

4 СИЛА І НАПРУЖЕННЯ ПРИ КУВАННІ ЗАГОТОВОК

4.1 Теоретичний вступ

Сила при осаджуванні циліндричної заготовки

Осадка є найбільш характерною операцією кування, коли одночасно увесь об'єм металу піддається пластичній деформації. Один із способів визначення зовнішнього нормального контактного напруження при осаджуванні зводиться до знаходження залежності між внутрішніми головними напруженнями σ_1 , σ_2 , і σ_3 з фізичними характеристиками матеріалу (напруженням течії металу при деформації) і коефіцієнтом (показником) тертя f (f_{Π}), а також розмірами поковки на даній стадії осадки (рис. 4.1) [2].

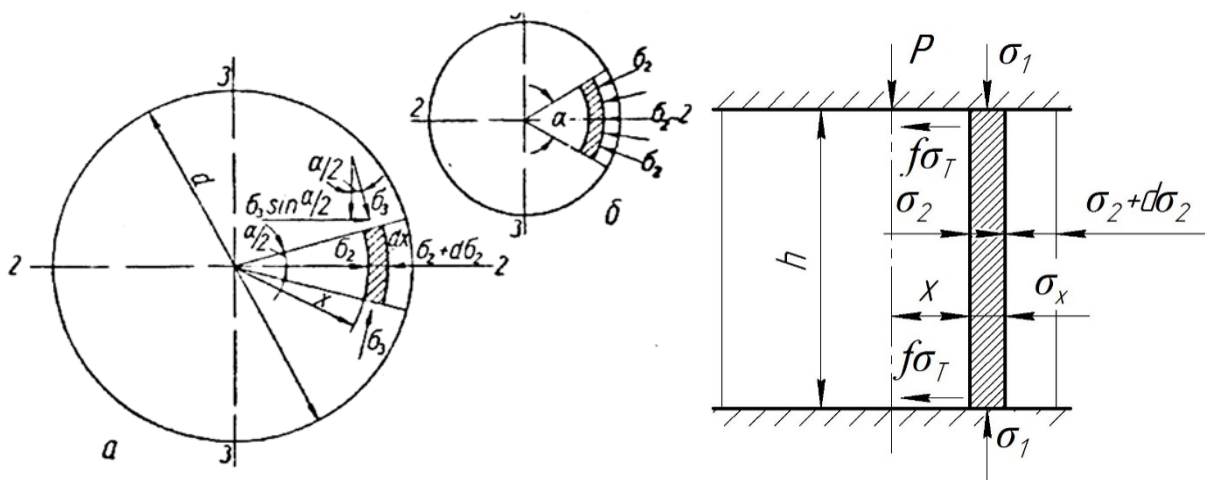


Рисунок 4.1 - Схема сил, діючих при осаджуванні циліндричної заготовки

Вказана залежність визначається, наприклад, з рішення диференціального рівняння рівноваги усіх сил, діючих на будь який виділений елемент поковки, спільно з рівнянням пластичності. Рішення диференціального рівняння наводиться в роботах С.Н. Петрова, Л. Прандтля, Е. Зібеля. Розглянемо рішення Е. Зібеля.

Визначимо контактне нормальне напруження металу при осаджуванні плоскими бойками циліндричної форми. Виділимо елементарний шар металу завтовшки dx , і заввишки h на відстані x від центру зразка (рис. 4.1). На цей шар металу діють наступні напруження: (σ_1 - головне нормальне контактне напруження (перпендикулярно торцю зразка); $\sigma_2 + \sigma_2$ - головне нормальне поперечне напруження (перпендикулярно бічній поверхні зразка) із зовнішнього боку; σ_2 - те ж саме з внутрішнього боку; σ_3 - головне нормальне напруження, яке діє по окружності контакту; α - нескінченно малий кут.

Вплив контактних сил тертя відображено напруженням $\tau = f_{\Pi} \cdot \sigma_T$, (умова тертя Е. Зібеля), діючим на контакті у напрямі центру зразка. Прийнято, що на бічній грані зразка при $x = d/2 = a$ напруження $\sigma_2 = 0$, а в центрі зразка завдяки

впливу зовнішніх сил тертя σ_T має максимальне значення (рис. 4.1).

Середнє нормальне контактне напруження (СНКН) з умов тертя $\tau = f_{\Pi} \cdot \sigma_T$, визначають (Е. Зібель).

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + 0,33 \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right). \quad (4.1)$$

Є.П. Унксов вирішив задачу розрахунку СНКН з використанням рівнянь рівноваги напружень і пластичності. Так, для осаджування циліндричної заготовки за наявності на контакті тільки зон ковзання і умови тертя Γ . Амонтона ($\tau = f \cdot p_{cp}$) отримано наступне рівняння

$$p_{cp} = 2 \cdot \sigma_T \cdot \frac{h^2}{f^2 \cdot d^2} \cdot \left(e^{\frac{f \cdot d}{h}} - \frac{f \cdot d}{h} - 1\right). \quad (4.2)$$

Формула (1.2) може бути використана в широкому діапазоні зміни відношення d/h і коефіцієнта тертя f .

