мають серйозні недоліки. Якщо не вживати спеціальних заходів щодо віброізоляції, вони розхитують будівлі, негативно позначаються на роботі розташованих поблизу машин. Сильний шум, що супроводжує роботу молотів, спричиняє швидке стомлення робітників. Преси мають низький ККД.

Гідравлічні преси безшумні і не спричиняють сильних струсів, проте дуже тихохідні й порівняно дорогі.

Кривошипні преси певною мірою позбавлені цих недоліків і об'єднують достоїнства молотів і гідравлічних пресів. Їх робота не супроводжується ударами, тому не призводить до струсів грунту і не розхитує будівлі. Кривошипні преси не потребують дорогих, громіздких і трудомістких у виготовленні фундаментів. При роботі вони чинять менший шум, ніж молоти. У них ККД вище, ніж у пароповітряних молотів. Кривошипні преси дозволяють отримувати точні вироби з невеликими припусками на подальше оброблення.

У той же час кривошипні преси мають і свої недоліки. Вартість їх значно вища за вартість молотів. Вони є менш універсальними. При роботі механічних пресів часто бувають випадки заклинювання (розпору). Вивести прес із стану розпору не завжди буває легко. Проте навіть з урахуванням цих недоліків механічні преси завдяки своїй продуктивності та зручності в роботі застосовуються все ширше.

Кривошипні машини, призначені для обробки тиском, різноманітні за призначенням, особливостями конструкції, зусиллями, що розвиваються, і т. д. За найважливішим технологічним принципом – основним, для яких вони призначаються, кривошипні машини можна поділити на такі групи: гарячештампувальні преси; листоштампувальні преси; преси чеканення (калібрувальні); горизонтально-кувальні машини; ковальські автомати (преси-автомати); ножиці.

Крім цих основних груп, є також преси обрізання, правильні преси, горизонтально-згинальні преси (бульдозери) та інші види кривошипних машин.

На гарячештампувальних кривошипних пресах виконують гаряче штампування поковок у відкритих і закритих штампах (зокрема, штампування витискуванням).

Листоштампувальні преси призначені для оброблення листового матеріалу: гнуття, витягування, вирубування і т. д.

Преси чеканення (калібрувальні) призначені для чеканення: нанесення на поверхню заготовки неглибокого рельєфу. На пресах чеканення виготовляють монети і медалі, вибивають візерунки і написи, виконують чистову обробку – калібрування поковок.

Типову схему кривошипного преса наведено на рис. 9.6.

Прес приводиться в рух електродвигуном 7. Малий шків 6, що знаходиться на валу електродвигуна, за допомогою клиноремінної передачі приводить в обертання крутень 5, закріплений на валу 8 не жорстко, а за допомогою фрикційного запобіжного пристрою. Він може передати з крутня на вал крутильний момент, який не перевищує певної величини, заданої конструктором. У разі виникнення більшого моменту (це може статися при порушенні технологічного процесу, а також з ряду інших причин) за-

побіжний пристрій починає прослизати і таким чином захищає вал 8 і елементи кінематичного ланцюга, що прямують за ним, від перевантаження. Для зупинки крутня є гальмо 4, яке вмикається автоматично, як тільки буде вимкнений електродвигун 7.

На іншому кінці вала 8 знаходиться мале зубчасте колесо 9, що знаходиться в зачепленні із зубчастим колесом 10, усередині якого змонтована муфта вмикання. Шатун 2 передає рух колінчастого вала 11 повзунові 1. На іншому кінці колінчастого вала встановлено гальмо 3, яке призначене для зупинки кривошипно-шатунного механізму преса (колінчастого вала, шатуна і повзуна) в певному положенні, що встановлюється при налаштуванні.

До повзуна преса кріпиться верхня частина штампа. Нижня частина штампа встановлюється на столі преса. Для регулювання положення нижньої частини штампа по висоті є двоклиновий пристрій 12.

Спеціальні машини

До групи спеціальних машин входить різноманітне як за принципом роботи, так і за конструктивним оформленням устаткування: стани подовжнього, поперечного і поперечно-гвинтового плющення; кувальні, вальці, ротаційно-кувальні, грохоти, електровисаджувальні та інші машини.

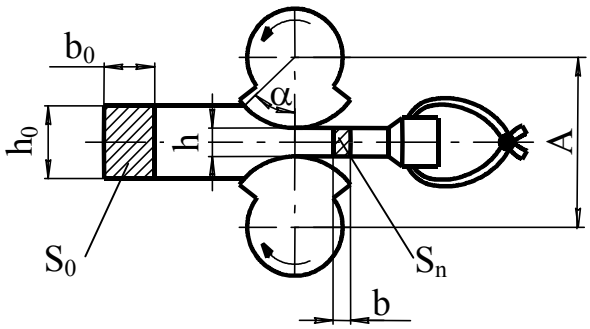


Рис. 9.7. Схема вальцювання: h_0, b_0 і h, b – висота і ширина заготовки до і після вальцювання

Кувальні вальці (рис. 9.7) за принципом роботи також близькі до прокатних станів. Вони мають два робочі валки, на яких встановлюються штампи (сектори). Подання заготовки відбувається у той момент, коли сектори вийшли з робочої зони. При цьому заготовка 1 подається до регульованого упора, розташованого на задньому столі вальців. При обертанні валків сектори в деякий момент стикаються із заготовкою і починають її деформувати, одночасно зрушуючи заготовку в напрямку, зворотному напрямку подання. Положення кільцевих секторів у момент закінчення вальцювання показано на рис. 9.7.

На кувальних вальцях зазвичай виконують підкатку і протягування заготовок під штампування, причому вальцювання і штампування часто здійснюють з одного нагрівання. Таким чином, вдається значно підвищити продуктивність устаткування, використати для штампування дешевший сортовий прокат замість того, що калібрується.

Виготовлення поковок на ротаційно-кувальних машинах (редукування) подібне операції витягування та полягає в місцевому стисненні заго-

товки по її периметру. Редукування проводиться в гарячому і холодному станах. Вихідною заготівкою є прокат круглого і квадратного профілів або труба. Типовими поковками, виготовленими редукуванням, є різного роду ступінчасті валики, конічні валики, труби з відтягнутими на конус кінцями тощо

Редукуванню в гарячому стані можуть піддаватися прутки діаметром до 150 мм і труби з зовнішнім діаметром до 300 мм. При виготовленні поковок ре-дукуванням може бути досягнута точність в межах 0,1...0,3 мм. Холодне обтиснення забезпечує отримання виробів з розмірами за другим класом точності і поверхнею по сьомого класу шорсткості без відходу металу і з продуктивністю приблизно в п'ять разів вище, ніж при токарній обробці.

Процеси редукування проводяться на ротаційно-кувальних машинах, які мають кілька бойків, що здійснюють велику кількість ударів. Ці машини виконуються в двох варіантах – з обертовими й необертовими бойками.

На рис. 9.8 зображено схему ротаційно-кувальної машини з обертовими бойками. Заготовка 1 у вигляді прутка поміщається між бойками машини 2, що знаходяться в шпинделі 3. При обертанні шпинделя завдяки роликам 4, поміщених в обоймі 5, бойки 2 здійснюватимуть удари по заготовці 1. Кількість ударів залежить від швидкості обертання шпинделя, кількості роликів в обоймі і одночасно діючих пар бойків. У машинах з необертовими бойками обертається обойма з роликами.

Розміри бойків визначаються розмірами гнізд для них в повзунах машини. Форма і розміри рівчака в бойках залежать від форми і розмірів вихідної заготовки і готового виробу. При цьому враховують таке: 1) для вільного введення заготовки в рівчак його вхідний контур повинен перевищувати переріз заготовки; 2) форма рівчака має забезпечувати вільне видалення готового виробу з рівчака при безперервній роботі бойків; 3) якщо ступінь обтиснення по діаметру на виході з рівчака становить понад 3 % від вихідних поперечних розмірів заготовки, то крім звичайних заокруглень на вході з рівчака необхідно передбачати ухили 7 º; з боку розніму між бойками – зазор 0,25 ... 1,5 мм; 4) найбільший кут конуса в струмку при скороченні з ручною подачею не повинен перевищувати 16 º, а при машинному поданні – 20 º; в основному рельєф рівчака має відповідати формі й розмірам готового виробу; 5) при обробленні виробів з труб на оправці діаметр останньої має бути на 0,4 ... 0,7 % менше внутрішнього діаметра готового виробу, а вільний передній кінець оправки зводиться на конус для більш легкого вилучення її з отвору в готовому виробі.

Бойки, повзуни і ролики ротаційно-кувальних машин виготовляють переважно зі сталі марок 5ХВС і У10 і термічно зміцнюють до твердості HRC 61-63. Холодне обтиснення супроводжується інтенсивним виділенням тепла, тому потребує попереднього змащення заготовок маслом і рясного охолодження бойків емульсією.

Для обтиснення заготовок застосовують також радіально-кувальні машини. Найбільшого поширення набули вертикальні три- і чотирибойкові машини. Бойки у цих машин розташовані в одній площині, перпендикулярній до осі оброблюваної заготовки, спрямовані радіально і утворюють навколо заготовки рівні центральні кути. Кожен бойок кріпиться до свого повзуна або безпосередньо до шатуна, який пов'язаний з ексцентриком. Усі ексцентрики мають загальний привід. Всі бойки обжимають заготовку одночасно. Вихідна гаряча заготовка кріпиться вертикально своїм кінцем в універсальній головці з затискувачем і, обертаючись навколо своєї осі, рухається в осьовому напрямку в механізм обтиснення.

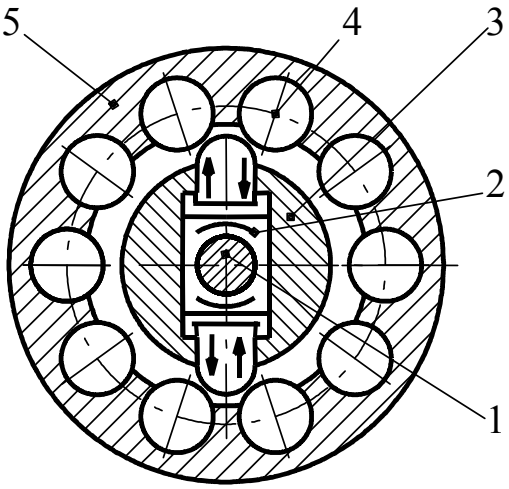


Рис. 9.8. Схема ротаційно-кувальної машини: 1 – заготовка; 2 – бойок; 3 – шпиндель; 4 – ролики; 5 – обойма

Для забезпечення обтиснення в радіальних напрямних механізм обтиснення під час робочого руху повертається разом із заготовкою навколо своєї осі і при зворотному ході бойків повертається у вихідне положення; при цьому заготовка, продовжуючи обертатися, змінює своє положення відносно бойків. Таким чином, забезпечується рівномірне витягування заготовки з кола на коло певного діаметра. Потім заготовка виводиться з механізму обтиснення, за допомогою повороту ексцентричних втулок в головках шатунів змінюється довжина останніх для наступної серії обтиснень, але вже на менший діаметр та ін.

Сучасні машини з зусиллями на кожен бойок 0,6 ... 1,6 МН (60 ... 160 тс) і більше виконують 420–600 обтиснень в хвилину. На них з прутків діаметром до 90 мм і труб діаметром до 1300 мм можна отримувати багатоступінчасті вали довжиною до 600 ... 1000 мм відповідно. Довжина передач, величина обтиснення і послідовність оброблення встановлюються заздалегідь. Рухи заготовки та бойків механічно пов'язані між собою. Весь цикл оброблення відбувається напівавтоматично за допомогою програмного керування.

Є також ротаційно-кувальні машини, в яких бойки здійснюють зворотно-поступальний рух у нерухомих напрямних (обертається не шпиндель, а обойма). Такі машини дозволяють отримувати вироби прямокутного (квадратного) поперечного перерізу.

Машини розкочування застосовують для виготовлення кільцевих поковок для підшипників та інших аналогічних виробів із заготовок, отриманих куванням на молотах або пресах, а також висаджених на горизонта-

льно-кувальних машинах. Шляхом розкочування можна отримати кільця складного профілю з високою точністю розмірів.

Електровисаджувальні машини призначено для висаджування грушоподібних потовщень на прутках. Отримана заготовка зазвичай подається для подальшого штампування на прес або молот.

Використання перелічених машин окрім високої продуктивності та скорочення відходів металу забезпечує значне зниження трудомісткості і, як результат, зменшення собівартості продукції.

Гідростати і гідростатичні преси

Звичайні преси мають істотний недолік: на внутрішній поверхні контейнера виникають значні сили тертя, які негативно впливають на хід технологічного процесу.

Наприклад, при пресуванні порошкових матеріалів поява сил тертя призводить до того, що тиск пресування зменшується у міру видалення від торця пуансона. Це спричиняє нерівномірну по довжині щільність спресованого брикету. Звичайний процес пресування порошкових матеріалів має і інший недолік. Матеріал спресовується тільки в осьовому напрямку. У поперечному напрямку пресування не відбувається. У результаті щільність пресування виявляється різною в подовжньому і поперечному напрямках. На рис.14.1, а показано пресування (витискування) металевої заготовки.

Обох цих недоліків можна уникнути, якщо забезпечити рівномірний усебічний (гідростатичний) тиск на поверхню заготовки. Саме така силова схема здійснюється в установках гідростатичного пресування.

При гідростатичному пресуванні брикет в еластичній оболонці встановлюється на підставці в контейнері, заповненому рідиною. Еластична оболонка має легко деформуватися при пресуванні заготовки і в той же час перешкоджати проникненню рідини в порошок. Зазвичай її виготовляють з гуми, алюмінію або свинцю. Після установлення заготовки контейнер за допомогою швидкодіючого затвора закривається кришкою і через отвір в нього подається рідина високого тиску від компресора або мультиплікатора. Рідина тиснить на заготовку рівномірно з усіх боків і забезпечує заготовці абсолютно однакову щільність на всіх напрямках. Після закінчення процесу пресування кришка контейнера відкривається, готовий виріб витягується, а на його місце в контейнер встановлюється чергова заготовка.

Установки гідростатичного пресування конструюють з тиском від 10000 кПа до 1 000 МПа (100…10000 кг/см^2) з контейнерами діаметром до 2 м. На них можна спресовувати вироби з будь-яким відношенням висоти до діаметра до щільності, близької до щільності монолітного матеріалу.

Безшаботні молоти

Для зменшення струсу ґрунту застосовуються так звані безшаботні молоти, схему однієї з конструкцій яких наведено на рис. 9.9.

Безшаботний молот має дві баби 1 і 3, пов'язані між собою сталевими стрічками 2, перекинутими через ролики 4. При поданні пари або стисненого повітря в циліндр 5 поршень 6, опускаючись, переміщає обидві баби назустріч одна одній. Потужність безшаботних молотів характеризується енергією вироблюваного удару. Будуються безшаботні молоти з енергією удару від 0,1 до 1,0 МДж (від 10000 до 100000 кг) і застосовуються для штампування великих поковок в одному рівчаку. Основним недоліком безшаботних молотів є незручності роботи, обумовлені рухом обох штампів, тому молоти і застосовуються тільки при однорівчаковому штампуванні, що різко знижує їх технологічні можливості.

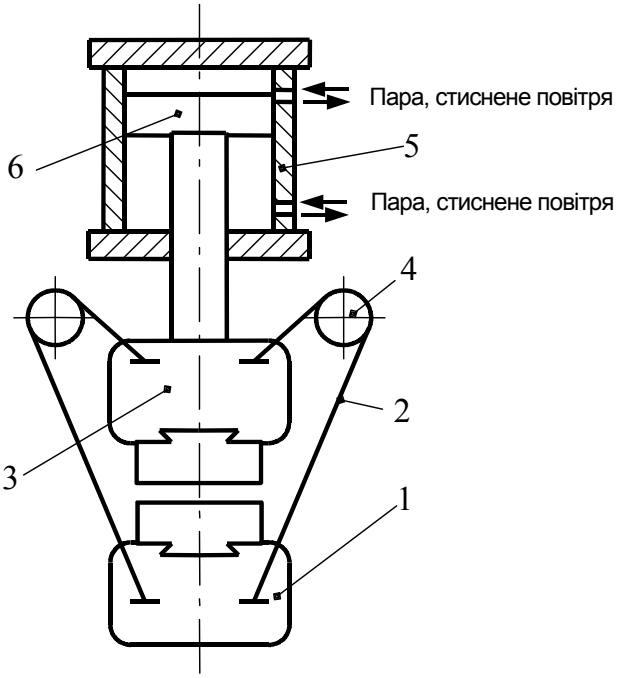


Рис. 9.9. Схема пристрою безшаботного молота: 1,3 – рухомі баби; 2 – сталева стрічка; 4 – ролики; 5 – циліндр; 6 – поршень

Тема 10. Технологічні процеси кування

Куванням називається спосіб гарячої обробки металів тиском, який здійснюється за допомогою удару або натиснення бойка. При цьому течія металу відбувається в напрямках, не обмежених поверхнями інструменту. Застосовується кування в дрібносерійному й індивідуальному виробництвах і нині є єдиним способом виготовлення важких поковок (до 250 т і більше) типу валів гідрогенератора, турбінних дисків тощо.

Кування не слід застосовувати для великосерійного і масового виробництв щодо невеликих поковок, проте для індивідуального і дрібносерійного виробництв процес кування є економічно і технічно обґрунтованим. Кування є раціональним і при великих серіях великих поковок. До цього належить масове виробництво залізничних осей, колінвалів і деяких інших типів поковок.

Величина деформації при куванні виражається або відносною зміною площі поперечного перерізу

$$u = \frac{F_0 - F_1}{F_1} 100\% , \qquad (9.1)$$

або коефіцієнтом уковки

$$y = \frac{F_0}{F_1}, \qquad (9.2)$$

де F_0 – більша площа поперечного перерізу; F_1 – менша площа поперечного перерізу.

Уковування показує, у скільки разів змінився поперечний переріз заготовки в процесі кування, тобто характеризує міру проковування металу, оскільки чим більше змінено поперечний переріз, тим він краще проковується, тим вище механічні властивості металу.

Гаряче оброблення тиском дуже істотно впливає на мікроструктуру металу, і особливо помітно цей вплив позначається на литому металі. Зливок внаслідок неоднорідності за структурою і хімічним складом через наявність пір, газових пузирів та інших дефектів не можна безпосередньо використовувати для виготовлення деталей і конструкцій. Для усунення перелічених дефектів зливки піддають гарячій обробці тиском – плющенню або куванню. При гарячій обробці тиском литого металу первинний дендрит дробиться і витягується у напрямку найбільшої деформації; у результаті проходження процесів рекристалізації деформований метал набуває зернистої мікроструктури. Одночасно з дендритом витягуються і їх межі, по яких зазвичай скупчуються різні неметалічні речовини, створюючи своєрідну волокнисту структуру.

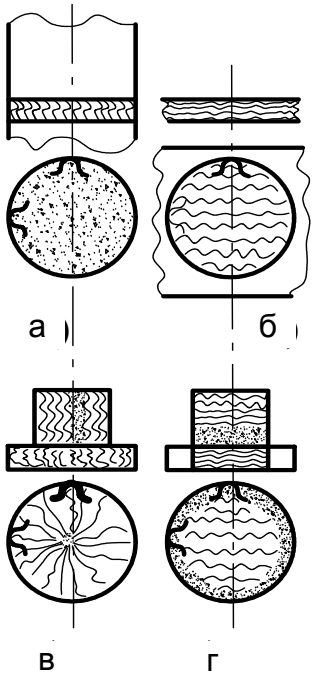


Рис. 10.1. Виготовлення шестерні 1 із заготовки 2 з різним розташуванням волокон: а – з прокату; б – з листового прокату; в – з прутка, осадженого уздовж волокна; г – з прутка, осадженого поперек волокна

При гарячій деформації відбувається заварювання пузирів, тріщин, пір і метал ущільнюється. Крім того, при гарячій обробці тиском унаслідок проходження дифузійних процесів відбувається вирівнювання хімічного складу. В результаті гарячої обробки тиском метал стає міцнішим і пластичнішим. Проте внаслідок утворення волокнистої макроструктури метал набуває анізотропії. При порівняно незмінених на всіх напрямках характеристиках міцності характеристики пластичності металу уздовж волокон виходять вищі, ніж поперек волокон.

Практикою встановлено, що для отримання якісних поковок з конструкційних сталей міра уковування для зливків має бути не менше 2,5–3, а для прокату 1,1–1,3. У тих випадках, коли відбувається кування сталей карбідного класу, наприклад швидкорізальної або інструментальної сталі марки Х12М, в яких містяться важкоруйновані карбіди і ледебуритна евтектика, міра уковування для зливків береться не менше 10–12.

У зв'язку з анізотропією механічних властивостей металу після деформації в гарячому стані при розробленні технологічного процесу виготовлення деталей рекомендується враховувати напрямок волокон залежно від умов їх роботи. Волокна мають огинати контур деталі або збігатися з напрямком максимального нормального напруження, що виникає при експлуатації деталі, і по можливості не повинні перерізатися. З наведених на рис. 10.1 чотирьох випадків найбільш сприятливим є випадок виготовлення шестерні з прокату, підданого осаджуванню уздовж волокон (див. рис. 10.1, в).

До основних операцій кування належать (рис. 10.2): а) осаджування, б) протягування, в) пробивання, г) прошивання, д) гнуття, а також рубання, закручування, зварювання та штампування в підкладних штампах.

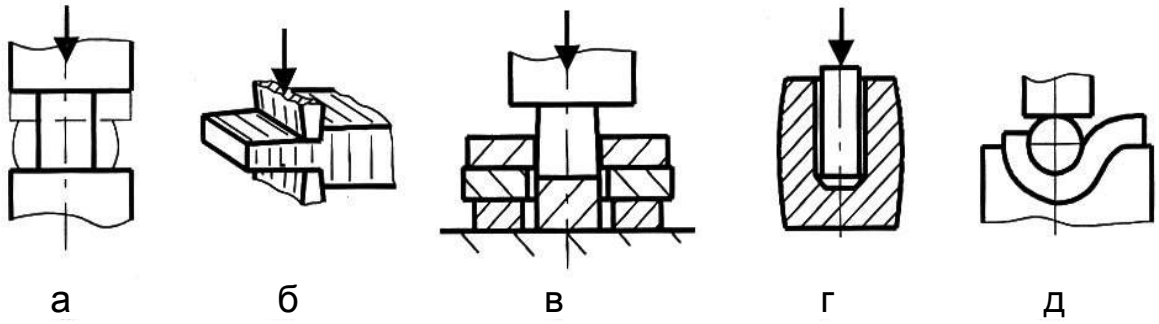


Рис. 10.2. Основні операції вільного кування

Осаджуванням називається операція збільшення площі поперечного перерізу початкової заготовки через зменшення її висоти (див. рис. 10.2, а). Осаджування застосовується при виготовленні поковок з великими поперечними перерізами і відносно малою висотою (шестерні, диски тощо).