У разі, якщо при осаджуванні циліндричної заготовки на контакті з інструментом прийняти умови тертя Е. Зібеля, то із загальної формули Є.П. Унксов отримав простішу формулу для розрахунку СНКН у вигляді

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + 0,25 \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right). \quad (4.3)$$

Формули (4.2) і (4.3) для осаджування циліндричної заготовки при правильному визначенні f і f_{Π} , тобто якщо вони відповідають фактичним умовам контактного тертя, можуть бути використані для аналізу параметрів осадки в плоских бойках.

Розрахунок параметрів при ковальському витяганні

Витягання при куванні (рис. 4.2, г) є операцією, за допомогою якої збільшується довжина заготовки за рахунок зменшення її поперечного перерізу. Витягання в загальному випадку здійснюється шляхом послідовного обтиснення заготовки її кантуванням після кожного проходу (після проходу усієї довжини). Два обтиснення з кантуванням заготовки між ними називають переходом. На кожному обтисненні процес витягання прямокутного бруса можна представити як послідовне осаджування окремих ділянок заготовки по її довжині. При цьому до осаджуваної ділянки примикають з обох кінців ділянки заготовки, які знаходяться поза дією бойка і, будучи зовнішніми зонами, стримують течію металу в поперечному напрямку, тим самим, зменшуючи розширення.

Без урахування цього впливу зовнішніх зон, коефіцієнт розширення і абсолютне середнє значення ширини поковки можна визначити за формулою (4.4) при $tg\theta = 1$

$$\beta_y = \frac{1/\eta}{\sqrt{1+B \cdot tg\theta \cdot (1/\eta - 1)/a}}; \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{\beta_y}, \quad (4.5)$$

де B - ширина заготовки; a - довжина бойка; $1/\eta = H/h$ - коефіцієнт обтиснення; λ - коефіцієнт подовження; β_y - коефіцієнт розширення.

При ковальському витяганні для розрахунку нормального напруження використовують формулу С.І. Губкіна, яка отримана за умови максимального впливу тертя ($\tau = \tau_s = 0,5 \cdot \sigma_\phi = 0,5 \cdot \lambda \cdot \sigma_T$). Оскільки в практиці можливо $b < a$, то формулу С.І. Губкіна можна записати у вигляді

$$p_{cp} = \beta \cdot \sigma_T \cdot \left(1 + \frac{1-m/3 \cdot n}{4} \cdot \frac{m}{h}\right). \quad (4.6)$$

Якщо $b < a$, то $m = b$ і $n = a$; якщо $b > a$, то $m = a$ і $n = b$.

Сили при гарячій деформації у відкритих штампах

Деформацію в штампах використовують для отримання практично готових заготовок для подальшого отримання деталей складної форми (шестерні, лопатки для авіадвигунів, осі для автомобілів, приналежності для побутових приладів, тощо). Основний недолік штампування - висока вартість інструменту - штамів, особливо для остаточного доведення розмірів, де застосовують ручну працю. Технологічний процес штампування передбачає різання прокату на заготовки, їх нагрів, власне штампування, обрізання задирок (обля), правку виробу, термічну обробку, видалення окалини, холодне калібрування (карбування) і контроль якості.

При об'ємному гарячому штампуванні нагріту заготовку поміщають в порожнину однієї частини штампу і під дією іншої частини штампу роблять деформацію, в процесі якої метал заповнює порожнину, набуваючи її форму (рис. 4.3).

Розрізняють два види штампування: у штампах відкритого типу (штампування із задиркою) і в штампах закритого типу. При відкритому, найбільш поширеному, штампуванні метал, що деформується, не лише заповнює порожнину, але і тече в роз'єм між верхнім і нижнім штампами, утворюючи задирку і обля (рис. 4.3). При закритому штампуванні метал деформується в замкнутій порожнині штампу з незначною, у ряді випадків, задиркою при затіканні металу в роз'єм між частинами штампу (рис. 4.3). Для витягання деталі після деформації нижні штампи мають вертикальні роз'єми.

В процесі найбільш поширеного відкритого штампування на кінцевій стадії використовують чорновий і чистовий штампи. Чистовий штамп за формою точно відповідає поковці, розміри його перевищують розміри поковки на значення усадки при охолодженні. Навколо чистового мостика розташована канавка для обля. Чорнові штампи застосовують з метою виконання основної пластичної деформації. Вони відрізняються від чистового відсутністю канавки для обля, великими глибиною, ухілами і радіусами закруглень, меншою шириною.

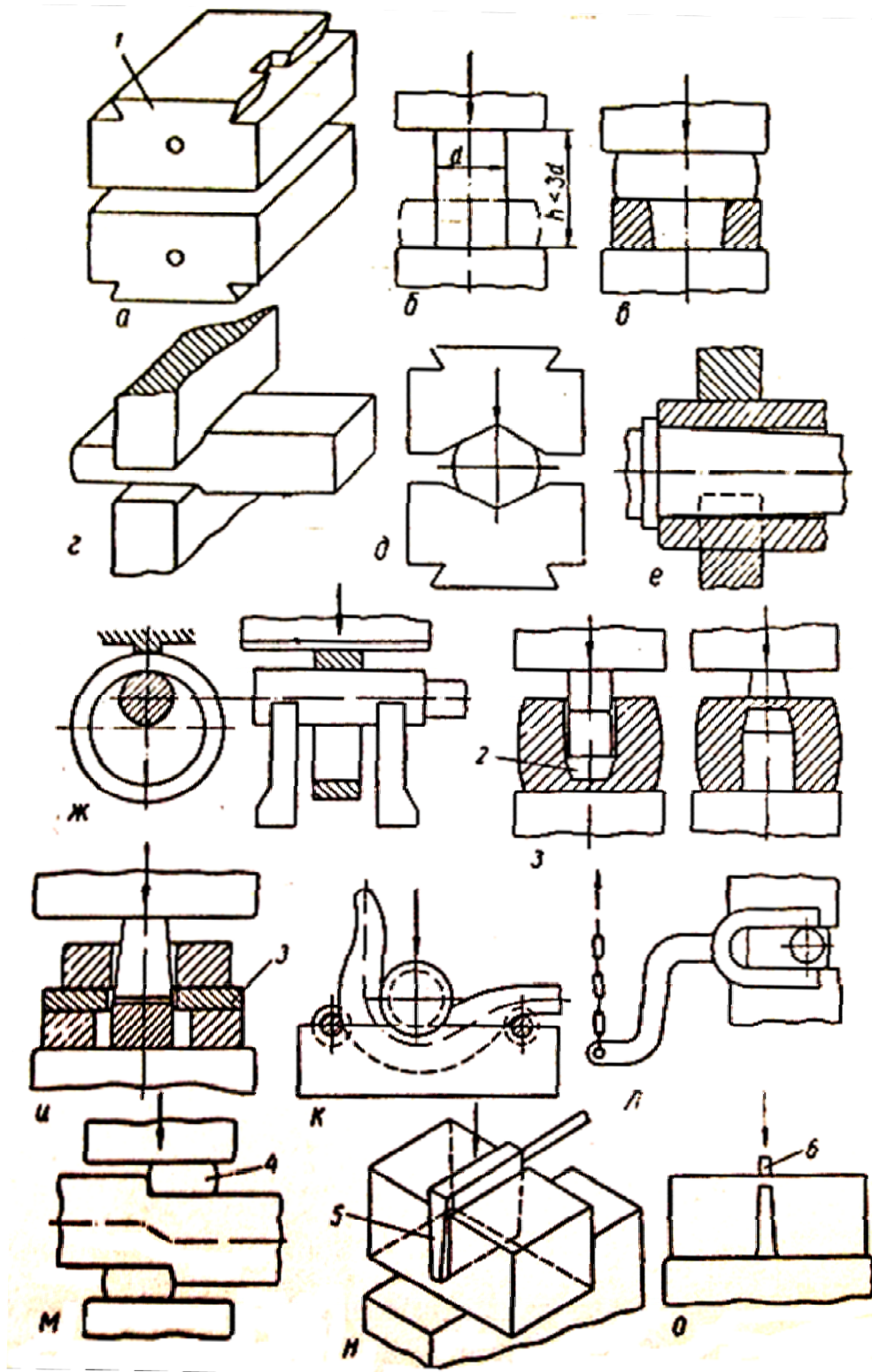


Рисунок 4.2 - Схеми виконання основних операцій вільного кування: а - бойки; б - осадка; в - висадка; г - витягання плоскими бойками; д- витягання фасонними бойками; е - витягання за допомогою оправки; ж - роздача на оправці; з - прошивка; и - прошивка на підкладному кільці; к - гнучка; л - закручування; м - передача; н - рубка; о - закінчення рубки відсіченням.

У перший період штампування в чорновому штампі порожнина штампу заповнюється і одночасно витікає метал в задирку, в другий період (чистовий штамп) відбувається тільки витікання металу в задирку з утворенням облоя (надлишку металу), наявного в заготовці порівняно з готовою поковкою. Для розрахунку сили при гарячому відкритому штампуванні металу відомі декілька теоретичних методів, у яких повну силу деформації визначають, як суму складових сил на окремих елементах штампу.