Циліндрична заготовка після осаджування на плоских бойках не залишається циліндричною, оскільки тертя між бойками і заготовкою перешкоджає течії металу в радіальному напрямку безпосередньо на торцях і поблизу них (рис. 10.3).

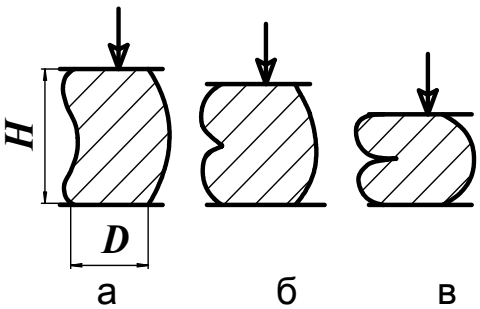


Рис. 10.3. Схема затиску при осаджуванні циліндричної заготовки: а – втрата стійкості; б і в – отримання затиску

Об'єм циліндричної заготовки можна поділити на три зони деформації: I зона складається з двох областей ускладненої деформації, прилеглих до торців заготовки; у зоні II спостерігається найбільш інтенсивна деформація; у зоні III інтенсивність деформації більша, ніж в I зоні і менше ніж у II. I і II зони деформації утворюють на кожному торці заготовки дві зони: внутрішню 1, в якій метал практично не переміщується, і зовнішню кільцеву 2, в якій відбувається інтенсивна течія металу в радіальному напрямку. При $H/D \geq 2$ (див. рис. 10.3), коли зони I досить віддале-

ні одна від одної, може відбуватися втрата стійкості заготовкою або утворення подвійної бочки, що є причиною утворення на бічній поверхні такої поковки затиску (див. рис. 10.3, б, в).

Гарантією осаджування циліндричної заготовки без втрати нею стійкості є виконання співвідношення

$$\frac{H}{D} \leq 2{,}5, \qquad (10.3)$$

де H – висота заготовки; D – діаметр заготовки.

При осаджуванні порожнистих циліндричних заготовок типу кільця або труби з малим отвором, коли співвідношення висоти H до товщини стінки менше 3, спостерігається одночасне збільшення зовнішнього D і зменшення внутрішнього d_o діаметрів. Подовжній переріз стінки заготовки при цьому поступово перетворюється на бочкоподібний, а контактні поверхні збільшуються головним чином внаслідок перетікання матеріала на торці зовнішньої і внутрішньої бічних поверхонь. На внутрішній поверхні тонкостінних трубчастих заготовок може утворитися глибока поперечна складка. Щоб уникнути цього, відношення висоти порожнистої циліндричної заготовки до товщини її стінки перед осадженням не має перевищувати 2,5.

Протягуванням називається операція збільшення довжини початкової заготовки внаслідок зменшення її поперечного перерізу (див. рис. 10.2, б). Протягування застосовується при виготовленні поковок з подовженою віссю (вали, важелі, шатуни і т. п.) і є найбільш поширеною операцією кування. Воно здійснюється послідовними ударами або натисненнями на окремі ділянки заготовки, що примикають одна до одної. При деформації заготовки відбувається збільшення її граней, не дотичних до бойків. Для усунення цього явища в процесі протягування заготовки і витягування заготовки періодично або після кожного удару її кантують на 90 º навколо її осі.

На інтенсивність витягування впливають ширина і форма вживаних бойків, стан їх поверхні і довжина ділянки заготовки, що деформується. Інтенсивність витягування збільшується при застосуванні вирізних бойків замість плоских. Послідовне чергування витягування і осаджування дозволяє значно зменшити анізотропію механічних властивостей.

Різновидами витягування є розкочування (роздавання), розгін (розплющення) і т. д. Витягування на оправку є операцією збільшення довжини порожнистої поковки через зменшення її зовнішнього діаметра і товщини стінок. Ця операція застосовується при виготовленні порожнистих поковок типу гарматних стволів, турбінних роторів та ін. Цій операції піддаються заздалегідь прошиті заготовки, які надіваються на оправку і обтискаються як суцільні заготовки за допомогою вирізних або плоских бойків. Розкочування на оправці (роздавання) є операцією збільшення зовнішнього і внутрішнього діаметрів порожнистої заготовки внаслідок зменшення товщини її стінок і застосовується для виготовлення кілець, бандажів і т. п.

Гнуттям (див. рис. 10.2, д) називається операція, за допомогою якої заготовці надають зігнутої форми за заданим контуром. Цією операцією виготовляються скоби, крюки, кронштейни тощо. При гнутті відбувається змінення площі поперечного перерізу заготовки в зоні вигину внаслідок стискання внутрішніх і розтягання зовнішніх її шарів, що превалює над стисненням. Для компенсації стоншення в місці вигину заготовку виконують зі збільшеним розміром по товщині. При вигині можливе утворення складок по внутрішньому контуру і тріщин по зовнішньому. Щоб уникнути цього явища, підбирають відповідний радіус закруглення і кут вигину. Гнуттю можуть піддаватися також труби, для чого останні наповнюються піском і щільно забиваються з обох боків пробками.

Рубанням називається операція відділення однієї частини заготовки або поковки від іншої. Рубання здійснюють за допомогою сокир різної форми.

Прошиванням називається операція отримання в заготовці отвору (див. рис. 10.2, г). Інструментом для прошивання є прошивень, який може бути суцільним або порожнистим.

При наскрізному прошиванні порівняно тонких поковок застосовують підкладні кільця, для високих поковок – окрім прошивня ще й надставки (див. рис. 10.2, в). Отвори до 400…500 мм в діаметрі прошиваються суцільними прошивнями, а отвори більшого діаметру прошиваються порожнистими прошивнями. Метою прошивання порожнистими прошивнями у багатьох випадках є видалення із заготовки центральної ліквацийної зони і використання якіснішого металу периферійних зон зливка.

Висадка полягає в локальному осаджуванні матеріалу з одного кінця заготовки шляхом натиснення плоским бойком. Вона може бути проведена і шляхом нагрівання кінця або середини заготовки, або шляхом обмеження деформації частини заготовки інструментом у вигляді кільця.

Закручування є операцією повороту однієї частини поковки відносно іншої навколо подовжньої осі. Закручування застосовується при розвороті колін колінчастих валів, при виготовленні свердел і т. п. При закручуванні зазвичай одну частину поковки затискають між бойками молота або преса, а іншу розгортають за допомогою важелів, ключів, лебідок та ін.

При виготовленні в умовах дрібносерійного виробництва партії поковок з відносно складним контуром, який важко виконати переліченими вище операціями, застосовують штампування в підкладних штампах. У підкладних штампах можуть виготовлятися головки гайкових ключів, головки болтів та інші поковки.

Технологічний процес кування здійснюють за допомогою різних інструментів і пристроїв. Ковальський інструмент залежно від призначення поділяють на основний, допоміжний і мірний.

До основного належить інструмент (рис. 10.4), за допомогою якого заготовці надається необхідна форма: бойки (а), обтискачі (б), розкочувачі (в), сокири (г), прошивки (д). Бойки виготовляють зі сталі марки 50 або зі штампової

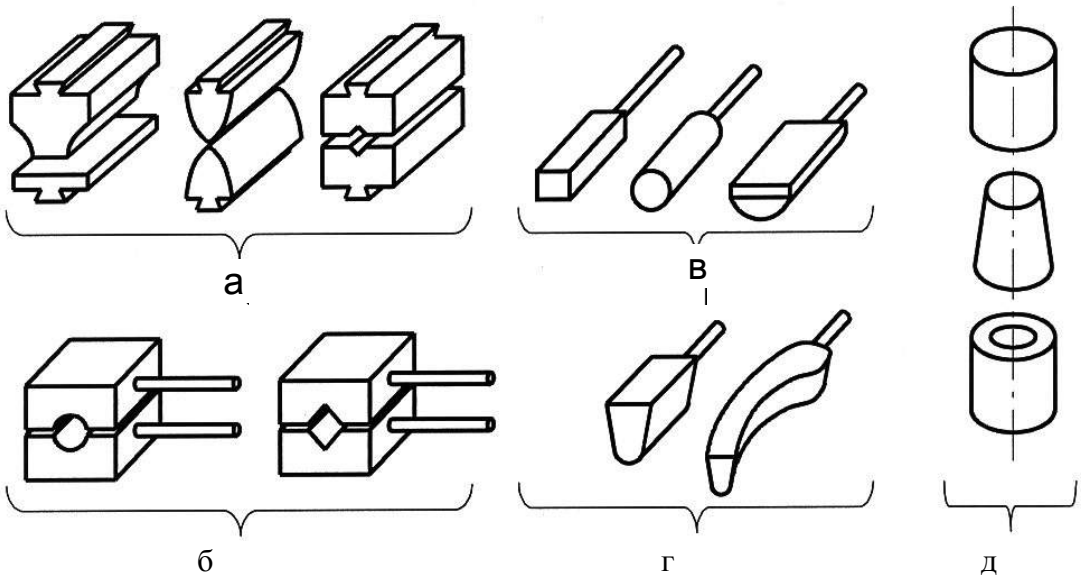


Рис. 10.4. Основний кувальський інструмент

сталі, яку застосовують для молотових штампів. Обтискачі, розкочувачі, сокири і прошивки виготовляють зі сталі марок 45 і 50.

Застосування вирізних бойків замість плоских забезпечує менше розширення поковки, внаслідок чого час кування скорочується на 20…25 %. При куванні малопластичних сталей форма бойків впливає на якість поковок внаслідок змінення схеми напруженого стану і зниження вірогідності утворення тріщин в поковках.

Обтискання застосовують в основному для обробних операцій. Розкочування призначено для підвищення інтенсивності протягування, а також для розплющення заготовки.

До допоміжного належить інструмент, за допомогою якого здійснюються захоплення, переміщення і обертання заготовки (кліщі, патрони, важелі і т. п.). Слід зазначити, що ковальські кліщі виготовляють зі сталі марки 25. Сталь з великим вмістом вуглецю для виготовлення кліщів не рекомендується, оскільки кліщі часто доводиться охолоджувати у воді, що може призвести до загартування кліщів і сталь стає крихкою.

До мірного належить інструмент, за допомогою якого контролюють розміри поковок. Як мірний інструмент застосовують лінійки, косинці, кронциркулі, нутроміри, кутоміри, шаблони.

З описаних ковальських операцій найбільш поширеними є осаджування і протягування, які застосовуються практично в кожному технологічному процесі виготовлення поковок. Осаджування є до того ж і найенергоємнішою операцією, тому у більшості випадків потрібна потужність устаткування вибирається залежно від операції осадження: якщо потужність устаткування достатня для осадження, то це устаткування і потім буде придатне для виконання інших ковальських операцій.

Тема 11. Розроблення технологічних процесів кування

Розроблення технологічного процесу кування містить: 1) складання креслення поковки; 2) розрахунок розмірів і ваги заготовки; 3) вибір кувальних операцій і встановлення їх послідовності з зазначенням необхідного основного і допоміжного інструменту і пристроїв; 4) вибір печі для нагрівання; встановлення режимів нагрівання, охолодження, а також (за необхідності) проміжної термічної обробки; 5) вибір кувального устаткування і його потужності; 6) визначення складу ковальської бригади і норм вироблення.

Складання креслення поковки

Розроблення технологічного процесу розпочинається зі складання креслення поковки на підставі креслення готової деталі. Для цієї мети за ДСТУ вибирають припуски, допуски і застосовують, якщо необхідно, напуски.

Від готової механічно обробленої деталі поковка відрізняється передусім розмірами, збільшеними на величину припусків на механічне оброблення; менш жорсткими допусками на розміри і спрощеною формою, зручнішою для кування. Схему розмірів поковки з припусками і допусками подано на рис. 11.1.

Припуск – передбачене перевищення розмірів поковки від номінальних розмірів деталі, що забезпечує після обробки різанням потрібні за кресленням розміри деталі й чистоту її поверхні.

Допуск – різниця між найбільшим і найменшим граничними розмірами поковки (див. рис. 11.1).

Найменший граничний розмір поковки Б дорівнює сумі номінального розміру деталі А і необхідного (мінімального) припуску (з обох боків).

Оскільки точно за розміром Б практично не можна викувати поковку, нормують найбільший граничний розмір поковки Г.

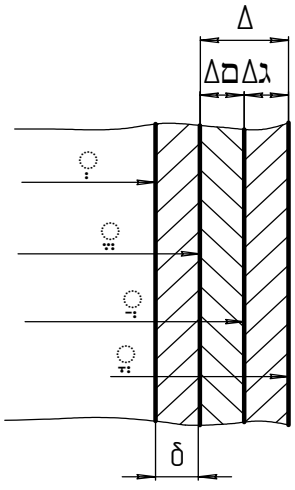


Рис. 11.1. Схема розмірів поковки з припуском і допуском

Різниця між найбільшим і найменшим розмірами поковки визначається допуском Δ на розмір поковки.

На кресленнях зазвичай проставляють номінальний розмір поковки В.

Величина $\delta + \Delta_н = а$ є номінальним (табличним) припуском, а $\Delta_н$ – нижнє відхилення. У свою чергу $\Delta_в$ є верхнім відхиленням:

$$\Delta = \Delta_н + \Delta_в.$$

На кресленні проставляють номінальний розмір поковки із зазначенням відхилень $B^{+\Delta_в}_{-\Delta_н}$.

Припуск на механічне оброблення поковки призначають на сторону від номінального розміру деталі, а допуск – на розмір, тобто на обидві сторони деталі. У куванні зазвичай приймають $\Delta_в = \Delta_н = \Delta/2$

Напуск – збільшення припуску, що спрощує конфігурацію поковки зважаючи на неможливість або нерентабельність виготовлення поковки по контуру деталі.

Напуск утворює крім припуску додаткові об'єми металу, що видаляються разом з припусками у відхід при механічній обробці.

Необхідність припусків пояснюється наявністю у поковки дефектного поверхневого шару і геометричних похибок форми поверхонь. До дефектного шару поковки входять: зневуглецьований шар; вм'ятини від окалини; поверхневі тріщини і складки, що утворюються при куванні, а також поверхневі дефекти заготовки, перенесені на поверхню поковки. Припуск має враховувати також похибки механічної обробки, тоді як допуск залежить тільки від технології ковальської обробки.

Припуски і допуски, а також деякий напуск для кованих поковок стандартизовано. Є окремі стандарти на припуски і допуски поковок з вуглецевих і легованих сталей, що виготовляються куванням на пресах (ГОСТ 7062-67) і на молотах (ГОСТ 7829-70), а також ДСТУ.

Аналогічні стандарти є для поковок з інших матеріалів. Поковки за формою класифікують у цих стандартах на групи. Форму поковок досить повно характеризують такі чотири ознаки: відношення її довжини до товщини; наявність або відсутність у ній порожнини; наявність або відсутність уступів і виїмок на її поверхні; прямолінійність або вгнутість її осі.

За першою ознакою усі ковані поковки поділяють на три основні групи.

До 1-ї групи входять відносно довгі поковки, відношення розмірів яких таке, що не дозволяє здійснити без поздовжнього згину осаджування готової поковки в торець.

До 2-ї групи входять такі поковки, як циліндри і бруси, відношення довжини (чи висоти) до товщини яких таке, що можливі осадження і протягування готової поковки.

До 3-ї групи входять відносно короткі поковки, відношення довжини (чи висоти) до товщини яких дозволяє здійснити протягування без викривлення їх в площині, перпендикулярній до головної осі.

У свою чергу усі поковки, що належать до будь-якої із зазначенням груп, можуть бути суцільного перерізу або порожнистими, з прямою віссю або зігнутими і т. д. Таким чином, з урахуванням усіх ознак поковки 1-ї групи підрозділяють на вісім видів, поковки 2-ї та 3-ї групи – на чотири види. Всього за цією класифікацією є 16 видів поковок.

З урахуванням цієї класифікації вибирають і ковальські операції. Так, основними операціями при куванні гладких поковок суцільного перерізу є: для 1-ї групи – протягування, для 2-ї групи – комбінація осаджування і протягування для 3-ї групи – осаджування. Аналогічно аналізують усі види поковок.

Визначення конфігурацій уточнюють граничними співвідношеннями розмірів поковок. Так, наприклад, при куванні на пресах до дисків належать поковки циліндричної форми при висоті менше 0,5 діаметра, до циліндрів – при висоті, що дорівнює 0,5–1,2 діаметра, до гладких поковок круглого перерізу – при довжині більше або такою, що дорівнює 1,2 діаметра. Фланцем вважається кінцева ділянка вала зі збільшеним стосовно вала діаметром або стороною прямокутника за умови, що довжина цієї ділянки не більше 0,3 його діаметра або сторони прямокутного фланця.

Величини стандартних припускав і допусків встановлені виходячи з того, що використовуване устаткування й інструмент знаходяться в задовільному стані і що кування здійснюється ковалями досить високої кваліфікації.

У стандартах обумовлюють також величини кутів скосу, що допускаються, після обрубування і конусності отворів, мінімальних довжин фланців і буртів, а також мінімальних і максимальних діаметрів прошиваних отворів. Граничні значення цих величин залежать від відповідних розмірів поковок і наводяться в стандартах у вигляді відповідних таблиць. Ці граничні значення є вказівками, коли для спрощення виготовлення поковок на додаток до допусків, припусків слід призначити напуски, а коли не слід.

При конструюванні поковок велике значення має отримання раціональної форми поковок, при якій значно спрощується технологія кування. Це пов'язано з правильним призначенням напуску. Особливо велике практичне значення має напуск при конструюванні валів з уступами і виїмками. Уступ – це ділянка поковки, що має більший діаметр, ніж будь-яка з прилеглих ділянок, а виїмка – ділянка поковки, діаметр якої менше обох прилеглих ділянок (рис. 11.2). Напуск регламентується зазначеними ГОСТами, ДСТУ, в яких є таблиці на найменші розміри виїмки, виступу, бурту, фланця та ін. Утворення уступів при куванні можливе тільки при певній різниці їх діаметрів і достатній довжині.

Уступи і виїмки не обтискають, якщо різниця їх діаметрів і діаметрів прилеглих ділянок менше певної величини, коли різниця діаметрів достатня, але довжина їх незначна. Проміжні уступи обтискають при меншій різниці їх діаметрів і діаметрів прилеглих ділянок, а також при меншій їх довжині порівняно з виїмками і кінцевими уступами. При малій довжині буртів дають напуск по довжині; для кінцевих фланців цей напуск більший.

З напуском виковують також деталі з отвором. Прошивають отвори діаметром більше 50…60 мм. Якщо діаметр отвору менше 50 мм або менше 2/3 товщини деталі, то його не прошивають. Напуск часто призначається у виробах типу вилок і т. п. Після нанесення на креслення виробу встановлених розмірів припусків, допусків і напуску отримують креслення поковки. Поковку викреслюють нормальними суцільними лініями, усередині контуру поковки то-

нкими суцільними лініями позначають контури готового виробу. Розміри проставляють для поковки, в дужках нижче розміру поковки наносять розміри готового виробу. Стрілки виводять на контур поковки (див. рис. 11.2). Між тонкими суцільними лініями розміри ставлять тоді, коли в поковці є напуск.

Щоб наочно показати прийняті припуски і напуск на кресленні поковки (див. рис. 11.2), викреслюють тонкою або штрихпунктирною лінією контур готової деталі. Номінальні розміри готової деталі проставляють в дужках під розмірами поковки.

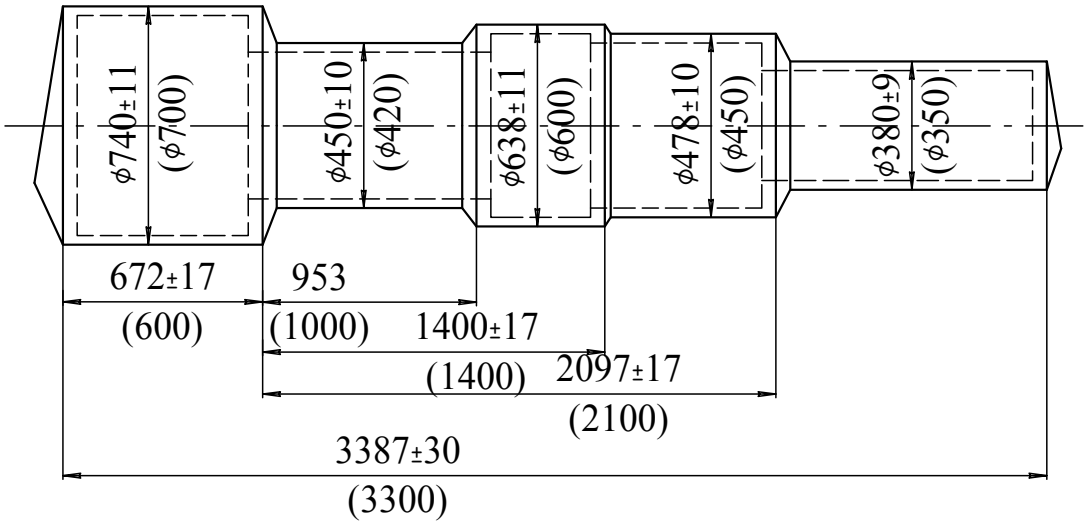


Рис. 11.2. Типове оформлення креслення поковки

Номінальні розміри поковок, що виготовляються на молотах, допускається округлювати до найближчих цілих чисел (у більшу сторону), а тих, що виготовляються на пресах, – до чисел, що закінчуються на 5 або 0. При простановці розмірів рекомендується уникати ланцюжка розмірів, прагнучи призначати усі розміри від однієї бази, що збігається з базою креслення деталі.