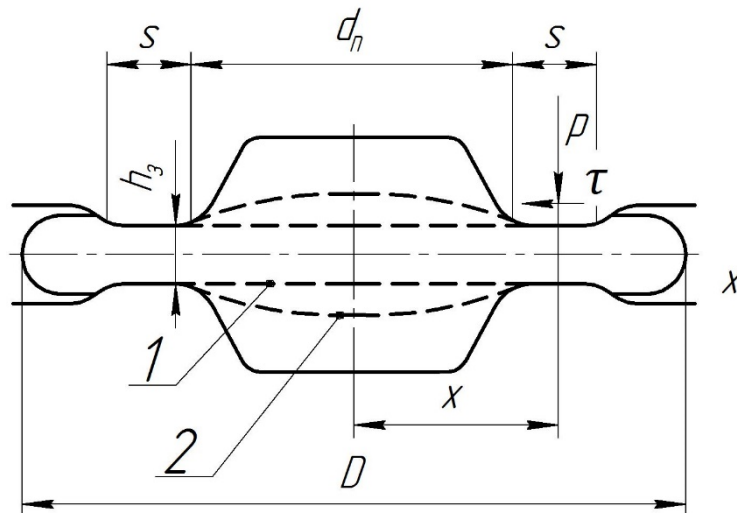


Рисунок 4.3 - Схема відкритого штампування

Відомо також, що максимальна сила деформації відповідає кінцевому моменту штампування, тобто при повному заповненні порожнини інструменту металом (момент доштамповки) і утворенні задирки. При цьому, наприклад, при виготовленні бочкоподібної поковки (рис. 4.3) силу, яка необхідна для деформації в кінцевий момент штамповки, представляють у виді

$$P = P_3 + P_{\Pi}, \quad (4.7)$$

де P_3 - доля сили деформації металу в задирці; P_{Π} - доля сили деформації металу в порожнині штампу.

Розрахунок максимальної сили холодного (листового) штампування

При холодному штампуванні (витяганні гільзи) сила деформації змінюється в процесі руху пуансона і важливо знати її максимальне значення для розрахунку (рис. 4.4).

Значну трудність при розрахунку сили штампування представляє визначення напруження течії металу з урахуванням зміцнення. Відомо, що зміну напруження течії металу в результаті зміцнення представляють залежно від головної деформації - відносного обтиснення. При штампуванні ж визначають умовну міру витягання $k_B = D/d$, яка по абсолютному значенню не відповідає прийнятому у формулах відносному обтисненню. Крім того, міра витягання k_B характеризує загальне формозміну виробу, а максимальна сила деформації

відповідає проміжному положенню пуансона, оскільки зміцнення металу відбувається на ділянці виходу штаби з радіусу матриці.

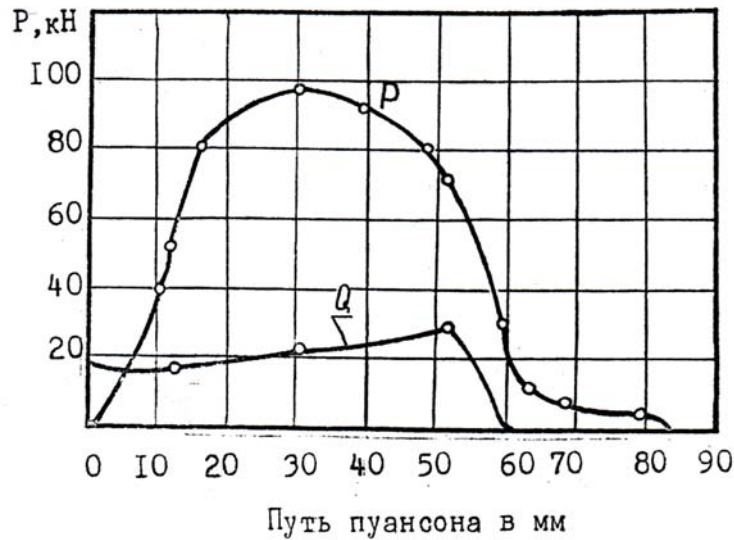


Рисунок 4.4 - Зміна сили P в процесі витягання гільзи і сили притиску Q

Аналіз експериментальних даних з нанесенням координатної сітки на заготовки показує, що при мірі витягання $k_B = 2 \dots 2,19$ максимум сили деформації відповідає інтенсивності деформації ($\epsilon_e = 0,54 \dots 0,62$). Для цих значень інтенсивності деформації відносна деформація металу складає $\epsilon_e = 0,41 \dots 0,46$. Ці значення відносних обтиснень і можна використати для визначення напруження течії металу.

4.2 Розрахунок сили осадки (Завдання № 4)

Визначити максимальну силу деформації при осаджуванні по методу В.О. Ніколаєва [2] на фрикційному пресі циліндричної заготовки діаметром $D = 250$ мм і висотою $H = 250$ мм із сталі 45 з обтисненням $\Delta h = 100$ мм при температурі 1000°C , швидкість осадки $v_z = 80$ мм/с.