Усі додаткові відомості про поковку, не обумовлені в стандартах, наприклад величини внутрішніх радіусів закруглень, величину допустимої бочкоподібності, що отримується в результаті осаджування або прошивання, місце таврування поковки і т. д. вказуються на самому кресленні поковки в технічних умовах на її виготовлення поряд з кресленням поковки.

Розрахунок розмірів і ваги заготовки

Вагу поковки або заготовки визначають виходячи з об'єму, розрахованому за її номінальними розмірами, позначених на кресленні. Для обчислення об'єму поковки її креслення розділяють на окремі частини, що мають просту геометричну форму. Знаючи питому вагу металу, розраховують вагу поковки.

Розрахунок заготовки із зливка включає визначення об'єму зливка $V_{заг}$, його ваги $G_{заг}$, середнього поперечного перерізу $F_{заг}$ і довжини заготовки $L_{заг}$. Об'єм заготовки визначають за рівнянням

$$V_{заг} = V_{пок} + V_{пр} + V_{дон} + V_{обс} + V_{виг},$$

де $V_{лок}$ – об'єм поковки;

$V_{пр}$ – об'єм прибуткової частини, що становить 20…30% від об'єму зливка;

$V_{дон}$ – об'єм донної частини, що становить 5…10% від об'єму зливка;

$V_{обс}$ – об'єм обсікань, прийнятий таким, що дорівнює для простих поковок (гладкі вали, диски) 5…8 % від об'єму зливка, а для складних поковок (колінвали) – 20…30 %;

$V_{виг}$ – вигар металу, що приймається, дорівнює за перше нагрівання 2…3 % від об'єму зливка, а при подальших підігріваннях – 1,0…1,5 %.

Вагу заготовки визначають виходячи з розрахованого об'єму заготовки і питомої ваги металу.

Площу поперечного перерізу заготовки розраховують за заданою мірою уковування. Для зливка міра уковування задається не менше 2,5...3,0. Якщо поковка виготовляється осаджуванням, то

$$y = \frac{F_{max}}{F_{заг}},$$

звідки визначають $F_{заг}$, а потім і довжину заготовки $L_{заг} = V_{заг}/F_{заг}$.

Оскільки в сортаменті на зливки основною характеристикою є його вага, то виходячи з розрахованої ваги заготовки підбирають вагу зливка. Зливок має мати поперечний переріз заготовки, що забезпечує необхідне уковування. Якщо вибраний з сортаменту зливок за вагою відповідає розрахунковому, а за розміром перерізу малий, то вибирають зливок необхідного перерізу $F_{заг}$, але більшої ваги, з тим щоб з нього виготовити декілька поковок, якщо зливок необхідної ваги, але тоді в технологічний процес виготовлення поковки включають операцію осаджування.

Розрахунок заготовки з прокату включає визначення об'єму заготовки і її розмірів. Рівняння для визначення об'єму має вигляд

$$V_{заг} = V_{пок} + V_{обс} + V_{вуг}.$$

Відходи $V_{обс}$ і $V_{вуг}$ приймаються такими ж, як і при розрахунку заготовки із зливка. У середньому можна приймати ($V_{обс}$ + $V_{вуг}$), що дорівнює 10…12 % від об'єму заготовки.

Міра уковування при куванні прокату приймається такою, що дорівнює 1,1–1,3. Подальший хід розрахунку розмірів заготовки їх прокату аналогічний розрахунку із зливка. На підставі розрахованого поперечного перерізу заготовки за ГОСТом на сортамент вибирають відповідний найближчий більший розмір перерізу.

Вибір ковальських операцій та інструменту

Необхідні ковальські операції, їх послідовність, а також інструмент залежать від конфігурації поковки і технічних вимог, яким вона має відповідати. У більшості випадків виготовляють поковки чергуванням осаджування і протягування з переважанням тієї або іншої операції залежно від співвідношень розмірів поковки.

Основним кувальним інструментом є плоскі бойки. Вирізні бойки зазвичай застосовують при куванні на оправках або при протягуванні малопластичних металів з метою забезпечення сприятливішої схеми напруженого стану в зоні деформації, близької до усебічного нерівномірного стискання.

Вибрані операції, інструмент, необхідний для їх виконання, а також проміжні розміри заготовки заносять в технологічну карту.

Вибір печі для нагрівання. Встановлення режимів нагрівання, охолодження і проміжної термообробки

Оскільки куванням виготовляють поковки різних розмірів з різною кількістю їх в партії та кількістю металу, що нагрівається в печах, вимоги до устаткування для нагрівання можуть змінюватися у великих межах. Тому вживані в ковальських цехах печі повинні бути універсальними.

Найбільшого поширення в ковальських цехах набули печі камерного типу, які застосовують при куванні поковок різної конфігурації за один або декілька виносів з печі. Для важких поковок застосовують камерні печі з висувним черенем.

Для однотипних поковок, що виготовляються із заготовок одного певного розміру при куванні за одне винесення з печі, краще застосовувати методичні печі.

Установлення режиму нагрівання виконують відповідно до хімічного складу металу і його температурного інтервалу кування.

Важливою ланкою технологічного процесу є не лише нагрівання металу перед куванням, але й його охолодження після завершення кування, оскільки відхилення від режимів охолодження призводять до викривлення поковок, підвищення їх поверхневої твердості, а іноді й до утворення тріщин. Охолодження дрібних поковок зазвичай виконують на повітрі, в штабелях, а великих – в ямах з піском, в печах і колодязях.

Дефекти структури, що виникають внаслідок перегрівання або закінчення кування вище нижньої межі температурного інтервалу, усуваються відпалом або нормалізацією.

Вибір кувального устаткування і визначення його потужності

На вибір устаткування в першу чергу впливає термомеханічний режим обробки сплаву, що пов'язує швидкість деформації з температурою його нагрівання і швидкістю рекристалізації.

Високолеговані сталі, жароміцні й деякі кольорові сплави мають низькі швидкості рекристалізації і знижену пластичність, тому не допускають великої швидкості деформації. При куванні таких металів рекомендується використовувати преси, а не молоти.

При виборі устаткування необхідно також враховувати тепловий ефект деформації, завдяки чому може підвищуватися температура металу, що деформується, і останній може переходити або в зону крихкості, або в зону пластичності.

Слід також враховувати і те, що поковки малої і середньої ваги (до 2…3 т) зазвичай виготовляють на молотах, а важкі, аж до поковок вагою 200…300 тонн, – на гідравлічних пресах.

Розрахунок потужності устаткування у багатьох випадках є досить складним завданням через труднощі аналітичного вирішення завдань теорії пластичності, тому на практиці часто користуються наближеними аналітичними формулами, емпіричними і напівемпіричними залежностями.

Оскільки при куванні основну роботу з деформації металу виконують за допомогою операцій осаджування і протягування, то потужність устаткування визначають виходячи з умов деформації при здійсненні саме цих операцій.

Наближений розрахунок потужності преса при осаджуванні й протягуванні. Зусилля деформації в загальному випадку визначають за формулою

$$P = q \cdot F, \tag{11.1}$$

де q – питомий тиск течії металу при куванні;

F – площа контакту заготовки з інструментом.

Питомий тиск течії металу визначається методом складання і спільного розв'язання рівнянь рівноваги і умови пластичності стосовно аналізу силового режиму конкретної операції обробки металу тиском.

Питомий тиск при осаджуванні заготовок у вигляді правильної призми або циліндра визначають за наближеною формулою М. В. Сторожева

$$q = \sigma_{вт}\left(1 + \frac{1}{6}\frac{d}{h} - \frac{1}{3}\frac{h^2}{d^2}\right), \tag{11.2}$$

де $\sigma_{вт}$ – границя міцності металу при температурі деформації;

d – діаметр або сторона перерізу поковки після деформації;

h – висота поковки після деформації.

Ця формула отримана для значень d/h = 2 і придатна для розрахунку при великому коефіцієнті тертя f, що виникає при осаджуванні f(0,3); формулою можна користуватися і при значеннях d/h = 2, якщо питомий тиск течії, обчислений за нею, більше прийнятої величини

В інших випадках, коли d/h = 2, користуються іншою формулою, також отриманою М. В. Сторожевим,

$$q = \sigma_{вт}\left(1 + \frac{f}{4} \cdot \frac{d}{h}\right), \tag{11.3}$$

де f – коефіцієнт тертя, орієнтовне значення якого коливається в межах від 0,3 до 0,5.

Питомий тиск течії металу при витягуванні під плоскими бойками можна визначити за формулою

$$q = \sigma_{вт}\left(1 + \frac{f}{3}\cdot\frac{l_0}{h}\right), \qquad (11.4)$$

де l_0 – величина подачі, яка дорівнює 0,6 – 0,7 ширини бойка.

Питомий тиск течії при витягуванні під вирізними бойками визначають за формулою

$$q = \sigma_{вт}\left(1 + \frac{2f}{3}\cdot\frac{l_0}{d}\right), \qquad (11.5)$$

де d – діаметр поковки.

Визначення складу ковальської бригади

Визначення складу ковальської бригади залежить від роду устаткування і його тоннажу, а норма вироблення, крім того, залежить від складності поковки.

Пневматичний кувальний молот зазвичай обслуговують коваль 4 – 5-го розрядів, підручний коваля 3-го розряду і нагрівальник 3 – 4-го розрядів.

Пароповітряні кувальні молоти зазвичай обслуговують машиніст 4 – 5-го розрядів, коваль 4 – 5-го розрядів, підручний коваля 3 – 4-го розрядів і нагрівальник 3 – 4-го розрядів. При куванні великих поковок до складу бригади включають ще кранівника мостового крану або машиніста кувального маніпулятора.

Гідравлічні преси зазвичай обслуговують бригади, що включають 5 – 8 осіб, а іноді і більше.

Тема 12. Технологічні процеси об'ємного штампування

Гаряче об'ємне штампування є таким способом обробки тиском, при якому вільна течія металу обмежується поверхнями порожнин штампа. Метал заповнює порожнину (рівчак) штампа, яка має (визначає) форму виробу. Гаряче об'ємне штампування знаходить широке застосування в машинобудуванні, оскільки дає можливість виготовити поковку з високими механічними властивостями і за конфігурацією близьку до готової деталі. У ряді випадків гаряче штампування забезпечує отримання поковок, з яких виготовляють готові деталі тільки методом шліфування або здійснюється механічне оброблення тільки тих поверхонь, які сполучаються в конструкції з іншими.

Вартість штампованих деталей з подальшою обробкою різанням у 2 – 2,5 рази нижче вартості тих же деталей, виготовлених тільки різанням. Штампуванням виготовляють поковки вагою до 500 кг, а при штам-

пуванні на гідравлічних штампувальних пресах вага поковок досягає декількох тонн. Для отримання поковок на штампувальному устаткуванні потрібні штампи, вартість виготовлення яких зазвичай досить висока, тому технологічний процес штампування стає рентабельним в умовах великосерійного і масового виробництв.

Переваги об'ємного штампування:

1. Більш висока продуктивність, яка становить десятки і сотні поковок в годину, у кілька разів вище, ніж продуктивність кування.

2. Об'ємним штампуванням можна отримувати без напуску поковки складної конфігурації, які не можна без напуску виготовити куванням.

3. Об'ємне штампування дозволяє отримувати поковки зі значно меншими допусками, ніж вільне кування. При точному об'ємному штампуванні допуски можна довести до часток міліметра і підвести під класи точності. Припуски також зменшені. Поковки, що отримуються штампуванням, піддають механічній обробці лише по поверхнях сполучення з суміжними деталями. Інші поверхні мають достатню чистоту.

4. При об'ємному штампуванні отримують економію металу порівняно з вільним куванням і литтям. Зазвичай при об'ємному штампуванні є додатковий відхід металу в задирку, маса якої становить від 10 до 30 % і більше від маси поковки. Незважаючи на це, досягається економія металу порівняно з куванням, оскільки напуск, припуски і допуски при штампуванні значно менші, ніж при куванні.

5. Поковки, що отримуються об'ємним штампуванням, мають високу ударну в'язкість (більш високу, ніж у відливків). Тому відповідальні деталі машин виготовляють з поковок.

6. Робота штампувальника простіша порівняно з роботою коваля кування. Навчання роботі виконують швидше. Але існують такі недоліки.

Об'ємним штампуванням нині виготовляють в основному порівняно невеликі, обмежені за масою від 0,5 до 20…30 кг і розмірами поковки. Поковки масою 100 кг для об'ємного

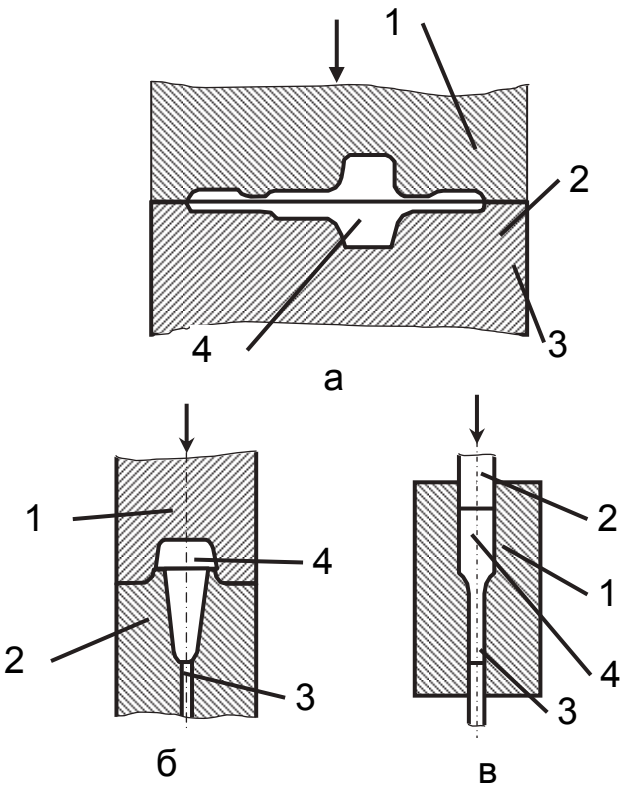


Рис. 12.1. Схеми штампування поковки хвостовика: а – відкритий штамп: 1, 2 – верхній і нижній штампи; 3 – облойний рівчак; 4 – рівчак; б – закритий штамп: 1, 2 – верхній і нижній штампи; 3 – виштовхувач; 4 – рівчак штампа; в – закритий штамп: 1 – штамп; 2 – пуансон; 3 – виштовхувач; 4 – рівчак

штампування вважаються великими. Але останнім часом на гідравлічних пресах стали штампувати поковки масою більше однієї тонни, а на безшаботних молотах (енергія удару 100 000 кг·м (1000 кДж) – поковки масою до 3,5 тонн (Мт).

Для об'ємного штампування потрібно набагато більші зусилля деформації, ніж для кування, оскільки при штампуванні одночасно деформується не частина поковки, а вся поковка, і течія металу утруднюється опором стінок порожнині штампа. Виникають великі тиски і потрібні зусилля. Обмеженість поковок за вагою і габаритами при штампуванні якраз і пояснюється необхідністю великих потрібних зусиль.

3. Для гарячого штампування потрібний спеціальний інструмент — штамп, призначений для виготовлення тільки однакових конкретних поковок. Штамп, виготовлений зі спеціальної сталі, є складнішим і дорожчим, ніж універсальний інструмент, який вживається при куванні. Витрати на інструмент входять у вартість поковок і тому, чим більше поковок виготовляють на одному штампі, тим вони дешевші. При масовому і великосерійному виробництвах об'ємне штампування є безумовно рентабельнішим, ніж вільне кування. У серійному виробництві при підрахунку рентабельності потрібно враховувати вартість виготовлення поковки об'ємним штампуванням і вільним куванням, а також вартість подальшої механічної обробки штампованої і кованої поковок. Основними методами гарячого штампування є штампування з облоєм у відкритих штампах (рис. 12.1, а) і штампування без облою в закритих штампах, таких, як штампи для видавлювання (рис. 12.1, б, в).

Облойне штампування характеризується тим, що після заповнення металом порожнини рівчака 4 штампів 1 і 2 надлишок його витісняється в спеціальну порожнину, утворюючи так званий облой або задирку, яка потім видаляється в спеціальних штампах обрізання. При штампуванні у відкритих штампах не ставляться високі вимоги до точності початкової заготовки, оскільки надлишок металу все одно виходить в облой, крім того, холонення штампованого металу на містку облойної канавки сприяє підвищенню питомого тиску в рівчаку штампа і таким чином забезпечує хороше заповнення фігури штампа.

Безоблойне штампування є деформацією металу в закритих штампах (див. рис. 12.1, б, в), в яких утворення облою не передбачається і тому канавка облою відсутня. Будова закритих штампів залежить від конструктивних особливостей штампувального устаткування. Так, наприклад, для штампування на молотах штампи виконують за схемою, показаною на рис. 12.1, б; для штампування на пресах закриті штампи переважно виконуються за схемою, наведеною на рис. 12.1, в. При облойному штампуванні необхідно строго дотримуватися рівності об'ємів заготовки і поковки, інакше якість деталі не гарантується.

Поковки, що штампуються на молотах, за конфігурацією можуть бути віднесені до двох основних груп: 1) круглі і квадратні в площині рознімання або близькі до них; 2) подовжені в площині рознімання. Останні можуть бути як з прямою, так і із зігнутою віссю, можуть мати різні відростки в площині рознімання. Проміжну групу утворюють поковки змішаної конфігурації.

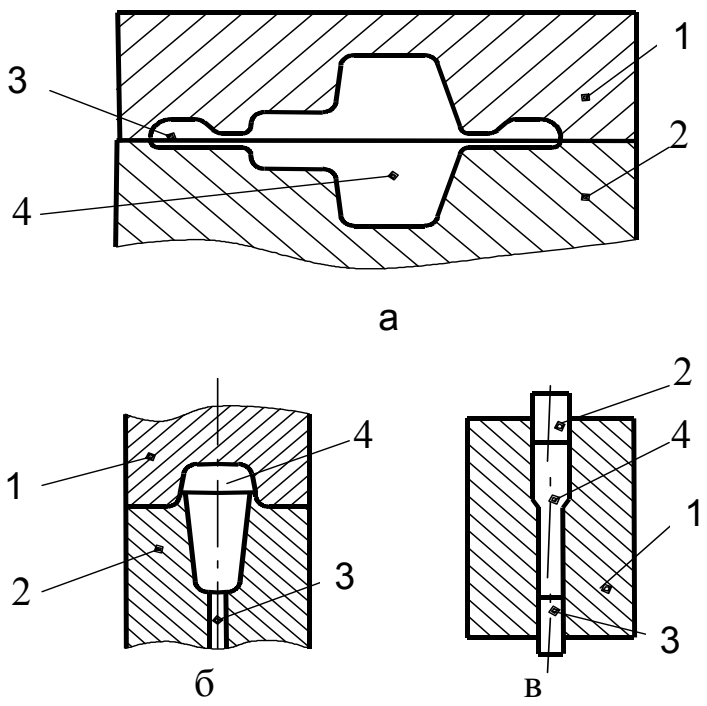


Рис. 12.2. Схеми штампування поковки:
а – відкритий штамп: 1, 2 – верхній і нижній штампи; 3 – облойний рівчак; 4 – рівчак;
б – закритий штамп: 1, 2 – верхній і нижній штампи; 3 – виштовхувач; 4 – рівчак;
в – закритий штамп: 1 – штамп; 2 – пуансон; 3 – виштовхувач; 4 – рівчак

До першої групи входять поковки зубчастих коліс, дисків, втулок, фланців і т. п. До другої групи належать різні вали, зігнуті важелі, колінвали, вилки, шатуни та інші деталі з розвилками. До поковок проміжної конфігурації належать, наприклад, подовжені, але при малому відношенні довжини до ширини, або круглі в площині рознімання, але такі, що мають у площині рознімання відросток у вигляді стрижня.

Молотовий штамп складається з двох половин – верхньої і нижньої, тому наскрізні отвори в поковках можуть бути отримані лише в напрямку, перпендикулярному до площини рознімання. Для отримання наскрізних отворів у молотових штампах робляться знаки під отвори з перемичками, які видаляються прошивкою при обрізанні облою на штампах обрізання.

При відкритому штампуванні проміжок між верхньою і нижньою частинами штампів під час деформації заготовки зменшується. Процес заповнення рівчака відбувається в декілька стадій (рис. 12.2). Для першої стадії характерна відносно вільна деформація заготовки, подібна до осаджування. На другій стадії заготовка набуває складнішої форми, при цьому збільшується контактна поверхня заготовки штампа і зростає зусилля деформації. Після досягнення металом заготовки зовнішніх стінок штампа він починає витікати головним чином у глибину рівчака, одночасно перетікаючи у рознім, утворюючи облой. Після досягнення донних поверхонь рівчака зусилля

деформації зростає більш інтенсивно. На останній стадії відбувається остаточне заповнення канавки для облою і доштампування по висоті.

Навколо рівчака виконується канавка для облою, форма і розміри якої залежать від складності конфігурації поковки, її розмірів і форми заготовки. Форма канавки для облою зазвичай вибирається за відповідними нормативами. Форму канавки для облою, яка найчастіше вживається, зображено на рис. 12.2. Це канавка з одностороннім верхнім порогом. Нижня частина штампа, на якій знаходиться нагрітий штампований метал, не має виступу у вигляді порога і тому не схильна до інтенсивного зносу.

При штампуванні метал витісняється із рівчака в облойну канавку через місток довжиною l і товщиною h_3. Для розміщення надлишку металу є магазин облойної канавки довжиною b і заввишки h_1, який заповнюється при штампуванні приблизно на 70…80 % свого об'єму. На ділянці містка канавки облою охолоджуваний метал створює додатковий підпір, що сприяє кращому заповненню фігури чистового рівчака.

Таблиця 12.1

Розміри канавок для облою

Номер канавки	Розміри рівчака по висоті		Радіус R при глибині рівчака			При штампуванні					
						осадженням			витискуванням у неглибоку порожнину		
	h_3	h_1	до 20	20-40	понад 40	l	b	S_k	l	b	S_k
1	0,6	3	1	1,0	1,5	6	18	52	6	20	61
2	0,8	3	1	1,5	1,5	6	20	69	7	22	77
3	1	3	1	1,5	2,0	7	22	80	8	25	91
4	1,6	3,5	1	1,5	2,0	8	22	102	9	25	113
5	2	4,0	1,5	2,0	2,5	9	25	136	10	28	153
6	3	5	1,5	2,0	2,5	10	28	201	12	32	233
7	4	6	2	3,5	3,0	11	30	268	14	38	344
8	5	7	2	2,5	3,0	12	32	345	15	40	434
9	6	8	2,5	3,0	3,5	13	35	435	16	42	530
10	8	10	3	3,5	4,0	14	38	601	18	46	745
11	10	12	3	3,5	4,0	15	40	768	20	50	988

З метою уніфікації різального інструменту, який вживається при виготовленні канавок для облою, розміри останніх нормують. Приклад такої нормалі подано в табл. 12.1. Лінійні розміри h_2, h_1, R_i, l_i і b подано в мм, а площа перерізу канавки S_k – в мм^2.

Оскільки облой є відходом металу, то при розробленні технології об'єм його має бути прийнятий як можна меншим. Для однієї і тієї ж поко-

вки зі зменшенням маси падаючих частин молота товщина і ширина облою збільшуються.

Нерівномірність утворення облою можна зменшити зміною розмірів канавки по периметру поковки. З конструктивних міркувань наявність в одному штампі змінної товщини h_3 недоцільно. Витікання металу в канавку по периметру складної порожнини штампа простіше вирівняти, використовуючи канавку з неоднаковою по периметру шириною порога.

На тих ділянках периметра поковки, де знаходяться важкозаповнювані місця порожнини штампа, ширину порога l збільшують для поліпшення умов заповнення рівчака. Якщо все-таки нерівномірність утворення облою неминуча, то, щоб уникнути переповнювання металом окремих місць канавки і осаджування його на площину сполучення частин штампа, застосовують канавки зі змінною шириною *b* магазина.

Проектування об'ємноштампованої поковки. Етапи розроблення креслення поковки

Креслення поковки виконують за кресленням готової деталі з урахуванням припуску на механічне оброблення і зміни усіх її розмірів на величину усадки (для сталі усадка – 1,2…1,5 %). Виконується креслення "гарячої" поковки з розмірами, що відповідають розмірам завершального рівчака штампа.

Для виконання креслення поковки необхідно:

1) вибрати на поковці місця розташування майбутньої площини рознімання штампів;

2) установити припуски на механічне оброблення і допуски на штампування;

3) установити штампувальні ухили і радіуси закруглень і, якщо є в деталі отвори, проставити знаки отворів під прошивку і товщину плівок, що залишаються;

4) вирішити спеціальні питання конструювання цієї поковки (якщо вони є), пов'язані з особливими технічними умовами на цю поковку.

Для правильного вибору площини розніму штампів ставляться такі основні вимоги:

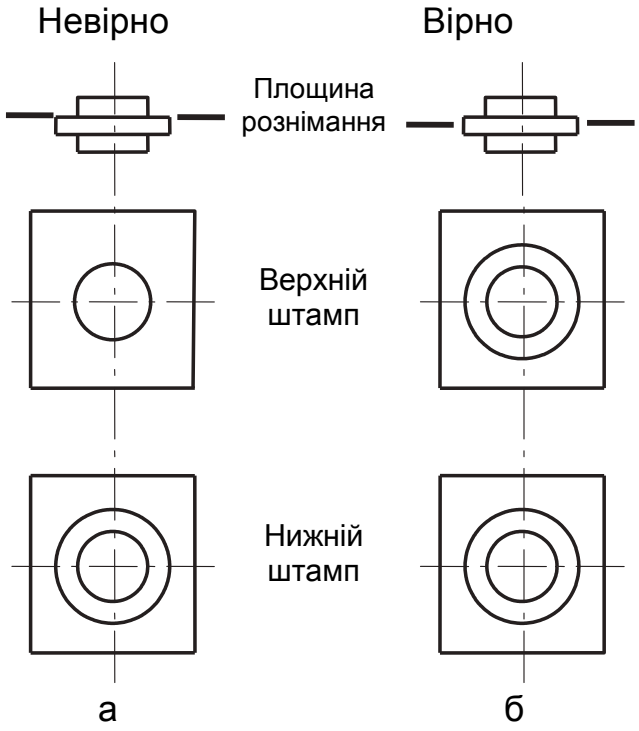


Рис. 12.3. Вибір площини рознімання штампа

1. Площина рознімання має бути вибрана так, щоб штампована поковка вільно витягалася зі штампа (рис. 12.3).

2. Площина рознімання має забезпечувати легкість контролю зрушень однієї частини поковки відносно іншої. Для дотримання цього правила необхідно, щоб контури верхнього і нижнього штампів у площині рознімання були б однакові, як це показано на рис. 12.3, б.

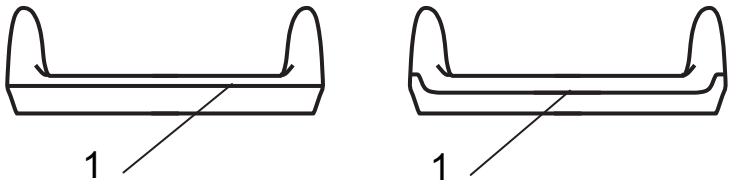
3. При штампуванні несиметричних ребристих деталей площина рознімання вибирається з урахуванням вживаного устаткування. При штампуванні на молоті порожнини мають знаходитися у верхньому штампі (для преса це не має значення). Оскільки метал тече легше вгору, ніж вниз, оскільки нижній штамп більше стикається з гарячою поковкою, має гірший стан поверхні, що утруднює течію металу, позначається також і дія інерційних сил, які при швидкостях падаючих частин молота сприяють затіканню металу саме у верхню порожнину.

4. Площина рознімання вибирається з урахуванням особливостей механічної обробки штампів.

5. З метою полегшення заповнення металом порожнини штампа бажано, щоб для рознімання вибиралася така площина, при якій порожнини рівчаків у верхньому і нижньому штампах мали б найменшу глибину. Крім того, при виборі площини рознімання необхідно враховувати технологію обрізання облою і можливості конструювання штампа обрізання.

6. Площина рознімання може бути прямою і ламаною. Пряма площина рознімання забезпечує простіше виготовлення молотового штампа і кращі умови обрізання облою (рис. 12.4, а).

Ламана площина рознімання для тієї ж поковки дозволяє зменшити витрату металу і поліпшити умови заповнення верхніх кутів бобишок. Проте при ламаній площині рознімання ускладнюється виготовлення і експлуатація штампа для обрізання облою.



а б

Рис. 12.4. Пряма і ламана площини рознімання штампів:
1 – площина рознімання

Припуски і допуски на штамповані поковки з чорних металів регламентовані ГОСТ 7505-74, який встановлює максимально допустимі припуски на механічне оброблення і максимальні допуски на розміри поковок, що штампуються у відкритих рівчаках.

За стандартом припуски і допуски встановлюються передусім залежно від маси поковки. Оскільки ж маса поковок якоюсь мірою залежить від її габаритних розмірів, то враховуються і ці розміри.

До основних чинників, що визначають величини допусків і припусків, належать передусім технологічні властивості штампованих сплавів, габаритні розміри і форма поковки.

Величина припуску коливається в межах від 0,5 до 6 мм і орієнтовно може бути визначена за емпіричною формулою

$$П \approx 0,4 + 0,015h + 0,0015l, \qquad (12.1)$$

де h і l – найбільші розміри поковки по висоті і в площині рознімання, мм.

Підвищений знос бічних стінок рівчака і неминучість зрушення верхньої і нижньої частин поковки одна відносно одної призводять до необхідності призначення припуску за горизонтальними розмірами поковки дещо більшої величини, ніж за вертикальними. Величина цього припуску має бути пов'язана із зрушенням так, щоб допустиме зрушення не перевищувало різниці між номінальною величиною цього припуску на сторону і нижнім відхиленням від номінального розміру поковки в площині рознімання.

Допуски є допустимими відхиленнями від номінальних розмірів поковки. Ці відхилення можуть бути наслідком недоштампування поковки по висоті, неповного заповнення порожнини штампів, зносу штампів тощо. Дуже істотний вплив на допуск по висоті має недоштампування, тому допуск по висоті береться несиметричним: верхнє відхилення приймається у два рази більшим за нижнє.

Розміри допусків коливаються приблизно в таких межах:

– верхнє відхилення по висоті

$$\Delta_в = (0,7…1,0)\ П; \qquad (12.2)$$

– нижнє відхилення по висоті

$$\Delta_н = (0,4…0,6)\ П, \qquad (12.3)$$

де $П$ – припуск, який визначають за виразом (12.1).

Верхнє відхилення по горизонталі береться відповідно в межах (0,6 – 0,9)П, а нижнє – (0,5 – 0,8)П. Щоб уникнути браку штампів не має бути більшою, ніж різниця між значенням припуску на сторону і величиною абсолютного значення нижнього відхилення.

Штампувальні ухили призначено для полегшення заповнення чистового рівчака і забезпечення вільної виїмки з нього поковки. Відштампована поковка утримується в порожнині штампа силами тертя, які вона долає при витяганні із рівчака. Крім того, при витягуванні циліндричної поковки з циліндричного рівчака може відбуватися вакуумування порожнини під поковкою за прикладом пари поршень–циліндр, що теж утруднює виймання поковки. Для подолання застрявання поковок у рівчаках бічні стінки порожнини штампів виконують з ухилами, при цьому поковка виходить з напуском. За відсутності штампувального ухилу поковку видаляють з подоланням сил тертя на відносно великому шляху. За наявності штампувальних ухилів поковка відривається від

стінок штампа у результаті дуже малого її переміщення. На практиці застосовуються штампувальні ухили від 3 до 10 ^{0}. Якщо на молоті є виштовхувальний пристрій, то ухили не перевищують 3 ^{o}. Найбільший ухил за відсутності виштовхувача – 5 – 7 ^{0}. Штампувальні ухили, які є напуском, підвищують відхід металу в стружку і збільшують габарити деталі, що йдуть в зборку без механічної обробки. Для зовнішніх поверхонь поковки (унаслідок усадки) штампувальні ухили приймаються менші, ніж для внутрішніх.

Чим глибше порожнина штампа, тим більшим має бути штампувальний ухил для забезпечення вільного витягування поковок із рівчака. При конструюванні інструменту для уточнення штампувальних ухилів використовують різні експериментальні дані, деякі з яких для молотових штампів (для сталевих поковок) за даними А. В. Ребельского наведено нижче ($h_п$ – глибина порожнини; $b_п$ – ширина або діаметр порожнини; $\ell_п$ – довжина порожнини).

Таблиця 12.2

Штампувальні ухили

$\ell_п / b_п$	$h_п / b_п$		
	до 1	1–3	3–4,5
До 1,5	5 ^{0}	7 ^{0}	10 ^{0}
Зверху	3 ^{0}	5 ^{0}	7 ^{0}

Згідно з ГОСТ 7505-74 зовнішні ухили для сталевих поковок, що штампуються на молотах, мають бути не більші 7 ^{0}, а внутрішні – не більше 10 ^{0}. З метою уніфікації різального інструменту на практиці найчастіше обмежуються і одним значенням ухилу 7 ^{0}. Необхідність у збільшенні внутрішніх ухилів виникає через те, що внутрішні порожнини штампа обтискаються зовнішніми відносно до них поверхнями остигаючої штампованої поковки, внаслідок чого по цих поверхнях збільшуються сили тертя, що перешкоджають витяганню поковки зі штампа.

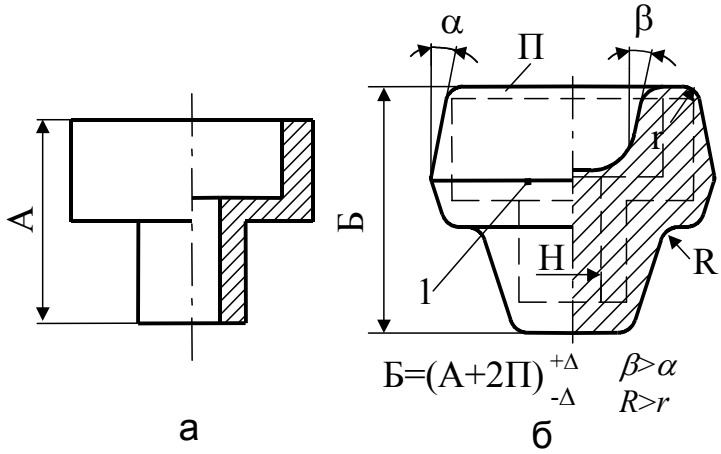


Рис. 12.5. Креслення поковки:
а – деталь; б – поковка; 1 – площина розніму; Δ – відхилення від номінального розміру; Н – напуск

Радіуси закруглення. Розрізняють два види радіусів закруглення штампувальних рівчаків: внутрішні *r* і зовнішні або зовні-

шні *R* (рис. 12.5). У поковок буквені позначення радіусів розташовуються в зворотному порядку. Усі переходи поверхонь мають закруглятися, оскільки це сприяє кращому заповненню штампа, а також захищає його від передчасного зносу і поломок. Радіуси закруглень залежать прямо пропорційно від глибини порожнини. На внутрішніх кутах радіус закруглення *R* приймають у 3 – 4 рази більше, ніж радіус закруглення зовнішніх кутів *r* (див. рис. 12.5). Необхідність призначення радіусів закруглень виникає через неможливість отримати у поковки малі, в межах, що прагнуть до нуля, радіуси внаслідок зростаючого впливу сил тертя в гострих кромках і концентрації напружень в них, що призводить до тріщиноутворення і зносу інструменту.

Радіуси закруглення зовнішніх кутів r зазвичай коливаються в межах від 1,0 до 6,0 мм. Чим глибше порожнина, тим більшим беруть радіус закруглення. Величину радіусів вибирають також залежно від способу заповнення порожнини при штампуванні. Якщо порожнина заповнюється витискуванням, то радіус має бути більшим, ніж при заповненні рівчака осаджуванням.

Для спрощення виготовлення рівчаків і уніфікації потрібного для цього різального і мірного інструменту значення взятих радіусів закруглень рекомендується вибирати тільки з ряду 1; 1,5, 2, 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30 мм і прагнути до їх уніфікації в кожній поковці, призначаючи неоднаковими радіуси тільки в тих випадках, коли це не ускладнює виготовлення штампа.

Перемички під штампування отворів. При штампуванні поковок з глухими порожнинами або наскрізними отворами прагнуть отримати виїмки як можна більшого об'єму, що приводить до економії металу і зменшення трудомісткості при механічній обробці.

Поковки з дуже глибокими порожнинами не є типовими для штампування на молотах унаслідок великих штампувальних ухилів і значних втрат металу з напуском. Неглибока порожнина в поковці (рис. 12.6, а) може бути утворена в молотових штампах тим легше, чим більше діаметр цієї порожнини.

При штампуванні таких поковок у найбільш важких умовах працюють виступи штампів, що називаються знаками. Унаслідок малої стійкості штампових знаків порожнини діаметром менше 30 мм при гарячому штампуванні за ГОСТ 7505-74 не виконують. При штампуванні поковок деталей великої висоти з отвором обмежуються отриманням лише глухих знаків (рис. 12.6, б) без подальшого просічення отворів, які отримують при обробці поковок різанням.

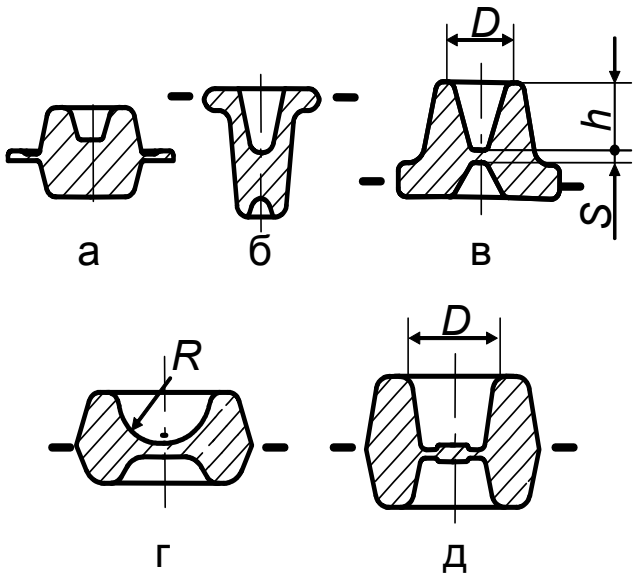


Рис. 12.6. Варіанти розміщення площини рознімання

Наявність виїмки в поковці економить метал і сприяє отриманню точніших розмірів при калібруванні торцевих поверхонь. Знаки можна отримати з двох сторін поковки. Для забезпечення стійкості положення заготовки при закладанні її в рівчак нижній знак має бути невисоким. Згідно з ГОСТ 7505-74 для глухих знаків встановлюється глибина, яка дорівнює не більше 0,8 їх діаметра.

Виконання наскрізних отворів або поглиблень у поковках є обов'язковим, якщо діаметр отворів більше або дорівнює висоті поковок. Якщо штампують поковку деталі невеликої висоти з наскрізним отвором, то найменша витрата металу і правильний радіальний потік його забезпечуються при утворенні знаків з двох боків поковки за умови незбігання рівнів з площин рознімання штампа і утворення перемички (рис. 12.6, в). Перемичка, що утворюється, легко видаляється в штампі для просічення при обрізанні облою. Товщина звичайної (плоскої) перемички *S* (див. рис. 12.6, в) залежить передусім від діаметра *D* і глибини *h* прошивання і може бути визначена за емпіричною формулою

$$S = 0,45\sqrt{D - 0,25h - 5} + 0,6\sqrt{h} \ .$$

Якщо глибина прошивання *h* менше діаметра прошиваного отвору *d* в 2,5 раза і більше, то робити плоску прошивку важко. У таких випадках для полегшення роздачі металу в сторони рекомендується замість плоских робити перемички з розкосом (рис. 12.6, г).

При штампуванні поковок зі знаками отворів доводиться зважати на те, що занадто товсті перемички отворів важко зрізувати, а надмірно тонкі перемички недоцільні за витратою енергії при штампуванні і через зниження стійкості штампових знаків. На практиці у кожному окремому випадку встановлюють оптимальні розміри перемичок з урахуванням вживаної сталі і габаритних розмірів поковки. Якщо перемички виходять великого діаметра і невеликої товщини, то для їх виготовлення потребується багато енергії. У цьому випадку при штампуванні в чорновому рівчаку доцільно отримувати перемичку між знаками з великими радіусами закруглень (див. рис. 12.6, г). При штампуванні в чистовому рівчаку (рис. 12.6, д) застосовують такі знаки, які утворюють в середині перемички магазин (карман). Метал з потовщених місць перемички витісняється в магазин, при цьому перемичку легко видалити, а видру можна використати як заготовку при виготовленні інших дрібніших деталей.

До спеціальних питань проектування поковки належать:

1) раціональне спрощення конструкції поковки з метою полегшення заповнення металом рівчаків і підвищення стійкості штампа;

2) можливість одночасного штампування декількох деталей, конструювання поковки, що складається з декількох деталей;

3) розділення складної деталі на декілька простих поковок з передбаченням подальшого зварювання;

4) застосування секційного штампування великих поковок типу валів, дисків, панелей та ін.;

5) проектування поковки з урахуванням можливості застосування комбінованого штампування, поєднання штампування на кувальних вальцях або ГКМ зі штампуванням на молоті тощо.

Проектування молотового штампа

Конструюванню штампа передує розрахунок і конструювання його рівчаків. Після складання креслення гарячої поковки, вибору штампувальних переходів і штампувальних рівчаків, визначивши потужність, потрібну для штампування молота, вибирають необхідний розмір штампового кубика і починають розташовувати на ньому штампувальні рівчаки.

Заготівельні рівчаки розташовують з боків дзеркала штампа, оскільки при штампуванні вони не зазнають великих навантажень, тому деформація заготовок здійснюється слабкими ударами молота. Рівчаки розташовують у технологічному порядку, враховуючи сторону розташування печі для нагрівання заготовок. Перший заготівельний рівчак має знаходитися в штампі з боку нагрівального пристрою.

Для деформації заготовки в штампувальних рівчаках потрібні сильніші удари, ніж в заготівельних. Тому штампувальні рівчаки мають розташовуватися ближче до центральної осі штампа. Якщо штамп має тільки чистовий рівчак, то центр чистового рівчака має збігатися з центром штампа (точка перетину осі хвостовика з віссю штока). Якщо штамп має обидва штампувальні рівчаки (чистовий і чорновий), то вісь першого розташовується на відстані 1/3 по один бік, а вісь другого – на відстані 2/3 по інший бік від центральної осі штампа. Глибші порожнини рівчаків зазвичай розташовуються ближче до кліщової виїмки.

У багатьох випадках при штампуванні виникають горизонтальні сили, що зміщують верхню частину штампа відносно нижньої, що призводить до браку поковок, поломки штока і підвищеного зносу, що направляють баби молота.

Для запобігання зміщенню один зі штампів виконують з виступом, який упирається у бічну стінку іншого штампа. Цей пристрій називається замком. Інший прийом полягає в тому, що рівчак виконують з таким нахилом відносно площини рознімання штампу, який приводить до зрівноваження сил у межах порожнини рівчака.

З метою економії дорогої штампової сталі іноді застосовують вставки молотових штампів. Вставним може бути, наприклад, швидко зношуваний знак для формоутворення знаків під отвір або чистовий рівчак. Стійкість вставок вище стійкості цілісних штампів, оскільки вставки мають попереднє напруження стискування. Небезпечне розтягувальне напруження, що

призводить до утворення тріщин, з'являється пізніше, ніж при використанні цілісного штампа.

Витягання вставок зі штампового кубика є складною операцією, тому іноді застосовують вставки, які особливо зручні при однорівчаковому штампуванні. У штамповий кубик вуглецевої сталі за допомогою гарячої посадки поміщають вставку з легованої сталі і не витягають її після зносу. При цьому рівчак і увесь штамп ремонтують так само, як і цілісно блоковий штамп.

Нерухомість штампів при роботі забезпечується за допомогою шпонок і клинів. Верхній штамп зміцнюється у бабі, а нижній – у штампотримачі, що називається подушкою. Принцип кріплення штампів зображено на рис. 12.7.