Визначаємо:

- міру деформації

$$\epsilon = \Delta h / H = 100 / 250 = 0,4;$$

- швидкість деформації у кінці осадки

$$u = v_z / h = 80 / 150 = 0,53 \text{ с}^{-1},$$

де $h = H - \Delta h = 250 - 100 = 150$ мм.

Напруження течії у кінці осадки визначимо за формулою

$$\sigma_T = \sigma_{T6} \cdot k_t \cdot k_\epsilon \cdot k_u.$$

Для $N_1 < 5$ (вуглецеві, конструкційні, низьколеговані, інструментальні сталі) маємо:

$$N_1 = C + Si + Mn + Cr + Ni + \dots ;$$

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \{1 - [(5 - N_1)/4,5]^{1,8}\},$$

де σ_{T6} - базове напруження течії металу при $t = 1000^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,1$ і $u = 10 \text{ c}^{-1}$; N_1 - сумарний вміст хімічних елементів в сталі, % (окрім сірки, фосфору і заліза).

Коефіцієнти k_t , k_ε , k_u визначаються за формулами, що наводяться нижче:

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot (t/400 - 2)^{0,7}.$$

Для вуглецевих, інструментальних і низьколегованих сталей при $\varepsilon \geq 0,1$ і $u \leq 10 \text{ c}^{-1}$ маємо:

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43 \cdot [1 - 6,3 \cdot (0,5 - \varepsilon)^2];$$

$$k_u = 0,38 + 0,065 \cdot (7 + \ln u).$$

Після підстановки значень маємо:

$$N_1 = 0,45 + 0,2 + 0,2 + 0,05 + 0,03 = 0,93;$$

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \{1 - [(5 - 0,93)/4,5]^{1,8}\} = 84,1 \text{ МПа};$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot (1000/400 - 2)^{0,7} = 0,98;$$

$$k_u = 0,38 + 0,065 \cdot (7 - 0,63) = 0,79;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43 \cdot [1 - 6,3 \cdot (0,5 - 0,4)^2] = 1,4;$$

$$\sigma_T = \sigma_{T6} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u = 84,1 \cdot 0,98 \cdot 1,4 \cdot 0,79 = 92,1 \text{ МПа}.$$

Діаметр циліндричної деталі у кінці осадки дорівнює

$$d = D \cdot \sqrt{H/h} = 250 \cdot \sqrt{250/150} = 323 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт тертя і показник тертя (при $d/h = 323/150 = 2,15$) дорівнюють:

$$f = 0,49 - 0,035 \cdot (4,5 - d/h) = 0,41;$$

$$f_{\Pi} = 1,13 \cdot f \cdot d/h = 1,13 \cdot 0,41 \cdot 2,15 = 1;$$

$$C_H = 0,2 + 0,031 \cdot (4,4 - f \cdot d/h)^{0,95} =$$

$$= 0,2 + 0,031 \cdot (4,4 - 0,41 \cdot 2,15)^{0,95} = 0,3.$$

Середнє нормальне контактне напруження у кінці осадки дорівнює

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + C_H \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right) = 92,1 \cdot (1 + 0,3 \cdot 1 \cdot 2,15) = 151,6 \text{ МПа}.$$

Сила осадки визначається з формули

$$P = p_{cp} \cdot (\pi/4) \cdot d^2 = 151,6 \cdot (\pi/4) \cdot 323^2 \cdot 10^{-6} = 12,4 \text{ МН}.$$

Для осадки заготовки в плоских плитах для приведених умов деформації потрібний прес з силою стискування не менше $P = 13 \text{ МН}$.

У таблиці 4.1 наведено варіанти виконання індивідуальних завдання.

4.3 Розрахунок маси частин молота, що падають (Завдання № 5)

Визначити масу частин молота, що падають, при осаджуванні заготовки з діаметром $D = 100$ мм і заввишки $H = 100$ мм до висоти $h = 85$ мм, $v = 6$ м/с. Матеріал заготовки - маловуглецева сталь, температура деформації $t = 1150^\circ\text{C}$.

Кінцевий діаметр поковки дорівнює:

$$d = D \cdot \sqrt{\frac{H}{h}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{100}{85}} \approx 108 \text{ мм.}$$

Швидкість деформації при русі частин, що падають зі швидкістю 6 м/с дорівнює

$$u = \frac{v}{h} = \frac{6000}{85} \approx 71 \text{ с}^{-1}.$$

Ступінь деформації за удар $\varepsilon = (H - h)/H = (100 - 85)/100 = 0,15$. Напруження течії металу сталі марки 4Х13 у кінці осадки дорівнює $\sigma_T = 90,5$ МПа. Показник тертя при $d/h = 1,28$:

$$f = 0,43 - 0,058 \cdot \left(4,50 - \frac{d}{h}\right) = 0,43 - 0,058 \cdot (4,50 - 1,26) = 0,24;$$

$$f_{\Pi} = 1,13 \cdot f \cdot \frac{d}{h} = 1,13 \cdot 0,24 \cdot 1,26 = 0,35.$$