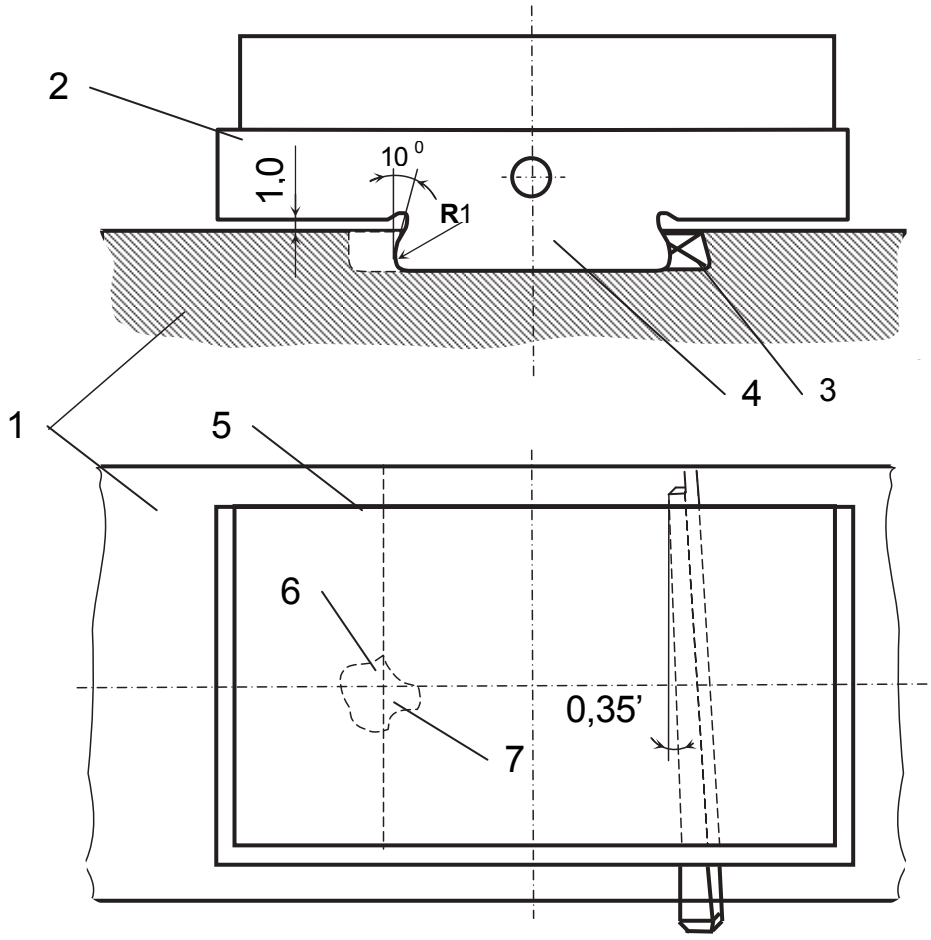


Рис. 12.7. Принцип кріплення штампів
на молотах

Штамп 2 встановлюється хвостовиком 4 в паз 5 баби або подушки 1. Подовжнє зміщення штампа обмежується вкладною шпонкою 6, що вставляється у виріз 7 хвостовика 4 штампа і у виріз подушки 1. Поперечне зміщення штампів обмежується забитим уздовж хвостовика клином 3, для чого одна зі сторін гнізда подушки 1(так само, як і хвостовика 4) має скіс

під кутом до подовжньої осі 35'. Для виключення вертикального переміщення штампів кожен з них має хвостовик – "ластівчин хвіст".

Розташування клинів (верхнього і нижнього) з одного боку не приводить до відносного зрушення частин штампа при рівномірному підбитті клинів. Розташування їх ліворуч забезпечує найбільшу безпеку штампувальникові.

Штампи обпираються на хвостовики. Проміжок під заплечиками становить 0,5…1,5 мм і кожного разу внаслідок пружного вигину заплечиків знижується до нуля під час ударів при обробленні в рівчаках, розташованих на заплечиках.

Щоб уникнути зминання опорних поверхонь хвостовика, його площа має становити не менше 450 $см^2$ на 1 тонну падаючих частин (п. ч.). Вільна від рівчаків і направляючих замків площа поверхні зіткнення (дзеркало) штампів має становити не менше 300 $см^2$ на 1 тонну ваги п. ч., причому, якщо ця поверхня розділена нерівномірно, то навантаження на частину цієї поверхні, відсічену будь-якою прямою, що проходить у площині рознімання через центр штампа, щоб уникнути зминання, має становити не менше 300 $см^2$ на 1 тонну від половини ваги п. ч. молота.

Штампи для гарячого штампування працюють у важких умовах, оскільки піддаються дії температур, що різко змінюються, і ударам. Знос штампів супроводжується появою тріщин розпалу, зміною робочих кромок унаслідок втрати твердості й стирання при переміщенні розігрітого металу в процесі штампування. Тому штампова сталь має мати такі властивості: високу міцність, твердість і ударну в'язкість; високу розпалостійкість; хорошу прожарюваність, високу зносостійкість; високий опір відпустці.

Для забезпечення перелічених властивостей штампи для гарячого штампування виготовляють з легованих сталей. Основними сталями для молотових штампів у разі виготовлення їх з глибокими порожнинами складної конфігурації є сталі марок 5ХНМ і 5ХГМ, проте застосування їх обмежується дорожнечею і дефіцитністю молібдену, тому у більшості випадків застосовують, сталі 5ХНТ, 5ХНВ, 3ХВ8, 4ХВС, 7Х3, 5ХГС.

Технологічний процес виготовлення молотових штампів здійснюється приблизно за такою схемою:

1) проковування частини зливка у трьох напрямках на стандартний розмір кубика;

2) термічне оброблення – нормалізація або відпал (для зниження твердості);

3) стругання хвостовиків і площин (робочих і контрольних);

4) термічне оброблення – загартування і відпустка на остаточні механічні властивості;

5) виготовлення рівчаків і фрезерування кліщових виїмок.

Попереднє виготовлення рівчаків у штампі виконують фрезеруванням на копіювальних верстатах. Остаточну обробку рівчаків і канавок для облою виконують за допомогою шліфування і полірування, які здійснюють вручну з подальшим контролем штампувальних рівчаків по свинцевих або воскових відливаннях. Профіль заготівельних рівчаків контролюється шаблонами. Уся механічна обробка штампових кубиків різанням здійснюється після остаточної термообробки, що дає можливість при зносі штампа перестругати його і знову виготовляти фігури рівчаків. Унаслідок такого складного і трудомісткого технологічного процесу виготовлення собівартість штампів висока.

Стійкість молотових штампів значною мірою залежить від конфігурації і розмірів окремих елементів завершального рівчака, штампованого матеріалу, якості мастила, а також від ваги падаючих частин молота.

Вартість штампів різко знижується зі збільшенням ваги поковки, з ускладненням її конфігурації (наявність глибоких і тонких ребер). До основних заходів щодо підвищення стійкості штампів належать такі:

1) виготовлення рівчаків штампів не різанням, а штампуванням майстер-штампами, що зберігає напрямок волокон і підвищує опір зносу на 20…30 %;

2) ретельний контроль температури нагрівання штампів і температури кінця штампування поковки;

3) створення раціональнішої конструкції штампа завдяки досконалішій конструкції заготівельних рівчаків;

4) ретельний контроль за примусовим охолодженням і мастилом штампів (введення охолодження розчином кухарської солі, обдування повітрям і т. п.);

5) застосування стійкіших штампових сталей;

6) застосування безкисневого нагрівання з метою зниження окалиноутворення.

Багаторівчакове об'ємне штампування

Молотовий штамп складається з двох половин – верхньої і нижньої, тому наскрізні отвори в поковках можуть бути отримані лише у напрямку, перпендикулярному до площини рознімання. Для отримання наскрізних отворів в молотових штампах робляться знаки під отвори з перемичками, які видаляються прошиванням при обрізанні облою на штампах обрізування. Молотові штампи для штампування поковок складної конфігурації мають дві групи рівчаків.

1. Штампувальні: чорновий (попередній) і чистовий (завершальний).

2. Заготівельні: протяжний, підкатний, нережимний, формувальний і згинальний, а також майданчик для осадження.

При багатоштучному штампуванні поковок від прутка для відділення поковок є відрізний ніж.

Заготівельні і штампувальні рівчаки можуть бути відкритими і закритими, в яких заготовка обробляється за декілька ударів молота, причому в деяких заготівельних рівчаках заготовка кантується приблизно на 90 ^{o} навколо подовжньої осі.

Чорновий рівчак призначено для полегшення штампування в чистовому рівчаку і збільшення стійкості більше зношуваного чистового рівчака. Необхідність застосування чорнового рівчака визначається складністю форми поковки. Чорновий рівчак має контури, схожі з остаточним, але форма його порожнини плавніша. Заготовка після чорнового рівчака має спрощену форму поковки. Чорновий рівчак зазвичай не має канавки облою.

Чистовий рівчак призначено для отримання готової поковки з облоєм (задиркою). За конфігурацією він точно відповідає поковці, що знаходиться в гарячому стані. Таким чином, складання креслення поковки одночасно є і проектуванням чистового рівчака. Розміри чистового рівчака більше розмірів холодної поковки на величину лінійної усадки (для сталі близько 1,5 %). Навколо чистового рівчака виконується канавка для облою, форма і розміри якої залежать від складності конфігурації поковки, її розмірів і форми заготовки.

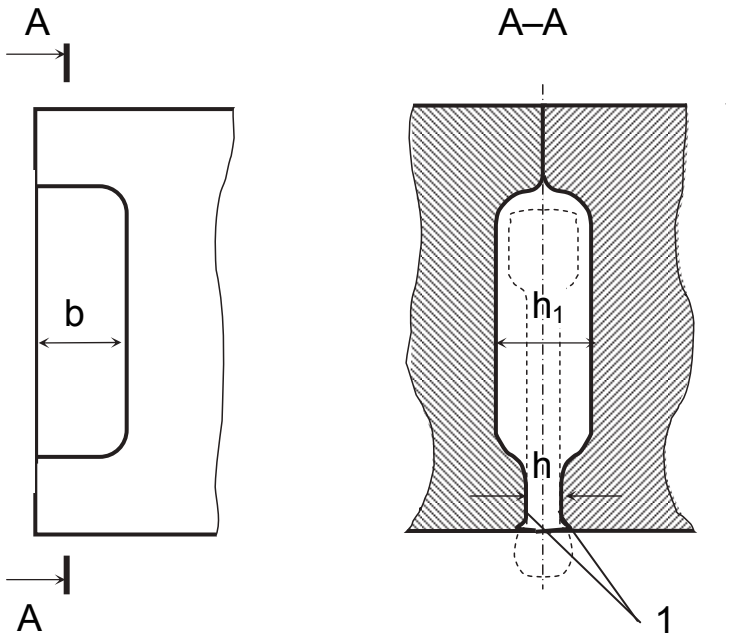


Рис. 12.8. Протяжний рівчак:
1 – бойки протяжного рівчака

Протяжний рівчак призначено для зменшення поперечного перерізу окремих ділянок початкової заготовки при одночасному збільшенні їх довжини (рис. 12.8). Протяжний рівчак застосовується тоді, коли вибрана довжина заготовки коротше довжини поковки, і виконується він у формі бойків. Здійснюючи протягування, заготовку після кожного удару (як і при куванні) переміщають уздовж її осі і одночасно кантують на 90 ^{0}. Протяжний рівчак розташовується збоку штампа: або паралельно його кромці, або під кутом до неї залежно від наявності вільного місця на дзеркалі штампа.

Для проведення операції протягання необхідно, щоб заготовка вільно поміщалася в порожнині рівчака, тобто щоб h_1 = 2 h. Відстань h приблизно має дорівнювати товщині заготовки після протягання. Ширина рівчака b приблизно на 5…10 % більше діаметра початкової заготовки.

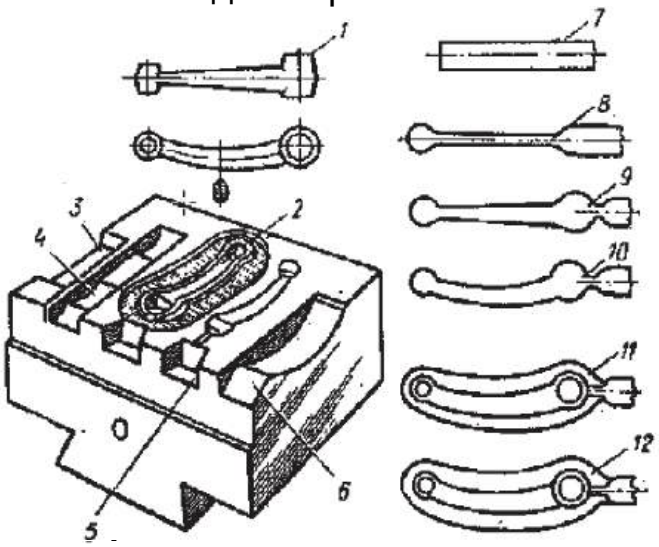


Рис. 12.9. Типи рівчаків:
1 – поковка; 2 – остаточний рівчак; 3 – протяжний рівчак;
4 – підкатний рівчак; 5 – попередній рівчак; 6 – згинальний рівчак;
7 – заготовка; 8 – протягування; 9 – підкатування; 10 – гнуття;
11 – попереднє штампування; 12 – остаточне штампування

Підкатний рівчак (рис. 12.9) є найважливішим з усіх заготівельних рівчаків. Основним його призначенням являється збільшення поперечного перерізу одних ділянок початкової заготовки внаслідок зменшення перерізу інших. За допомогою підкатного рівчака об'єм металу заготовки поширюється відповідно до конфігурації поковки. Початкова заготовка надходить до підкатного рівчака або безпосередньо, або після протяжного рівчака. З підкатного рівчака заготовка подається в чорновий або чистовий рівчак. Отже, контур підкатного рівчака в подовжньому перерізі має вписуватися в контур штампувальних рівчаків.

Застосовуються два типи підкатних рівчаків – відкритий і закритий; більшого поширення набув закритий тип рівчака. Профіль підкатного рівчака будується виходячи з епюри поперечних перерізів по довжині поковки або виходячи з епюри діаметрів, що є діаграмою, кожна висота якої є діаметром круга з площею, яка дрівнює сумі площ перерізів поковки і облою. Площу облою визначають на підставі набутої форми канавки за умови заповнення її металом на 70 %. Таким чином, площа перерізу епюри в довільному місці поковки визначається виразом

$$F_e = F_П + 1{,}4F_{обл}$$

Висота епюри, або її діаметр, у довільному перерізі

$$d_e = 1{,}13\sqrt{F_e},$$

де d_e і F_e – висота і площа перерізу епюри у довільному місці;

$F_п$ і $F_{обл}$ – площі поперечного перерізу поковки і канавки для облою.

Глибина порожнин підкатного рівчака h можна визначити за епюрою перерізів таким чином:

для перерізів, у яких $d_e < d$ (d – діаметр заготовки),

$$h = (0{,}7(0{,}8)\, d_e;$$

для перерізів, у яких $d_e \geq d$

$$h = d_e.$$

При застосуванні заготовки квадратного перерізу із стороною а виконують зведення його до круглого за формулою

$$d = 1{,}13a.$$

Довжину окремих ділянок підкатного рівчака визначають за кресленням поковки з урахуванням усадки; ширину розраховують за формулою

$$b = \frac{F_{заг}}{h_{\min}} + 10 \text{ мм},$$

де $F_{заг}$ – площа поперечного перерізу початкової заготовки;

h_{min} – мінімальна глибина порожнини рівчака.

Розміри перетиску у кліщовій частині рівчака k і радіуси R визначають за такими залежностями:

$$k = (0{,}2(0{,}3)d \text{ мм};$$

$$R = (0{,}1d{+}6) \text{ мм}.$$

Для того щоб протилежний кінець заготовки не закочувався в складки, підкатний рівчак має канавку, глибина якої залежить від розміру поперечного перерізу початкової заготовки і підбирається дослідним шляхом.

Перетискний рівчак застосовують для місцевого розширення початкової заготовки в площині, перпендикулярній до деформувальної сили, і надання їй відповідної форми без переміщення металу в осьовому напрямку. Наявність перетискного рівчака полегшує заповнення порожнини наступного рівчака. Профіль пережимного рівчака будується відповідно до розмірів поперечних перерізів поковки спільно з облоєм. Горизонтальні ділянки рівчака замінюються ухилами в 3 – 5 °. Довжина рівчака приблизно відповідає довжині поковки.

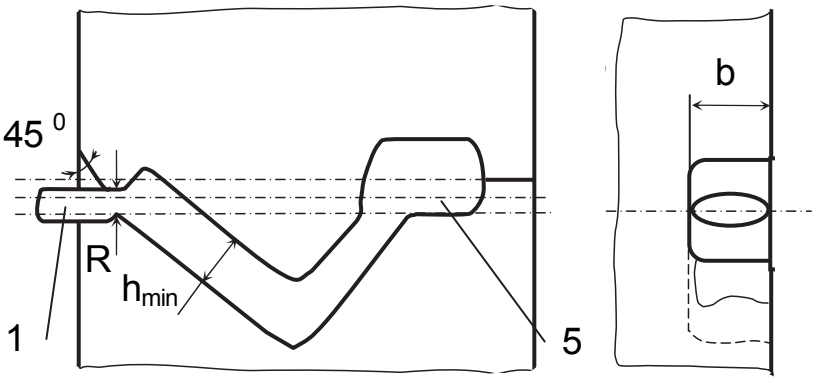


Рис. 12.10. Рівчак для гнуття:
1 – вихідна заготовка; 2 – верхній штамп;
3 – виступ; 4 – нижній штамп; 5 – упор;
6 – смужки рознімання

Формувальний рівчак схожий з перетискним і застосовується для надання заготовці форми поковки, яку вона має в площині рознімання штампів, і часткового набору. Заготовку з формувального рівчака поміщають у чорновий або чистовий рівчак з поворотом її навколо осі на 90 °.

Рівчак для гнуття (рис. 12.10) застосовують тільки при штампуванні поковок, що мають зігнуту вісь, яке лежить у площині рознімання, і залежно від наявності інших рівчаків і черговості згинальної операції розташовується з лівого або з правого боку штампа.

Початкова заготовка надходить відразу до згинального рівчака або після деформації в інших заготівельних рівчаках (протяжному, підкатному, перетискному). Конфігурація заготовки, отримана після гнуття, у згинальному рівчаку має вписуватися в контур чорнового або чистового рівчака з проміжком 3…5 мм.

У згинальному рівчаку закруглення мають бути плавними, оскільки наявність гострих кутів може призвести до браку у вигляді затиску, що утворюється внаслідок зустрічної течії металу частин заготовки, що згинаються. Нижні й верхні частини згинального рівчака розташовуються так, щоб заготовка укладалася на рівчак з упором.

Частина згинального рівчака, що виступає, виконується тільки у верхньому штампі, як показано на рис. 12.10. Ширину рівчака *b* визначають за виразом

$$b = \frac{F_{заг}}{h_{\min}} + (10...20)\ \text{мм},$$

де $F_{заг}$ – площа поперечного перерізу заготовки. Розміри перетиску *k* і радіус *R* визначають за залежностями для підкатного рівчака.

Майданчик для осадження застосовується для попереднього осаджування заготовки при штампуванні круглих, квадратних або близьких до них у пла-

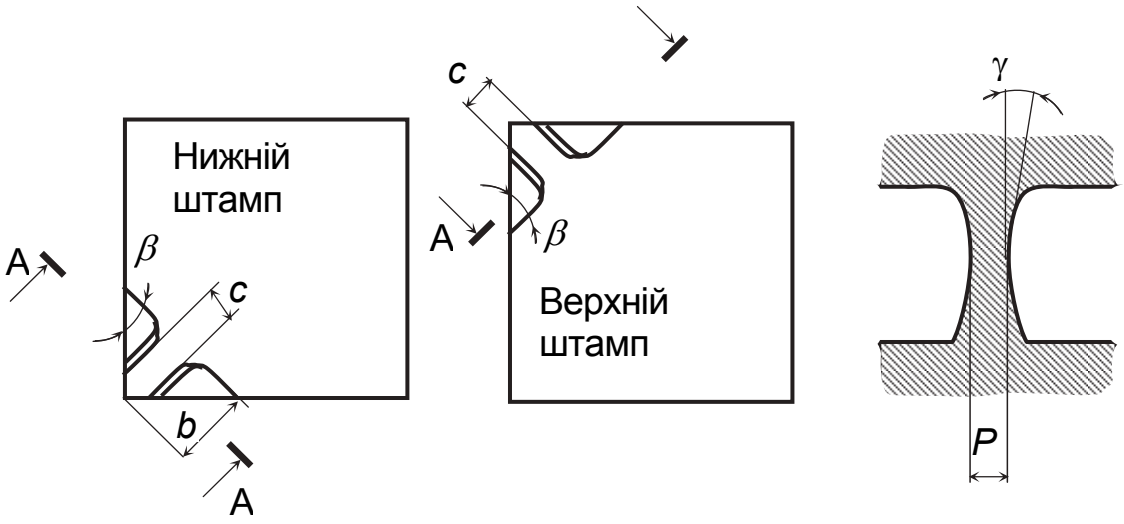


Рис. 12.11. Відрізний ніж і його розташування

ні поковок. Майданчик для осадження найчастіше розташовується в лівому передньому кутку дзеркала штампа і, щоб уникнути надмірного збільшення габаритів штампа для цього майданчика, частково використовують ділянку зони облойної канавки, для чого її кромки в цьому місці виконують з плавним переходом у площину.

Відрізний ніж застосовують тоді, коли штампування поковок виконують від прутка, а також для обрубування від прутка готової поковки (рис. 12.11).

Відрізний ніж розташовується в лівому передньому або лівому задньому куту штампа.

Завершальні операції об'ємного штампування

Облой, що утворюється по лінії рознімання при штампуванні у відкритих штампах, обрізають у штампах обрізання, що встановлюються на кривошипних пресах обрізання, на стрічкових пилах, пальцьовими фрезами на фрезерних верстатах.

Обрізання облою із сталевих поковок зазвичай роблять у штампах обрізання, причому дрібні поковки обрізають у холодному стані, а великі – безпосередньо після штампування на пресі, що входить до складу штампувального агрегату. Зусилля при гарячому обрізанні в 5 – 6 разів менше зусилля при холодному обрізанні.

Значення обрізання в технологічному процесі неоднакове при штампуванні на молотах і пресах. Штампування за декілька ударів у кожному рівчаку на молоті потребує у 2 – 3 рази більше часу, ніж обрізання облою за один хід на пресі обрізання, тому останній при гарячому обрізанні використовується непродуктивно – на 40…50 %. При штампуванні в багаторівчакових штампах на пресах більш швидкохідних, ніж преси для обрізання, ускладнення можуть виникнути з устаткуванням, оскільки час, необхідний для обрізання облою, в окремих випадках більше часу, необхідного для штампування. Гаряче обрізання потрібне при штампуванні поковок з легованих і високолегованих сталей. Поковки з великою площею зрізу доцільно обрізати в гарячому стані, щоб не встановлювати преси обрізання дуже великої потужності. Такі поковки, але невеликих розмірів схильні до викривлення при гарячому обрізанні й тому підлягають холодному обрізанню, яке в таких випадках не потребує великих зусиль і зазвичай не супроводжується подальшою правкою поковок.

Продуктивність при холодному обрізанні поковок на відособлених пресах значно вище, ніж при гарячій; преси використовують раціональніше і кількість пресів обрізання в цеху зменшується. При холодному обрізанні викривлення поковок незначне, пригонка інструменту обрізання простіша, ніж при гарячому обрізанні. Для зменшення зусилля холодне обрізання можна робити після первинної термічної обробки поковок (випалення). Проте термічне оброблення поковок, які не підлягають обрізанню, коштує дорожче головним чином через знижену продуктивність термічних печей.

Обрізання облою з поковок кольорових сплавів виконують також переважно в штампах. Проте для обрізання великогабаритних поковок з легких сплавів при невеликих партіях користуються стрічковими пилами. Їх слід також застосовувати для обрізання облою великої товщини (більше 2,5 мм) на поковках з магнієвих сплавів. Обрізання на фрезерних верстатах іноді застосовують при виготовленні дрібних партій невеликих поковок.

Поковки з алюмінієвих і мідних сплавів обрізають у штампах у холодному стані. Обрізання в штампах поковок з магнієвих сплавів типу МА2 і ВМ65-1 слід виконувати при температурі не нижче 220 ^{0}С, із сплавів МА3 і МА5 – в інтервалі температур 220…300 ^{0}С, з титанових сплавів – не нижче 600 ^{0}С. Обрізання облою з поковок з титанових сплавів часто здійснюють безпосередньо після штампування без підігрівання. Якщо температура поковки стала нижче допустимої (600 ^{0}С) і за обрізанням облою йде правка, то поковку нагрівають до 700 ^{0}С, а іноді до 850 ^{0}С.

Робочими деталями штампа обрізання є матриця обрізання і обрізний пуансон. Матрицю закріплюють у нижній плиті преса за допомогою кріпильних і настановних болтів або ж клином. Пуансон закріпляють пуансонотримачем різними способами, наприклад клином. Крім того, до комплекту штампа обрізання входить знімач, що забезпечує зняття зрізаного облою з пуансона.

Матриця обрізання завжди є різальним інструментом. Роль же пуансона часто зводиться лише до проштовхування поковки в отвір матриці, яка і виконує зріз облою.

Матриці виконують цілісними і складеними з двох і більше частин. Цілісні матриці застосовують переважно для дрібних поковок простої форми в плані. Складені матриці допускають деяке підстроювання розмірів отвору залежно від спрацювання кувального штампа.

Для зменшення зусилля обрізання і забезпечення плавнішого навантаження преса застосовують матриці зі скошеними різальними кромками. Ухил різальних кромок виконують під кутом α = 3…6 ^{0}.

Залишки облою і перемичок по периметрах обрізання мають бути невеликими; залишки облою на сторону залежно від ваги поковки і міри складності коливаються в межах від 0,5 до 2,5 мм. Залишки задирок зростають зі збільшенням ваги поковки і міри її складності. Багато ускладнень виникає при обрізанні з ламаними і кривими лініями рознімання штампа. Необхідно, щоб профіль облою в площині лінії рознімання штампа не мав кутів, близьких до прямого; чим менше цей кут, тим легше обрізати задирку. Крім того, задирку легше обрізати, якщо вона не проходить по торцю заготовки.

Розрізняють прості, послідовні й комбіновані штампи обрізання. Прості штампи обрізання призначені тільки для видалення задирок або перемичок. У великосерійному і масовому виробництвах застосовують складні штампи – послідовні й поєднані.

У послідовному штампі на верхній і нижній плитах встановлюють декілька комплектів матриць і пуансонів, наприклад, обрізний і пробивний, обрізний і

правильний і т. п. Поковку послідовно передають від одного комплекту інструменту до іншого, здійснюючи необхідні операції. У поєднаних штампах, які складніші за послідовні, виконують декілька операцій за один хід пресу, наприклад, обрізання і прошивання, обрізання і правку і т. п.

Термічна обробка поковок

Термічну обробку поковок після гарячого штампування проводять для виправлення структури, необхідність цієї операції обумовлена порушеннями температурного інтервалу штампування і умов охолодження відштампованих поковок.

На термічну обробку поковки надходять після обрізання облою. Метою термічної обробки поковок є таке: усунення негативних наслідків нагрівання і штампування (зняття залишкового напруження, виправлення наслідків перегрівання і т. п.; поліпшення оброблюваності різанням при подальшій механічній обробці; підготовка структури металу до остаточної термічної обробки, якщо така має місце.

Термічну обробку поковок застосовують головним чином для сталевих поковок. Основними операціями при цьому є: відпал; нормалізація; нормалізація з відпусканням; термополіпшення (загартування з високим відпусканням). Відпалу піддають головним чином великі поковки. Інші види термічної обробки широко застосовують при виробництві кованих і штампованих поковок.

Поковки з алюмінієвих сплавів піддають загартуванню з подальшим природним або штучним старінням. Поковки з магнієвих сплавів піддають відпалу, загартуванню і штучному старінню, поковки з титанових сплавів піддають відпалу або гомогенізації.

Особливий інтерес для технології становлять операції, пов'язані з використанням кувальної теплоти. У таких випадках термічні печі встановлюють безпосередньо на штампувальні ділянки. Після термічної обробки поковки надходять для очищення поверхні.

Очищення поверхні поковок

При нагріванні у повітряному середовищі для кування і штампування поверхню заготовок з алюмінієвих і магнієвих сплавів покривають оксидною плівкою, а поверхню мідних, титанових і особливо сталевих заготовок – шаром оксидів у вигляді окалини. На заготовках титанових сплавів, крім того, утворюється твердий альфірований шар.

При неповному видаленні окалини частина її вминається в поверхневі шари поковок при штампуванні і залишається в них у вигляді малопомітних плям. Крім того, поверхня сталевих поковок під час охолодження після штампування покривається тонким шаром знову утворюваної окалини, який значно збільшується при подальшій термічній обробці.

Для підвищення терміну служби різального інструменту при механічній обробці, а також для полегшення контролю якості поверхні поковки очищають від окалини. У промисловості застосовують хімічні та механічні способи очищення.

Для сталевих поковок основним способом є очищення в дробоструминих апаратах з механізованим завантаженням і вивантаженням поковок великими партіями. Для дробоструминного очищення застосовують чавунний дріб діаметром 1,5…2 мм або сталевий дріб діаметром 0,5…1,5 мм залежно від розмірів поковки, що дозволяє збивати окалину при малих радіусах закруглення внутрішніх кутів.

Для дробоструминного очищення поковок використовують два типи апаратів. Дрібні й середні поковки піддають очищенню при їх руху відносно стрічки транспортера, що знаходиться усередині апарата.

Для великих поковок застосовують апарати, в яких вони переміщуються разом із стрічкою. Швидкість удару дробинок досягає 60 м/с. Застосовують і пневматичне і механічне подання дробу. Продуктивність дробоструминних барабанів – до 5 м поковок за годину.

При обробленні поковок у барабанах (галтування) окалина видаляється під час удару поковок одна об одну і об спеціальні металеві зірочки, що завантажуються у барабан. Цей спосіб застосовують тільки для відносно невеликих поковок, щоб уникнути значних забоїн на поверхні. Нахил барабана під кутом сприяє кращому перемішуванню поковок і полегшує їх вивантаження. Кут має бути більше кута тертя сталі об сталь і зазвичай становить 20…300 ^{0}.

Для травлення сталевих поковок використовують зазвичай 20%-ний розчин сірчаної кислоти при 60…90 ^{0}С і рідше 15%-ний розчин соляної кислоти при 30 ^{0}С, а також суміші цих кислот, іноді з додаванням азотної кислоти та інших різних домішок. При зазначених температурах травлення відбувається найбільш інтенсивно. При травленні одночасно проходять два процеси: розчинення окалини і відновлення основного металу під шаром окалини, причому сірчана кислота інтенсивніше відновлює основний метал порівняно з соляною. У соляній кислоті травлення відбувається в основному завдяки розчиненню оксидів, в сірчаній кислоті – завдяки відриву окалини, що відділяється на межі окалини і основного металу воднем. Після травлення сталеві поковки промивають в гарячій воді при температурі 60…70 ^{0}С з додаванням лугу.

Значно складнішим є травлення для видалення окалини з поверхні поковок з титанових сплавів. Така окалина – дуже стійка і дуже важко піддається розчиненню як в лугах, так і кислотах. Оброблення проводять спочатку в розплавленому їдкому натрі з додаванням азотнокислого натру. Правильний розчин при цьому через мікро- і макропори проникає до поверхні основного металу, відновлює його, відшаровуючи і розпушуючи окалину. Потім поковки промивають у воді і занурюють в кислотний розчин. Потім повторно промивають у воді, очищають щітками і промивають утретє. Процес складний і малопродуктивний. Тому вважають за краще видаляти окалину механічним шля-

хом, а після механічного очищення для виявлення дефектів і освітлення поверхні застосовують травлення в кислотному розчині.

Механічне очищення і травлення у розплаві лугів не видаляють з поверхні поковок альфірований шар, що утворюється при нагріванні для кування і штампування. Цей шар відрізняється зниженою пластичністю і підвищеною твердістю, що знижує продуктивність і стійкість інструменту при обробці різанням. Видалення альфірованого шару потрібно проводити методом глибокого травлення, яке проводять у розчині фтористого водню і сірчаної кислоти.

При кімнатній температурі відновлення поверхні у цьому розчині відбувається зі швидкістю 0,5…0,6 мм/год, а при нагріванні до 45…55 ^{0}С – зі швидкістю 0,8…1,0 мм/год.

Останнім часом для скорочення тривалості та втрати металу в процесі травлення, а також для підвищення якості травильної обробки почали використовувати ультразвукові коливання, потік яких пропускають через травильну ванну за допомогою магнітострикторів спеціальної конструкції.

Титанові сплави можна очищати від окалини і механічним способом – галтуванням і дробоструминною обробкою. Розрізняють галтування сухе і мокре. При сухому галтуванні у барабан разом з поковками зазвичай засипають деревну тирсу для поглинання олії, а іноді сталеві кульки і зірочки.

При дробоструминному очищенні на поковку струменем стисненого повітря (0,5…0,6 МПа) спрямовується з сопла потік сталевого дробу діаметром 1…1,4 мм. При дробометальному очищенні для утворення потоку дробу використовують дробометальне колесо лопатки, з якого сталевий дріб викидається віялом під дією відцентрової сили.

Для титанових сплавів прийнятнішим є дробометальне очищення, а для інших металів і сплавів – травлення.

Правка і калібрування поковок

Правка. На багатьох поковках, особливо таких, що мають тонкостінні складні перерізи, можуть виникати викривлення і спотворення форми безпосередньо після штампування (при застряванні поковки в спотвореному рівчаку) і особливо при обрізанні облою і пробиванні отворів унаслідок появи згинальних моментів у результаті неминучих проміжків між пуансоном і матрицею.

Тому для ряду поковок до технологічного процесу додають операцію правки, яку здійснюють у гарячому і холодному станах.

Гарячу правку виконують зазвичай без підігрівання після обрізання облою в чистовому рівчаку кувального штампа (у дрібносерійному виробництві) або у спеціальному правильному штампі (у великосерійному виробництві) на окремому штампувальному молоті або пресі (великі й складні поковки), а також на пресі (середні поковки) обрізання.

Холодну правку застосовують переважно для дрібних і середніх поковок. Її здійснюють у правильних штампах зазвичай на фрикційних молотах і гвинтових фрикційних пресах.

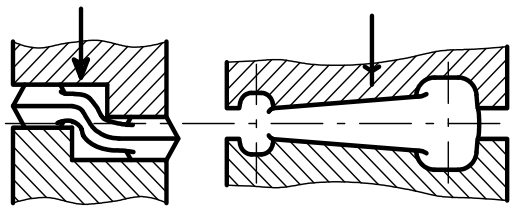
При виробництві сталевих поковок застосовують усі перелічені способи правки.

Поковки з кольорових сплавів правлять переважно в завершальних рівчаках кувальних штампів. Так, наприклад, поковки з титанових сплавів правлять безпосередньо після гарячого обрізання облою, для чого перед обрізанням їх нагрівають до температури 800…50 ^{0}С.

Калібрування. Це обробна операція, за допомогою якої досягається підвищення точності розмірів поковки, зниження коливань ваги і поліпшення якості поверхні. Калібрування у багатьох випадках замінює різання, що позитивно позначається на собівартості деталей. Калібрування набуло значного поширення у масовому і великосерійному виробництвах сталевих поковок. Застосування його до поковок з кольорових сплавів обмежене.

Розрізняють площинне і об'ємне калібрування (рис. 12.12).

Площинне калібрування призначено для отримання точних вертикальних розмірів на одній або декількох ділянках поковки, обмежених горизонтальними площинами (див. рис. 12.12, а).



а б

Рис. 12.12. Схема процесу калібрування:
а – плоске; б – об'ємне

Об'ємне калібрування (див. рис. 12.12, б) призначено для уточнення розмірів поковки у різних напрямках, а при витискуванні деякого надлишку металу в задирку – для отримання точної ваги.

Якість поверхні поковок підвищується при обох видах калібрування. Площинне калібрування дозволяє отримати велику точність вертикальних розмірів між паралельними поверхнями поковки, що калібрується. При цьому горизонтальні розміри на ділянках калібрування дещо збільшуються. Точність об'ємного калібрування зазвичай нижче, ніж площинного, але при цьому охоплюється вся поверхня поковки.

Площинне калібрування виконують у холодному стані на кривошипно-колінних пресах чеканення. Його можна застосовувати для поковок зі сталі, алюмінієвих сплавів і для будь-яких інших сплавів, які за своїми пластичними властивостями припускають холодну деформацію.

Величина припуску на калібрування залежить від результатів, які бажано отримати: при збільшенні припуску знижується точність розмірів, що калібруються, але підвищується якість поверхні.

Звичайна точність калібрування коливається в межах від $\pm$0,1 до $\pm$0,25 мм з класом чистоти поверхні ∇4. Калібрування підвищеної точності забезпечує точність у межах від $\pm$0,05 до $\pm$0,15 мм. Після двократного калібрування можна отримати ще більш високу точність (до 0,025 мм) з чистотою поверхні ∇7.

Об'ємне калібрування застосовують з метою підвищення точності розмірів і якості поверхні поковки, а також скорочення загальної ваги поковки. Цей вид калібрування виконують у штампах, які мають порожнини, що відповідають конфігурації поковки. У результаті об'ємного калібрування можливе утворення невеликого облою, який зазвичай видаляється на наждачному кругу. Точність розмірів при об'ємному калібруванні на 30…40 % нижче, ніж при площинному. Іноді об'ємне калібрування виконують у гарячому стані (при температурі 700…800 ^{0}C); облой, що виходить при цьому, піддається обрізанню. Таке калібрування з подальшим обрізанням облою називають доштампуванням і проводять на молотах, кривошипних або гвинтових пресах.

Контроль якості поковок

Контроль поковок розділяють на два види: проміжний контроль і контроль при прийманні готових виробів.

Проміжний контроль виконує майстер ділянки, який є головним контролером за дотриманням технології. На штампувальній ділянці майстер періодично контролює поковки, перевіряючи візуально відсутність зсувів, якість поверхні та якість заповнення завершального рівчака штампа. Проміжний контроль виконують після кожної операції технологічного процесу штампування.

Контроль готових поковок при їх прийманні здійснюється майстром ВТК (відділу технічного контролю) у спеціальному відділенні цеху в такому порядку:

– кожна поковка цієї партії піддається зовнішньому огляду;

– вибірково виконують промір поковок штангенциркулями, граничними скобами, шаблонами тощо;

– вибірково перевіряється твердість поковок, а в деяких випадках (для відповідальних виробів) – кожної поковки партії. Найчастіше твердість замірюють на пресі Брінеля;

– іноді технічні умови на поковку передбачають вибірковий контроль структури поковки (макро- і мікроструктури), а також контроль механічних властивостей; цей вид контролю виконують в ЦЗЛ (центральна заводська лабораторія).

Прийняті ВТК заводу поковки транспортуються в механічний цех. Забраковані поковки відправляються на виправлення, якщо воно можливе, в штампувальний цех.

Штампування на КГШП і спеціалізованому устаткуванні

Кривошипні гарячештампувальні преси (КГШП) витісняють штампувальні молоти і набули поширення у великосерійному виробництві поковок середніх мас. На цих пресах можна виконувати майже усі види штампувальних робіт, включаючи багаторівчакове штампування, і виготовляти поковки різної конфігурації вагою до 100 кг. Винятком є заготівельні операції у протяжних і підкатних рівчаках. Цей вид устаткування відрізняється найбільш високою вар-

тістю, але пристосований для високомеханізованого і автоматизованого виробництва поковок. КГШП допускають ексцентричне розташування рівчаків у штампі, забезпечені нижнім і верхнім виштовхувачами, але мають нерегульоване закінчення робочого ходу, що не дозволяє деформувати заготовку в одному рівчаку за декілька ходів.

Значне поширення цих пресів для гарячого об’ємного штампування пояснюється такими їх перевагами перед молотами:

1) більш високий ККД КГШП з індивідуальним електродвигуном має економічний (зведений до енергії палива) ККД у 2 рази вище, ніж у молота, і досягає 6…8 %;

2) більш висока продуктивність унаслідок скорочення кількості ударів у кожному рівчаку до одного;

3) підвищена точність розмірів поковок. Постійність ходу преса зменшує відхилення розмірів по висоті. Досконаліші конструкції штампів на пресах забезпечують меншу величину зсуву половин штампів, у зв'язку з чим точність розмірів поковок підвищується. Можлива точність роботи на кривошипних пресах характеризується найменшими допусками: 0,2…0,5 мм замість 0,8…1,0 мм при штампуванні на молотах;

4) збільшений коефіцієнт використання металу (КВМ). Наявність зменшених припусків, напуску і допусків є наслідком досконалішої конструкції штампів кривошипних пресів, забезпечених верхнім і нижнім виштовхувачами. Економія металу досягає десятків відсотків;

5) поліпшені умови праці, відсутність струсів ґрунту, а отже, здешевлення конструкції фундаментів і будівельних конструкцій цехових будівель;

6) виконання робіт штампувальниками нижчої кваліфікації, ніж при роботі на штампувальному молоті.

До основних недоліків КГШП належать їх висока вартість, можливість заклинювання в крайньому нижньому положенні повзуна, необхідність використання додаткового устаткування для виконання заготівельних операцій або застосування заготовки періодичного прокату, ускладнення операції очищення нагрітих заготовок від окалини.

Значної різниці в заповненні нижньої і верхньої порожнин штампа при штампуванні на пресі не спостерігається; менші швидкості деформації сприяють її поширенню на увесь об'єм заготовки. Основна різниця в заповненні рівчаків молотового і пресового штампів полягає в умовах утворення облою і у великій її температурі у разі штампування на пресі, оскільки час охолодження облою у цьому випадку значно менше. Поковки, що штампуються на молоті за один перехід, на пресі доцільно штампувати за два або декілька переходів.

Велике значення мають пружні деформації преса. Якщо штамп налагоджувати без навантаження, зблизивши верхню і нижню його частини на встановлений розрахунком розмір облою, при крайньому нижньому положенні повзуна, то величина поковки виходить більше на величину пружної деформації преса. Оскільки змикання частин штампа небезпечне з точки зо-

ру заклинювання преса, то пресові штампи повинні мати відкритий магазин облойної канавки.

Основними рекомендаціями при розробленні технологічного процесу штампування на пресах є такі:

1. Унаслідок великих труднощів виконання на пресі таких заготівельних операцій, як протягання і підкатка, ці операції рекомендується виконувати або на кувальних вальцях, або на спеціальних кувальних машинах, що встановлюються поряд з пресом.

2. При штампуванні поковок складної конфігурації бажано збільшувати кількість рівчаків для поступового наближення форми заготовки до форми поковки.

3. Заготовка не має бути покрита окалиною, яка може бути заштампована в поковку. Тому слід застосовувати спеціальні заходи щодо очищення від окалини або застосовувати безкисневе нагрівання.

4. Штампувальні ухили в штампах можуть бути зменшені до 2…3 ^{0} завдяки наявності у преса виштовхувачів.

5. Площину рознімання слід вибирати поблизу торця штампованої поковки в зоні ускладненої деформації, завдяки чому опір течії металу в цій області зростає, і заповнення порожнини штампа полегшується.

6. Заготовка для штампування має мати рівні торці й мінімальні відхилення від номінальної ваги.

7. Штампи не повинні змикатися на величину, яка дорівнює товщині облою, тому порожнину для нього виконують відкритою.

Завдяки відсутності ударів при штампуванні на кривошипних пресах замість цілісного штампа (як для молотів) застосовують складений штамп, що містить окремі вставки з відповідними рівчаками, що знижує витрату штампової сталі, полегшує виготовлення рівчаків і дозволяє робити штампування до повного зносу рівчака вставки.

Для отримання поковок точних розмірів штамповий простір преса повинен регулюватися по висоті. З цією метою преси забезпечені столом клинової конструкції. Наявність виштовхувача дозволяє змінити увесь технологічний процес, наприклад замінити складне поперечне штампування простішою подовжньою (торцевою).

При штампуванні на пресах повітря з глибоких порожнин штампа слід відводити через спеціальні вивідні отвори. Щоб уникнути затікання металу в ці отвори, їх діаметр не повинен перевищувати 2…3 мм. Радіуси закруглення в штампах вибирають з тих же міркувань, що і при використанні молотових штампів.