Середнє нормальне напруження дорівнює:

$$P_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + 0,33 \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right) = 90,5 \cdot (1 + 0,33 \cdot 0,35 \cdot 1,28) = 103,9 \text{ МПа.}$$

Сила осадки дорівнює:

$$P = p_{cp} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 103,9 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot 108^2 \cdot 10^{-6} = 0,96 \text{ МН.}$$

Маса частин молота, що падають, при $P = 0,96$ МН, ККД молота $\eta_{\Pi} = 0,8$, і $\Delta h = H - h = 100 - 85 = 15$ мм, дорівнює:

$$G = \frac{P \cdot 10^2 \cdot \frac{\Delta h}{1000} \cdot 2q}{\eta_{\Pi} \cdot v^2} = \frac{0,96 \cdot 10^2 \cdot 0,015 \cdot 2 \cdot 9,8}{0,8 \cdot 6^2} = 0,98 \text{ т} = 980 \text{ кг.}$$

Таким чином, для зменшення заготовки до $h = 85$ мм потрібний молот з мінімальною масою частин, що падають $G = 980$ кг. При меншій потужності молота задану величину обтиснення $\Delta h = 15$ мм здійснити не вдасться.

4.4 Розрахунок параметрів при ковальському витяганні (Завдання № 6)

Зробити витягання заготовки із сталі 45 з розмірами $H = 200$ мм, $B = 200$ мм, $L = 400$ мм на квадратний переріз 140×140 мм. Приймаємо довжину бойка $a = 100$ мм, а відносне обтиснення $\varepsilon = 0,2$.

Перше обтиснення. Товщина заготовки після удару:

$h = H \cdot (1 - \varepsilon) = 200 \cdot (1 - 0,2) = 160$ мм; коефіцієнт зменшення висоти $1/\eta = H/h = 200/160 = 1,25$.

Тоді при $tg\theta = 1$ і заздалегідь прийнятій ширині після витягання $b_{1обтисн} \approx 204$ мм отримаємо

$$\beta_y = \frac{1/\eta}{\sqrt{1 + b_{1обтисн} \cdot \frac{[(1/\eta) - 1]}{a}}} = \frac{1,25}{\sqrt{1 + 204 \cdot \frac{(1,25 - 1)}{100}}} = 1,02.$$

Ширина заготовки після деформації:

$$b_{1обтисн} = \beta_y \cdot B = 1,02 \cdot 200 = 204 \text{ мм.}$$

Оскільки відмінність між прийнятою для розрахунку b і отриманої в результаті розрахунку ширини відсутня, то вважаємо розрахунок закінченим. При істотній відмінності прийнятого і розрахункового значень b потрібний ітераційний процес.

Довжина заготовки після необхідного обтиснення з урахуванням розширення:

$$\lambda = \frac{1/\eta}{\beta_y} = \frac{1,25}{1,02} = 1,23;$$

$$L_1 = L \cdot \lambda = 400 \cdot 1,23 = 492 \text{ мм.}$$

Число ударів по довжині заготовки

$$n = L/a = 400/100 = 4.$$

Друге обтиснення: після першого обтиснення і кантовки маємо:

$$H = b = 204 \text{ мм,} \quad B = h = 160 \text{ мм.}$$

За умовами завдання відносно обтиснення $\varepsilon = 0,2$, тоді

$$h = H \cdot (1 - \varepsilon) = 200 \cdot 0,8 = 163 \text{ мм,}$$

$$\frac{1}{\eta} = \frac{H}{h} = \frac{200}{163} = 1,25.$$

Коефіцієнт розширення при $tg\theta = 1$ і $b_{2обтисн} \approx 167$ мм дорівнює:

$$\beta_y = \frac{1/\eta}{\sqrt{1 + b_{2обтисн} \cdot \frac{[(1/\eta) - 1]}{a}}} = \frac{1,25}{\sqrt{1 + 167 \cdot \frac{(1,25 - 1)}{100}}} = 1,05.$$

Ширина заготовки після осадки

$$b_{2обтисн} = \beta_y \cdot B = 1,05 \cdot 160 = 168 \text{ мм,}$$

що мало відрізняється від прийнятої заздалегідь.

Довжина заготовки після обтиснення:

$$\lambda = \frac{1/\eta}{\beta_y} = \frac{1,25}{1,05} = 1,19;$$

$$L_2 = L_1 \cdot \lambda = 492 \cdot 1,19 = 585 \text{ мм.}$$

Число ударів по довжині заготовки

$$n = L_2/a = 585/100 = 5,85 \approx 6.$$

Таким чином, після другого обтиснення (першого переходу) отримали заготовку, розміри поперечного перерізу якої $b=163$ мм і $h=168$ мм. Аналогічним чином роблять подальше витягання з метою отримання заданих розмірів поковки.