Штампування на гвинтових фрикційних пресах

Характерною особливістю гвинтових фрикційних пресів є поєднання в них ударної дії і статичного тиску, тому вони є машинами проміжного виду (між молотами і пресами).

Вільний хід фрикційних пресів, так само як і молотів, дозволяє деформувати метал у кожному рівчаку штампа за декілька ударів. Середні швидкості фрикційних пресів не приводять до значного зміцнення нагрітого металу, але забезпечують незначне його охолодження в період деформації. У цьому і полягає одна з переваг гвинтових фрикційних пресів.

Можливість регулювання величини ходу повзуна, а отже, і його енергії, відсутність заклинювання і наявність нижнього виштовхувача у цих пресів дозволяє штампувати поковки з малими ухилами різної конфігурації, вага яких досягає 20 кг.

Найбільшого поширення на фрикційних пресах отримало подовжнє штампування у відкритих штампах, але застосовують також і поперечне штампування, гнуття, штампування в закритих штампах, у тому числі й у рознімних, а також у штампах для витискування. Наявність великого робочого ходу у цих пресів дозволяє штампувати високі поковки.

Можливість використання нижнього виштовхувача значно розширює номенклатуру штампованих виробів і дозволяє працювати з невеликими штампувальними ухилами, а в рознімних по вертикалі матрицях – навіть без ухилів для порожнин, що потрапляють у площину рознімання.

Штампування на горизонтально-кувальній машині

На горизонтально-кувальній машині (ГКМ) можна штампувати поковки шестерень, клапанів, болтів, гайок, кілець, втулок, фланців, валиків з уступами і т. д. Крім того, на ГКМ можна виконувати заготівельні операції для подальшого штампування на іншому устаткуванні.

Штампування на ГКМ особливо доцільне в умовах великосерійного і масового виробництв. Початковою заготовкою для штампування на ГКМ є прокат у вигляді мірних заготовок або прутків круглого перерізу, а також труб.

Штампування на ГКМ має низку переваг: 1) можливість штампування в закритих штампах (без облою); 2) можливість штампування без штампувальних ухилів, що скорочує припуски і допуски на поковку; 3) можливість забезпечення в поковці найсприятливішого напрямку волокон макроструктури, що надає їй найбільшої міцності; 4) висока продуктивність; 5) можливість повної автоматизації технологічного процесу штампування.

Основною ознакою штампів ГКМ є наявність двох взаємно перпендикулярних площин рознімання. Головний рознім проходить між пуансоном і рознімною матрицею. На початку процесу пуансон і обидві половини матриці розімкнені. Пруток металу направляють у нерухому частину матриці до упора. Після цього в робоче положення встановлюють рухому частину матриці, що забезпечує щільний затиск прутка, після чого пуансон зштовхується з прутком металу. При подальшому русі пуансона висаджується вільна довжина прутка; при цьому заготовка заповнює порожнину рівчака. При зворотному ході машини штампувальник може вийняти із рівчака пру-

ток з висадженим кінцем. Такий порядок руху частин інструменту забезпечується кривошипною системою головного ходу і кулачковою системою бічного ходу машини.

Складання креслення поковки для штампування на ГКМ має свої специфічні особливості. Перед складанням креслення орієнтовно складають технологічний процес штампування, приблизно розраховують розміри заготовки.

Креслення поковки може складатися без напуску внаслідок наявності рознімних матриць (рис. 12.13, а).

При роботі на ГКМ можна здійснювати такі основні операції: 1) осаджування в торець і висаджування середини заготовки; 2) глибоке прошивання з роздачею металу в сторони; 3) наскрізне прошивання отворів; 4) гнуття; 5) відрізання відштампованої поковки від заготовки прутка. На ГКМ переважно виконують висаджувальні операції. Зазвичай штампування здійснюється за декілька переходів (у декількох рівчаках) з одного нагрівання, причому об'єм заготовки в усіх рівчаках залишається незмінним. Порожнини для формоутворення поковки можуть бути одночасно і в матриці, і в пуансоні або тільки в пуансоні і рідше тільки в матриці.

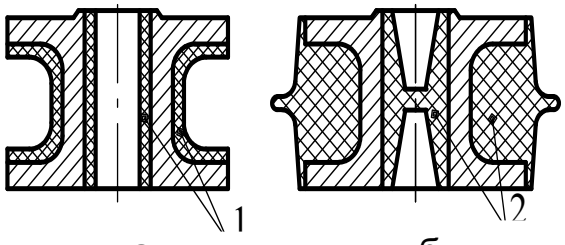


Рис. 12.13. Приклад складання креслення однієї і тієї ж поковки для штампування на ГКМ (а) і для штампування на молоті (б);
1 – припуск; 2 – напуск

Оскільки у більшості випадків на ГКМ штампування виконують від прутка, то при діаметрі прутка до 50…60 мм довжина його не має бути більше 2 м. Для прутків великих діаметрів довжина 2 м допускається тільки у разі наявності перед машиною піднімальних механізмів.

Проектування технологічного процесу штампування на ГКМ розпочинається передусім з вибору діаметра початкового прутка. Оскільки при роботі на цих машинах операцію витягування не здійснюють, то площа поперечного перерізу прутка має бути не більше мінімальної площі поперечного перерізу поковки. Набір металу прийнятніше здійснювати в порожнині пуансона 1 (рис. 12.14). При цьому менший діаметр конуса рекомендується приймати таким, що дорівнює діаметру початкового прутка.

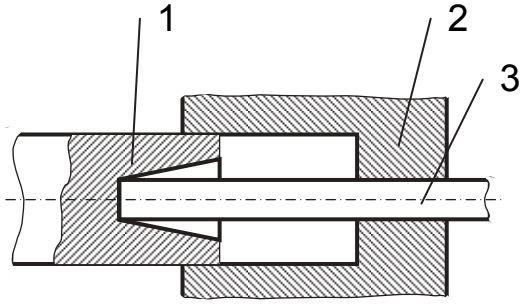


Рис. 12.14. Схема конструкції штампа при наборі металу в порожнині пуансона:
1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – пруток

Заготівельно-штампувальні роботи на кувальних вальцях

Вальцюванням називається протягання заготовки за схемою подовжнього плющення в секторних штампах на кувальних вальцях. З мірних заготовок круглого, квадратного або прямокутного перерізів вальцюванням виготовляють фасонні заготовки подовженої форми і зазвичай з прямою віссю. При цьому поздовжній і поперечний перерізи заготовок можуть мати складну форму. Вальцювання застосовують для виготовлення заготовок для подальшого штампування на КГШП. Вальцювання буває одноручкове і багаторучкове.

Кувальні вальці є закриті або консольні поздовжнього плющення зі змінюваними на вальцях зміщеними штампами у вигляді секторів або кілець. Заготовку подають на валки у момент розбіжності секторів штампа. При сходженні штампи захоплюють заготовку і затягують її в рівчак. Напрямок подання протилежний до напрямку руху заготовки при вальцюванні. Завдяки цьому заготовку можна утримувати в кліщах упродовж усього періоду вальцювання (рис. 12.15).

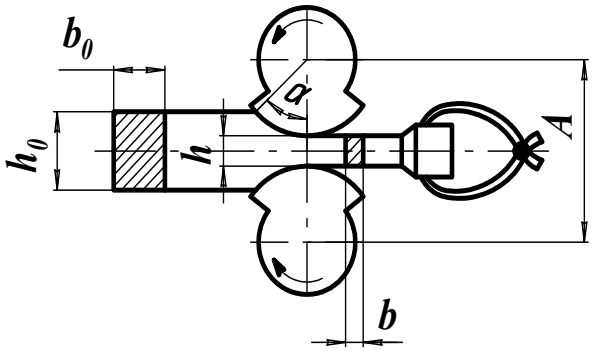


Рис. 12.15. Схема вальцювання: h_0, b_0, h, b – висота і ширина заготовки до і після вальцювання

Проміжок між верхнім і нижнім секторами штампів, а отже, і загальну глибину вальцювального рівчака можна регулювати, змінюючи відстань А між осями вальців. Вальці обертаються безперервно з частотою обертання 10…90 об/хв. Для існуючих вальців довжина оброблюваних виробів становить 250…125 мм при робочій ширині вальців до 355 мм і найбільшій товщині початкових заготовок до 125 мм.

Кувальні вальці, які працюють при багаторучковому вальцюванні, конструюють з кількістю пар вальців, яка дорівнює кількості проходів, а кожна пара вальців розташована відносно іншої під кутом 90^0. Заготовка під дією тягових кліщів рухається тільки в одному напрямку (див. рис. 12.15).

Штампувальні роботи на ротаційно-кувальних і радіально-кувальних машинах

Виготовлення поковок на ротаційно-кувальних машинах (редукування) подібне до операції витягування і полягає в місцевому обтисканні заготовки по її периметру. Редукування виконують у гарячому і холодному станах. Початковою заготовкою є прокат круглого і квадратного профілів або труба. Типовими поковками, що виготовляються редукуванням, є різного роду ступінчасті валики, конічні валики, труби з відтягнутими на конус кінцями і т. п.

Редукуванню в гарячому стані можуть піддаватися прутки діаметром до 150 мм і труби із зовнішнім діаметром до 300 мм. При виготовленні поковок редукуванням може бути досягнута точність у межах 0,1…0,3 мм. Холодне обтискання забезпечує отримання виробів з розмірами за 2-м класом точності і поверхнею за 7-м класом шорсткості без відходу металу і з продуктивністю приблизно в п'ять разів вище, ніж при токарній обробці.

Процеси редукування виконують на ротаційно-кувальних машинах, які мають декілька бойків, що здійснюють велику кількість ударів. Ці машини виконуються в двох варіантах – з обертовими і необертовими бойками.

На рис. 12.16 зображено схему ротаційно-кувальної машини з обертовими бойками. Заготовку 1 у вигляді прутка поміщають між бойками машини 2, що знаходяться в шпинделі 3. При обертанні шпинделя завдяки роликам 4, поміщених в обоймі 5, бойки 2 здійснюватимуть удари по заготовці 1. Кількість ударів залежить від швидкості обертання шпинделя, кількості роликів в обоймі і одночасно діючих пар бойків. У машині з необертовими бойками обертається обойма з роликами.

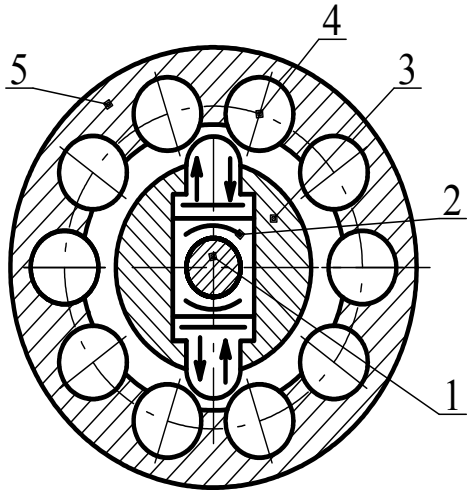


Рис. 12.16. Схема ротаційно-кувальної машини: 1 – заготовка; 2 – бойок; 3 – шпиндель; 4 – ролики; 5 – обойма

Розміри бойків визначаються розмірами гнізд для них у повзунах машини. Форма і розміри рівчака у бойках залежать від форми і розмірів початкової заготовки і готового виробу. При цьому враховують таке: 1) для вільного введення заготовки в рівчак вхідний контур його має перевищувати переріз заготовки; 2) форма рівчака має забезпечувати вільне видалення готового виробу з рівчака при безперервній роботі бойків; 3) якщо міра обтискання по діаметру на виході із рівчака більше 3 % від початкових поперечних розмірів заготовки, то крім звичайних закруглень на вході із рівчака необхідно передбачати ухили 7^{0}; з боку розніму між бойками проміжок – 0,25…1,5 мм; 4) найбільший кут конуса в рівчаку при редукуванні з ручним поданням не має перевищувати 16^{0}, а при машинному поданні – 20^{0}; в основному рельєф рівчака має відповідати формі й розмірам готового виробу; 5) при обробленні виробів з труб на оправці діаметр останньої має бути на 0,4…0,7 % менше внутрішнього діаметра готового виробу, а вільний передній кінець оправки зводиться на конус для легкого витягання її з отвору в готовому виробі.

Сучасні машини розраховані на зусилля 0,6…1,6 МН (60…160 тс) і виконують більше 420–600 обтисків у хвилину.

Тема 13. Імпульсне оброблення металів ударом твердого тіла

Удосконалення методів металообробки, у тому числі й об'ємного штампування, спрямоване передусім на те, щоб досягти виготовлення поковок, форма і розміри яких були б максимально наближені до форми і розмірів готових деталей, щоб звести до мінімуму механічне оброблення і, крім того, одержати максимальну економію металу, який нерідко є досить дорогим.

Один з напрямів вирішення цих завдань полягає у використанні високошвидкісного об'ємного штампування.

Застосування високошвидкісних машин дозволяє: 1) виготовляти поковки складної форми з тонкими стінками і ребрами і малими радіусами закруглень у кутах; 2) виготовляти поковки з важкодеформівних сплавів; 3) зменшувати припуски на подальше механічне оброблення; 4) отримувати поковки з високими механічними властивостями.

На високошвидкісних молотах успішно виготовляють поковки з алюмінієвих і мідних сплавів, різних сталей і високоміцних сплавів, включаючи тугоплавкі метали. Одна з основних трудностей, що виникають при гарячому штампуванні важкодеформівних сплавів, полягає в підтриманніі потрібної температури заготовки в процесі її оброблення. Ця обставина має особливо велике значення, коли доводиться штампувати деталі з тонкими стінками і ребрами, оскільки в цих місцях метал швидко остигає. По цьому такі деталі доцільно штампувати на високошвидкісних молотах, що дозволяють різко зменшити час оброблення.

Експериментальні дослідження показали, що збільшення швидкості деформації підвищує опір металу пластичному формозміненню при усіх мірах деформації. Припущення про те, що тепловий ефект, властивий адіабатичному процесу, що має місце при високошвидкісному штампуванні, не завжди підтверджується. Властивий високошвидкісному об'ємному штампуванню підвищений опір металу деформації обумовлює і більш високі величини енергії його формозмінення.

Гаряче об'ємне штампування на високошвидкісних молотах вигідне тим, що завдяки властивій йому швидкості деформації значно зменшується охолодження поверхневих шарів заготовки, що контактують зі штампом.

Безоблойне штампування на звичайних молотах за відсутності виштовхувачів і дозування енергії може дати порівняно невелику економію металу у разі використання поковок невеликої висоти. При штампуванні на високошвидкісних молотах з дозуванням енергії удару і наявністю виштовхувачів можливе широке застосування безоблойного методу з досягненням значного економічного ефекту.

Висока точність поковок, що отримуються на високошвидкісних молотах, обумовлюється головним чином великими деформувальними зусиллями, що діють дуже нетривалий час.

Величини питомої енергії удару, робочої площі штампа $h_э / F_ш$, що припадають на одиницю, у високошвидкісних молотів приблизно в п'ять разів більше питомої енергії удару звичайних штампувальних молотів. Цим обумовлюється можливість затікання металу в глибокі й вузькі порожнини штампа при малих радіусах закруглення. Практикою встановлено, що ефект затікання (відношення висоти *h* металу, що затікає в порожнину ребра, до ширини ребра *b*) при штампуванні на КГШП *h/b < 1,2*, на молотах простої дії *h/b > 2,0,* а на високошвидкісних молотах *h/b* ≤ 2.

Наявність у високошвидкісних молотів виштовхувачів дає можливість отримувати поковки без штампувальних ухилів або з ухилом менше 1^0 (замість $5…7^0$ при штампуванні на звичайних молотах).

При виготовленні поковок на високошвидкісних молотах величини допусків можуть бути зменшені більш ніж у три рази порівняно з допусками, що отримуються при штампуванні поковок на звичайних молотах. Чистота поверхні поковок відповідає 5–7-му квалітетам. Слід зазначити, що така висока точність і чистота поверхні поковок може бути досягнута тільки при безкисневому нагріванні заготовок.

Якість поковок в основному визначається їх мікро- і макроструктурою і залежить від температурно-швидкісного режиму їх оброблення. Якість поковок з вуглецевих сталей, що допускають оброблення в широкому температурному інтервалі та при невеликій мірі деформації $\varepsilon_{кр}$ = 0,03…0,06, може бути високою при будь-якому типі вживаного молота. Поковки з жароміцних сплавів навіть при порівняно невеликій різнозернистості, яка визначається відношенням розмірів максимального і мінімального зерен, бракуються. Різнозернистість може з'являтися при підвищених і знижених температурах, при цьому згідно з діаграмою рекристалізації цього сплаву відношення максимального і мінімального розмірів зерна досягає значної величини. Для отримання рівномірної структури необхідно, щоб міра деформації в усіх частинах штампованої деталі була більше критичних для цих температур. У більшості випадків проте при штампуванні на звичайних молотах міра деформації на торцях через вплив тертя і охолодження відповідають критичній зоні $\varepsilon_{кр}$ = 0,15…0,20. Наприклад, при штампуванні на молоті поковок з жароміцних сплавів максимальна міра деформації в середині деталі досягає 20…40 %, а біля поверхні – 0,5…5 %. Для високошвидкісних молотів характерне оброблення з високою мірою деформації, яке досягає 80 % і більше. При такій мірі деформації структура штампованих виробів характеризується хорошою якістю і невеликою різнозернистістю.

Найбільшу ефективність з точки зору ККД удару при мінімальному часі періоду інтенсивного охолодження штампа можна отримати, використовуючи одноударний метод штампування з високою мірою деформації, що властиве лише для високошвидкісних молотів одноударної дії, обладнаних пристроєм точного дозування енергії удару. При цьому сферою застосування високо-

швидкісних молотів є гаряче штампування за один удар тонких і оребрених поковок складної конфігурації з важкодеформівних сплавів.

Поковки, що отримують на високошвидкісних молотах, умовно можна поділити на сім груп:

1) поковки типу стрижнів з потовщеннями;

2) поковки з глухою або наскрізною порожниною;

3) поковки з поздовжнім або торцевим оребренням;

4) поковки типу дисків і полотен;

5) поковки з витягнутою віссю і несиметричні в плані;

6) поковки типу хрестовин з виводами;

7) поковки, що звужуються в середній частині (турбінні лопатки і подібні до них деталі).

Розроблення технологічних процесів високошвидкісного штампування поковок складається загалом з тих же етапів, що і розроблення технології штампування на звичайних молотах. Особливо ретельно призначається режим нагрівання. Сталі, титанові та нікелеві сплави перед штампуванням нагрівають у межах звичайного температурного інтервалу. При штампуванні простих деталей за один удар температуру нагрівання встановлюють ближче до нижньої межі, а при штампуванні деталей відносно складної конфігурації температуру призначають ближче до верхньої межі.

Заготовки із сталей, жароміцних сплавів і титанових сплавів рекомендується нагрівати в індукційних печах або печах з інертною атмосферою, а заготовки з алюмінієвих і магнієвих сплавів – в електричних печах опору з примусовою циркуляцією повітря. При штампуванні сталевих поковок з припусками на механічну оброблення допускається нагрівання заготовок у звичайних нагрівальних печах.

Перед початком роботи пуансон і матрицю рекомендується нагрівати до температури 180 °С. В умовах серійного виробництва така температура практично підтримується на такому рівні завдяки теплу, яке передається матриці й пуансону від нагрітих заготовок.

Окалина утворюється не лише при нагріванні заготовок, але й при охолодженні поковок після штампування. Оскільки на високошвидкісних молотах здійснюється точне штампування, процесу охолодження поковок приділяють особливу увагу. У дрібносерійному виробництві практикують засипати охолоджувані поковки сухим піском або вапном. При такому охолодженні окалиноутворення практично відсутнє.

Якість поковок, стійкість штампів і технологічні можливості високошвидкісного штампування значною мірою визначаються правильно підібраним технологічним мастилом.

Асортимент мастил, які вживаються при високошвидкісному штампуванні, різноманітний. Але найкращі результати із забезпечення максимально легкої течії металу при мінімально необхідному тиску гарантують графітові мастила.

За важких умов роботи як мастила застосовують дисульфідмолібден, але лише при температурі штампування нижче 650 ^{0}С.

Для алюмінієвих сплавів застосовують натуральний бджолиний віск або тваринний технічний жир; для сталей і титанових сплавів – суспензію колоїдного або лускатого графіту в олії (40 % за об'ємом графіту).

Стійкість штампів при високошвидкісному штампуванні зазвичай нижче, ніж при штампуванні на звичайному устаткуванні, що пояснюється їх посиленим спрацюванням, деформацією і руйнуванням під впливом високих швидкостей удару, тисків і температури. Тому однією з найбільш важливих проблем високошвидкісного штампування є вибір марки і режимів термообробки сталі для виготовлення штампового оснащення. Придатність сталі для роботи в умовах високошвидкісного штампування оцінюють за її міцнісними властивостями і чутливістю до крихкого руйнування.

Для вибору марки сталі при виготовленні штампового оснащення використовують експериментальний матеріал, накопичений при дослідженні технології високошвидкісного штампування. Наприклад, при штампуванні дискових фрез з інструментальної сталі Р18 найбільш високу стійкість показали матриці і пуансони, виготовлені з титанових сталей марок 4Х5В2ФС і 4Х4М2ВФС і термооброблені на твердість HRC 48–51. Головною причиною виходу з ладу деталей штампів, виготовлених з цих сталей, є знос і зминання формувальних кромок унаслідок високих питомих тисків і великих швидкостей течії металу.

Різання металу

Розкрій холодного і гарячого металу – одна з найпоширеніших операцій на металургійних і машинобудівних підприємствах. Традиційно вживають методи різання, пов'язані зі значними відходами металу.

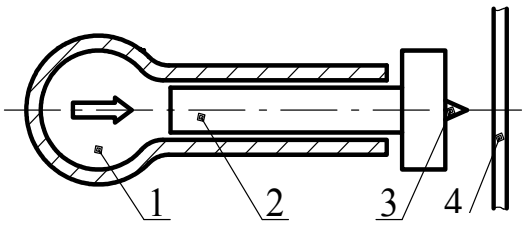


Рис. 13.1. Схема імпульсної різання металу: 1 – камера енергоносія, 2 – шток; 3 – ніж; 4 – заготовка

У Проблемній лабораторії Харківського авіаційного інституту під керівництвом проф. В. Г. Кононенка був розроблений метод імпульсного різання металу. Машини для імпульсного різання металу дозволяють різати будь-які високоміцні сталі з мінімальними відходами.

Суть процесу полягає в розділенні металу ударом профільованого ножа або зустрічним ударом двох ножів, що розганяться до певної швидкості імпульсним джерелом енергії. Принципову схему імпульсного різання подано на рис. 13.1.

У результаті згоряння енергоносія в камері 1 утворюється високий тиск, під дією якого приводиться в рух шток 2 із закріпленим на ньому ножем 3, що здійснює швидкісне рубання поміщеної на його шляху заготовки 4.

Тривалість процесу розділення металу не перевищує сотих часток секунди, а швидкість руху ножа у момент зіткнення з металом, що розрізає, досягає декількох десятків метрів за секунду.

Як енергоносій у машинах для імпульсного різання застосовують тверді, рідкі й газоподібні речовини: порох, бензоповітряні суміші, суміші природного газу і повітря.

Принцип розділення металу ударом жорсткого інструменту використовують також в установках для різання холодного профільного прокату і труб.

Пробивання отворів і клепання

Пробивання здійснюється із застосуванням автономних переносних пристроїв, в яких робочий інструмент (пуансон) розганяється до високих швидкостей за допомогою імпульсного джерела енергії (зазвичай пороху).

Використання цього методу особливо ефективне в тих випадках, коли підходи до конструкції, в якій необхідно виконати отвір, ускладнені, а також коли використання звичайного інструменту неможливе через високу міцність оброблюваного металу або відсутність необхідних джерел енергії (наприклад, у польових умовах).

Метод імпульсного пробивання ударом жорсткого пуансона дозволяє отримувати отвори діаметром до 25 мм у товстостінних деталях, листовому і профільному прокаті, в трубах та інших виробах з високоміцних матеріалів. У Проблемній лабораторії Харківського авіаційного інституту розроблено декілька таких пристроїв. В одному з таких пристроїв при згорянні пороху біля 2 г пуансон масою до 1 кг розвиває енергію, еквівалентну роботі 75-тонного преса.

Пуансони і матриці, які використовуються при імпульсному пробиванні отворів, виготовляють зі сталей марок У8 або 60СГ, термооброблених до твердості HRC 55 – 58.

При пробиванні отворів діаметром більше товщини листа стійкість інструменту досить висока і досягає декількох тисяч разів. Пробивання ж отворів, діаметр яких менше товщини пробиваного металу, іноді призводить до прискореного спрацювання і руйнування інструменту.

Значну кількість конструкцій у різних галузях машинобудування з'єднують за допомогою заклепок, діаметр яких іноді перевищує 20 мм.

Імпульсне клепання полягає в деформації стрижня заклепки ударом металевого бойка, що розганяється до високої швидкості. Виконують цю операцію зазвичай за допомогою переносних пристроїв (молотків, пістолетів) на по-

роховому енергоносії, що мають велику потужність при порівняно малих габаритах і масі.

Основними частинами пристроїв для імпульсного клепання є ствол, бойок і камера згоряння. Під дією тиску порохових газів бойок, розташований у стволі, розганяється до високої швидкості, яка у момент зіткнення із заклепкою досягає десятків метрів в секунду. Величина заряду пороху визначається потрібною роботою деформації заклепки, типом пристрою, маркою пороху і умовами заряджання.

Пристрій для холодного імпульсного клепання заклепок великого діаметра аналогічне імпульсному пристрою для пробивання отворів; він може бути виконаний у вигляді скоби, яка дозволяє усунути віддачу в момент удару.

Аналіз міцності на статичний зріз показав перевагу з'єднань, отриманих імпульсним методом, що пояснюється більш рівномірним заповненням отвору стрижнем заклепки.

Випробування також показали, що заклепочні з'єднання, отримані імпульсним клепанням, витримують до руйнування в 1,5 – 1,17 рази більше повторно-статичних вантажень, ніж пакети, отримані звичайним клепанням.

Брикетування металевої стружки

При механічній обробці металу на машинобудівних підприємствах щорічно утворюються тисячі тонн відходів у вигляді стружки, у тому числі з дорогих кольорових металів і сплавів. Транспортування і зберігання витої стружки неекономічне, а її переплавка супроводжується дуже великими втратами на чад. Тому зібрану стружку необхідно брикетувати, що традиційно здійснюється на гідравлічних пресах і молотах. Але отримувані таким чином брикети мають невисоку щільність і міцність, що призводить до їх руйнування при зберіганні і транспортуванні, а також до значного чаду при переплавці.

Метод імпульсного брикетування металевої стружки, розроблений співробітниками Проблемної лабораторії Харківського авіаційного інституту під керівництвом проф. В. Г. Кононенка, дозволяє отримувати брикети підвищеної щільності й міцності із стружки різних металів. Схему імпульсного брикетування подано на рис. 13.2.

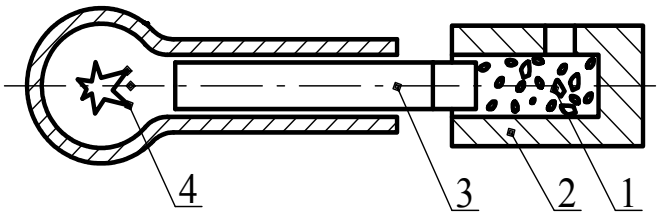


Рис. 13.2. Схема імпульсного брикетування стружки: 1 – стружка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – робоча камера

Суть методу імпульсного брикетування полягає в пресуванні стружки 1, розташованої в контейнері 2, ударом пуансона 3, що розганяється до високої швидкості за допомогою вибуху або згоряння газової суміші, які здійснюються в робочій камері 4.

Тема 14. Видавлювання

Видавлювання являє собою один із способів обробки металів тиском, що полягає у витісненні металу із замкненої порожнини через отвір матриці, що відповідає перерізу видавлюваного профілю (рис. 14.1).

Заготовка 2 (в холодному або гарячому стані), розміщена в контейнері 1, видавлюється пуансоном 4 через отвір матриці 3, утворюючи виріб 5.

Пресуванням можна виготовляти профілі такої складної форми, яка не може бути отримана іншими способами. Навіть при виробництві простих профілів пресування нерідко виявляється більш економічним технологічним процесом порівняно з прокаткою, а отримання складних профілів виявляється більш економічним, ніж відливання або штампування з наступною механічною обробкою.

Точність пресованих виробів виходить вищою, ніж при прокатці, що дає можливість звести до мінімуму подальшу механічну обробку.

Пресування відбувається за схемою всебічного нерівномірного стиснення, що сприятливо позначається на пластичності пресованого металу. Ця обставина дає можливість піддавати пресуванню найрізноманітніші матеріали, включаючи і важкодеформівні.

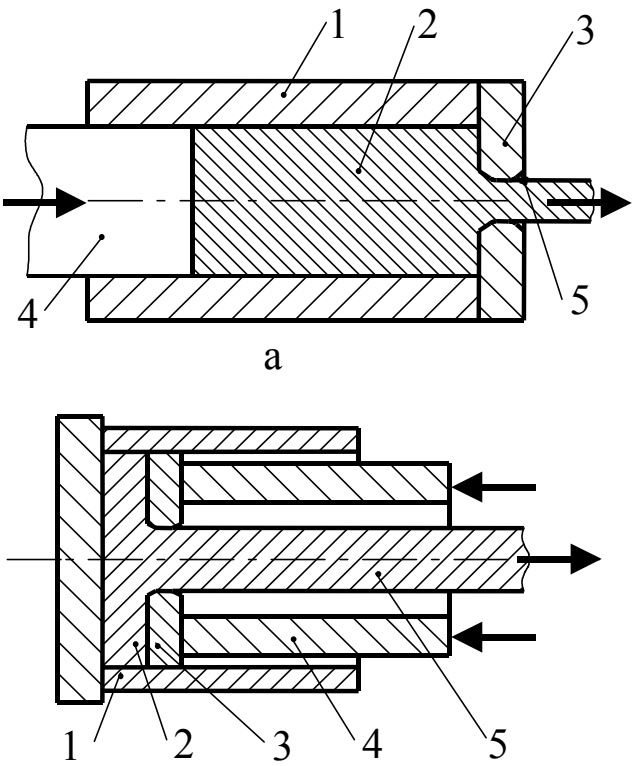


Рис. 14.1. Схема прямого (а) і зворотного (б) методів пресування: 1 – контейнер; 2 – заготовка; 3 – матриця; 4 – пуансон; 5 – виріб

Останнім часом пресуванням успішно обробляють спеціальні сталі, титанові й магнієві сплави, а також інші малопластичні матеріали, що є однією з основних переваг пресування порівняно з іншими способами обробки металів тиском. Пресування відрізняється також великою гнучкістю технологічного процесу при отриманні різних профілів: заміна матриці дозволяє перейти від виготовлення одного профілю до іншого. При цьому змінення інструменту при пресуванні значно простіше порівняно зі зміненням валків при прокатці.

Найбільшого поширення в промисловості набули методи прямого (див. рис. 14.1, а) і зворотного (див. рис. 14.1, б)

пресування.

Прямий метод застосовують для виготовлення труб, прутків, профілів, він полягає в тому, що протягування металу через отвір матриці і рух тиснуть на заготовку пуансона і відбуваються в одному напрямку.

Зворотний метод застосовують для виготовлення прутків, профілів, іноді для виготовлення труб великого діаметра, він характеризується тим, що рух пуансона з матрицею і протягування металу відбуваються в протилежних напрямках, тобто назустріч один одному. Оскільки при прямому методі пресування заготовка переміщується всередині контейнера, а при зворотному – залишається нерухомою, то в другому випадку внаслідок зменшення тертя зусилля пресування менше.

Оскільки пресування відбувається зі значними ступенями деформації, то для здійснення цього процесу машини мають розвивати великі зусилля. Найбільш прийнятним обладнанням є гідравлічні преси, які залежно від виду продукції пресування бувають горизонтальними і вертикальними. Для пресування використовують преси із зусиллям від 3,0 до 250 МН (300...2500 тс). Конструкція гідравлічних пресів для пресування принципово не відрізняється від конструкції кувальних гідропресів.

Величини, що характеризують деформацію при пресуванні

Основними величинами, що характеризують деформацію при пресуванні, є коефіцієнт (або ступінь) витяжки і ступінь деформації (або ступінь обтиску).

Коефіцієнт витяжки є відношенням площі перерізу контейнера F_0 до площі перерізу отвору F_1 матриці (або всіх отворів F_1) і виражається формулою

$$\mu = \frac{F_0}{\sum F_1}. \qquad (14.1)$$

Ступінь деформації – це відношення різниці між площею перерізу контейнера $\boldsymbol{F_0}$ і площею перерізу отвору $\boldsymbol{F_1}$ матриці (або всіх отворів $\boldsymbol{\sum F_1}$) до площі перерізу контейнера і виражається формулою

$$u = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100\ \%. \qquad (14.2)$$

Ступінь деформації значно впливає на характер течії металу і зусилля пресування.

Прокатку, гаряче штампування та інші способи обробки металів тиском ніколи не проводять з таким високим ступенем деформації, як пресування, при якому ступінь деформації в середньому становить 90 %, а в деяких випадках і вище.

Характер течії металу і енергосилові параметри процесу пресування

Характер течії металу при обробці тиском – це послідовність переміщення окремих ділянок оброблюваної заготовки по її перерізу і довжині.

Від інших методів обробки тиском пресування відрізняється швидкістю течії металу на початку і в кінці процесу. Розмір області осередку деформації не завжди однаковий; іноді осередок деформації зосереджений поблизу матриці, іноді поширюється на більший об'єм металу, а іноді і на всю заготовку, що знаходиться в контейнері.

При пресуванні течія металу нерівномірна, вона полягає у більш інтенсивному витіканні середніх шарів заготовки порівняно з зовнішніми, що призводить до утворення у задній частині пресованого виробу нещільності, яка називається прес-утяжкою.

На характер течії металу, а отже, і на прес-утяжки впливають контактне тертя, температура металу і контейнера, стан поверхні і матриці, довжина заготовки, профіль матриці, мастило і швидкість пресування.

Експериментальні дослідження показали, що осередок деформації при пресуванні може бути трьох видів (рис. 14.2).

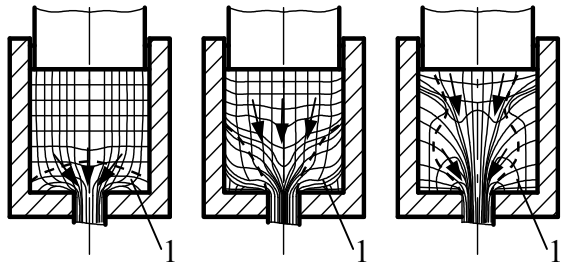


Рис. 14.2. Види осередку деформації при пресуванні і характер течії металу

Перший вид осередку деформації (див. рис. 14.2, а), зосередженого поблизу матриці, відповідає малому коефіцієнту тертя (0,1 – 0,2), високій якості поверхні стінок контейнера, хорошому мастилу і відсутності перепаду температури між стінкою контейнера і поверхнею заготовки. При такому осередку забезпечуються найбільша рівномірність течії металу, більш рівномірні по перерізу виробу механічні властивості та менший відхід у вигляді прес-утяжки.

При другому виді осередку деформації (див. рис. 14.2, б) вона поширюється на всю заготовку, а уздовж її внутрішніх шарів відбувається швидше зовнішніх. Такий осередок деформації має місце при середніх коефіцієнтах тертя (0,2...0,4) і за наявності деякої різниці в температурах поверхні заготовки і стінок контейнера.

Третій вид осередку деформації (див. рис. 14.2, в) відповідає високим значенням коефіцієнта тертя (0,4 – 0,5) і значній різниці в температурах поверхні заготовки і стінок контейнера. При такому виді осередку деформації нерівномірність течії металу буде найбільшою, причому в області заготовки, що примикає до пуансона, спостерігається найменша деформація.

Зворотному пресуванню зазвичай відповідає перший вид осередку деформації, оскільки при цьому способі заготовка незначно переміщується в контейнері, тому втрати на тертя будуть мінімальними. Необхідно зазначити, що якщо в матриці або контейнері немає конічного заходу в напрямку отвору, то в кутах утворюються зони застою металу, які абсолютно не деформуються (див. рис. 14.2, зона 1). Для виключення цього явища зазвичай застосовують матриці, які мають заходну частину у вигляді конуса з центральним кутом 110...130 °.

Швидкість течії металу при пресуванні може досягати великих значень; при зменшенні температури швидкість також має знижуватися, щоб уникнути розтріскування виробу при виході його з матриці. Наприклад, при пресуванні мідних труб допускається швидкість течії при температурі заготовки 800...850 °С, яка становить 5 м/с, а при температурі 550 °С – близько 2 м/с. Метали і сплави з малою швидкістю рекристалізації мають деформуватися з малою швидкістю течії.

Зусилля пресування визначають за виразом

$$P = qF_0 , \qquad (14.3)$$

де q – питомий тиск течії;

F_0 – площа поперечного перерізу контейнера.

Для випадку пресування прутків з циліндричного контейнера через матрицю, що має конічну заходну частину і циліндричну вихідну частину, питомий тиск течії можна обчислити за формулою Є. П. Унксова

$$q = \sigma_т \left(\frac{2L_0}{D_0} + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{F_0}{F_1} + \frac{4fa}{D} \right), \qquad (14.4)$$

де σ_m – границя текучості матеріалу при температурі пресування; визначається при лінійному розтягуванні;

L_0, D_0 – довжина і діаметр заготовки;

α – центральний кут конусності матриці в радіанах;

F_0, F_1 – площі поперечного перерізу заготовки і вихідного отвору матриці;

a, D – довжина і діаметр вихідної циліндричної ділянки матриці.

Діаметр вихідної заготовки визначають за формулою

$$D_0 = 2\sqrt{\frac{\mu F_1}{\pi}}, \qquad (14.5)$$

де μ – коефіцієнт витягування;

F_1 – площа поперечного перерізу заготовки.

Діаметр контейнера беруть на 5...10 мм більше діаметра заготовки при пресуванні на горизонтальних пресах і на 1...2 мм більше при пресуванні на вертикальних. Довжину заготовки визначають виходячи з допустимого ступеня деформації, діаметра контейнера і ходу плунжера преса.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Семенов, Е. И. Ковка и штамповка : справ. В 4 т. / под общ. ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 492 с.

Сторожев, М. В. Ковка и объемная штамповка стали : справ. В 2 т. / под общ. ред. М. В. Сторожева. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 1. – 436 с.

Сторожев, М. В. Ковка и объемная штамповка стали : справ. В 2 т. / под общ. ред. М. В. Сторожева. – М. : Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 448 с.

Евстратов, В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков: Вища шк., 1981. – 248 с.

Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский [и др.]. – М. : Металлургиздат, 1963. – 672 с.

Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности) / Г. Я. Гун. – М. : Металлургия, 1980. – 456 с.

Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – 2-е изд. – М. : Техника, 1978. – 278 с.

Томлѐнов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томлѐнов. – М. : Металлургия, 1972. – 480 с.

Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – М. : Машгиз, 1981. – 464 с.

Алексеев, Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1958. – 188 с.

Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.

Дель, Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.

Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 485 с.

Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич : пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 365 с.

Еременко, С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел / С. Ю. Еременко. – Харьков : Основа, 1991. – 372 с.

Исаченков, Е. И. Контактное трение и смазка в обработке металлов давлением / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1978. – 208 с.

Смирнов-Аляев, Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 360 с.

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ…….. ……....3
Модуль 1. ТЕОРІЯ ПЛАСТИЧНОСТІ……..…….5
Тема 1. Вступ до дисципліни «Технології конструкційних матеріалів».
Діаграми напруження – деформації ……... …….....5
Тензор і девіатор напружень, їх інваріанти…….....9
Октаедричне напруження, інтенсивність напружень……..13
Тензор і девіатор деформацій, їх інваріанти……..…..16
Тема 2. Діаграми розтягнення……19
Ефект Баушингера……...….22
Дійсні діаграми розтягнення матеріалів……..……23
Тема 3. Умови пластичності..……..26
Тема 4. Фізичні основи теорії пластичності. Деформаційні теорії
та теорії течії ……..29
Закон збереження маси……..……...30
Рівняння нерозривності…….31
Рівняння кількості руху. Рівняння руху та рівноваги……32
Рівняння припливу тепла. Перший закон термодинаміки……..35
Рівняння теплопровідності……37
Другий закон термодинаміки. Ентропія……..39
Фундаментальні рівняння механіки суцільних середовищ……....41
Розвантаження матеріалу після пластичної деформації. Теорема
Ільюшина про розвантаження. Деформаційна теорія пластичності...42
Основи теорії малих пружно-пластичних деформацій.……..44
Тема 5. Наближені методи розв’язання задач пластичного деформування…49
Теорема Клапейрона…….51
Принцип мінімуму повної енергії…….52
Принцип можливих змінень напруженого стану. Принцип мінімуму
додаткової роботи……..54
Теорема Кастильяно…….……57
Фізичні закономірності теорії течії……...59
Коефіцієнт жорсткості…….....62
Початкові та граничні умови. ……...…….....63
Рівняння пластичної течії……..64
Схеми розв’язання задач пластичної течії для статичного
та динамічного навантажень……67
Метод ліній ковзання……..69
МСЕ в задачах пластичного деформування. Метод скінченних
елементов…….73
Основи алгоритму МСЕ……..……75
Метод верхнього оцінювання……...76
Модуль 2. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ……..……82
Тема 6. Роль обробки металів тиском (ОМТ) та класифікація методів ОМТ...82

Тема 7. Підготовка металу до ОМТ. Структура технологічних процесів ОМТ.88
Сталеві заготовки для кування і об'ємного штампування……..89
Оброблення початкових матеріалів для заготовок…….90
Тема 8. Нагрівання металу перед ОМТ……95
Тема 9. Устаткування для пластичної обробки. Класифікація ковальсько-пресового устаткування……103
Пароповітряні молоти……..104
Молот простої дії……...105
Пневматичні молоти……....107
Молоти з механічним приводом……....108
Гідравлічні преси……...109
Кривошипні машини……....111
Спеціальні машини……...113
Гідростати і гідростатичні преси…….....116
Безшаботні молоти……..……117
Тема 10. Технологічні процеси кування……117
Тема 11. Розроблення технологічних процесів кування……123
Складання креслення поковки……...123
Розрахунок розмірів і ваги заготовки……126
Вибір ковальських операцій та інструменту……127
Вибір печі для нагрівання. Встановлення режимів нагрівання, охолодження і проміжної термообробки…….128
Вибір кувального устаткування і визначення його потужності……128
Визначення складу ковальської бригади……....130
Тема 12. Технологічні процеси об'ємного штампування……130
Проектування об'ємноштампованої поковки. Етапи розроблення креслення поковки…….....135
Проектування молотового штампа……..….141
Багаторівчакове об'ємне штампування……144
Завершальні операції об'ємного штампування……..149
Термічна обробка поковок…….…….151
Очищення поверхні поковок……...151
Правка і калібрування поковок……...153
Контроль якості поковок……..……155
Штампування на КГШП і спеціалізованому устаткуванні…….....155
Штампування на гвинтових фрикційних пресах…….157
Штампування на горизонтально-кувальній машині……...158
Заготівельно-штампувальні роботи на кувальних вальцях……....160
Штампувальні роботи на ротаційно-кувальнихі радіально-кувальних машинах…….160
Тема 13. Імпульсне оброблення металів ударом твердого тіла……...162
Різання металу……..165

Пробивання отворів і клепання……...166
Брикетування металевої стружки……167
Тема 14. Видавлювання……168
Величини, що характеризують деформацію при пресуванні……169
Характер течії металу і енергосилові параметри процесу пресування……..170
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК…… .172

Навчальне видання

Бичков Ігор Валерійович
Борисевич Володимир Володимирович
Застела Олександр Миколайович

ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2020
Підписано до друку 30.12.2020
Формат 60×84 1/16. Папір офс. Офс. друк
Ум. друк. арк. 9,8. Обл.-вид. арк.11.Наклад 100 пр.
Замовлення 318. Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
http://www.khai.edu
Видавничий центр "ХАІ"
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001