Визначимо силу осадки для першого обтиснення, коли ширина заготовки максимальна, температура деформації $t = 1150^\circ\text{C}$, а швидкість осадки $v = 6$ м/с. Для цих умов опір металу деформації $\sigma_T = 92,5$ МПа. Середнє нормальне напруження при $a < b$, $m = a = 100$ мм і $n = b = 204$ мм дорівнює:

$$p_{cp} = \sigma_\Phi \cdot \left(1 + \frac{1 - \frac{m}{3 \cdot n} \cdot \frac{m}{h_1}}{4} \right) = 92,5 \cdot \left(1 + \frac{1 - \frac{100}{3 \cdot 204} \cdot \frac{100}{160}}{4} \right) = 104,6 \text{ МПа.}$$

Сила осадки дорівнює:

$$P = p_{cp} \cdot a \cdot \frac{b_1 + B_1}{2} \cdot 10^{-6} = 2,11 \text{ МН.}$$

4.5 Визначення сили кривошипного пресу (Завдання № 7)

Визначити силу кривошипного пресу для штампування круглої деталі із сталі марки Ст.40Х в штампі відкритого типу. Форма деталі відповідає рис. 4.3, причому діаметр заготовки $D = 48$ мм, $h_0 = 40$ мм, $h_3 = 2,5$ мм, діаметр поковки по фланцях – $d = 80$ мм, $S = 10$ мм, швидкість осадки $v=0,8$ м/с, середній діаметр поковки в штампі - $d_1=60$ мм (облой відсутній). Температура деформації $t = 1050^\circ\text{C}$.

Для розрахунку напруження течії металу і середнього нормального контактного напруження (СНКН) необхідно визначити об'єм V_d і середню товщину h_{cp} деталі за формулами:

$$V_d = \frac{\pi}{4} \cdot [(d^2 - d_1^2) \cdot h_3 + d_1^2 \cdot h_0];$$

$$h_{cp} = 4 \cdot \frac{V_d}{\pi} \cdot d^2.$$

З урахуванням розмірів поковки маємо:

$$V_d = \frac{\pi}{4} \cdot [(80^2 - 60^2) \cdot 2,5 + 60^2 \cdot 40] = 118595 \text{ мм}^3;$$

$$h_{cp} = 4 \cdot \frac{118595}{\pi} \cdot 80^2 = 23,6 \text{ мм.}$$

Визначимо висоту заготовки при її діаметрі $D = 48$ мм з формули

$$H = \frac{4 \cdot V_D}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 118595}{\pi \cdot 48^2} = 65,6 \text{ мм.}$$

Відносне обтиснення і швидкість деформації дорівнюють:

$$\varepsilon = (H - h_{cp})/H = (65,6 - 23,6)/65,6 = 0,64,$$

$$u = \vartheta \cdot 1000/h_{cp} = 0,8 \cdot 1000/23,6 = 33,91 \text{ с}^{-1}.$$

При $\varepsilon = 0,64$ і $u = 33,91 \text{ с}^{-1}$ напруження течії з [2] дорівнює $\sigma_T = 122,8$ МПа. Площі поковки F_{Π} і задирки F_3 дорівнюють:

$$F_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 60^2 = 2827 \text{ мм}^2;$$

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_1 + 2S)^2 - d_1^2] = \frac{\pi}{4} \cdot [(60 + 2 \cdot 10)^2 - 60^2] = 2200 \text{ мм}^2.$$

Загальна площа контакту поковки з штампом дорівнює

$$F = F_{\Pi} + F_3 = 2827 + 2200 = 5027 \text{ мм}^2.$$

Середнє нормальне контактне напруження (СНКН) при штампуванні деталі визначимо по формулі ($f_2=0,4$ и $n=1,0$):

$$n_{\sigma} = \left(n + \frac{f_2 \cdot S}{h_3} \right) \cdot \frac{F_3}{F} + \left[\frac{2f_2 \cdot S}{h_3} + \ln \left(1,25 \cdot \frac{d_1}{h_0} \right) - 0,375 \right] \cdot \frac{F_{\Pi}}{F},$$

$$n_{\sigma} = \left(1 + \frac{0,4 \cdot 1}{2,5} \right) \cdot \frac{2200}{5027} + \left[\frac{2 \cdot 0,4 \cdot 1}{2,5} + \ln \left(1,25 \cdot \frac{60}{40} \right) - 0,375 \right] \cdot \frac{2827}{5027} = 3,08;$$

$$p_{cp} = n_{\sigma} \cdot \sigma_T = 3,08 \cdot 122,8 = 378,2 \text{ МПа.}$$

Сила штамповки дорівнює:

$$P = p_{cp} \cdot F = 378,2 \cdot 5027 \cdot 10^{-6} = 1,9 \text{ МН.}$$

Визначимо СНКН і силу деформації з використанням наступної формули:

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left\{ \left[(1 + 0,9n_1) + (f_{\Pi} \cdot n_{\Phi} \cdot d_1/h_0) + 2f_{\Pi} \cdot \frac{S}{h_3} \right] \cdot \frac{F_{\Pi}}{F} + f_{\Pi} \cdot \frac{S}{h_3} \cdot \frac{F_3}{F} \right\}$$

$$n_1 = 0,5; F_{\Pi\Phi} = 1,57 \cdot d_1 \cdot h_0 + F_{\Pi} + F_3; n_{\Phi} = F_{\Pi\Phi}/F,$$

$F_{\Pi\Phi}$ - повна площа поверхні поковки.

Заздалегідь встановлюємо ($n_1 = 0,5$, $f_{\Pi} = 0,4$):

$$F_{\Pi\Phi} = 1,57 \cdot 60 \cdot 40 + 2827 + 2200 = 8795 \text{ мм}^2;$$

$$n_{\Phi} = F_{\Pi\Phi}/F = 8795/5027 = 1,75;$$

$$p_{cp} = 122,8 \cdot \left\{ \left[(1 + 0,9 \cdot 0,5) + (0,4 \cdot 1,75 \cdot 60/40) + 2 \cdot 0,4 \cdot \frac{1}{2,5} \right] \cdot \frac{2827}{5027} + 0,4 \cdot \frac{1}{2,5} \cdot \frac{2200}{5027} \right\} = 479,7 \text{ МПа.}$$

Значення коефіцієнта напруженого стану n_σ , отримані по вищенаведеній формулі p_{cp} помітно ближче до дослідних даних, чим по формулі:

$$n_\sigma = \left(n + \frac{f_2 \cdot S}{h_3} \right) \cdot \frac{F_2}{F} + \left(\frac{2f_2 \cdot S}{h_3} + \ln \left(1,25 \cdot \frac{d}{h} \right) - 0,375 \right) \cdot \frac{F_1}{F},$$

де f_2 (f_{II}) - показник тертя (з умови Е. Зібеля) на поверхнях мостика і металу; F_2 і F_1 - відповідно горизонтальна проекція площі контакту задирки з мостиком і площа проекції тіла поковки; F - повна горизонтальна проекція поковки з урахуванням задирки; n - коефіцієнт, що відбиває граничні умови на задирці.

4.6 Визначення максимальної сили витягання гільзи (Завдання № 8)

Визначити максимальну силу витягання гільзи при радіусі заготовки $R_H=67$ мм і її товщині $S=1$ мм із сталі 08кп. Радіус пуансона $R_U \approx 30,7$ мм, радіус закруглення матриці $r_M=8$ мм. Сила притиску $Q=18,5$ кН. Коефіцієнт тертя при використанні в якості мастила мінерального масла з наповнювачами $f = 0,113$. Середнє напруження течії після деформації при $\varepsilon=46\%$ і $\sigma_{T0} = 230$ МПа дорівнює [2]:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + 34,6 \cdot \varepsilon^{0,6};$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + 0,67 (\sigma_{T1} - \sigma_{T0});$$

$$\sigma_{T1} = 230 + 34,6 \cdot 46^{0,6} = 574 \text{ МПа};$$

$$\sigma_T = 230 + 0,67 \cdot (574 - 230) = 460,6 \text{ МПа.}$$

Максимальне напруження витягання дорівнює:

$$\sigma_p = 1,1 \cdot \sigma_T \cdot \left[\ln \left(\frac{R_H}{R_U} \right) + \frac{f \cdot Q \cdot 1000}{\pi \cdot R_H \cdot \sigma_T \cdot S} + \frac{S}{2 \cdot r_M} \right] \cdot e^{\frac{f \cdot \pi}{2}},$$

$$\sigma_p = 1,1 \cdot 460,6 \cdot \left[\ln \left(\frac{67}{30,7} \right) + \frac{0,113 \cdot 18,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 67 \cdot 460,6 \cdot 1} + \frac{1}{2 \cdot 8} \right] \cdot e^{\frac{0,113 \cdot \pi}{2}} = 523 \text{ МПа}$$

Сила витягання визначається по формулі:

$$P_M = 2 \cdot \sigma_p \cdot \pi \cdot R_U \cdot S \cdot 10^{-3},$$

$$P_M = 2 \cdot 523 \cdot \pi \cdot 30,7 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 110 \text{ кН.}$$

4.7 Варіанти виконання індивідуальних завдань

Таблиця 4.1 – Варіанти виконання індивідуальних завдань розрахунку сили осадки (Завдання № 4)

Варіанти	Марка сталі	D, мм	H, мм	Δh , мм	t, °C	v_z , мм/с	N_1 , %
1	У12	200	205	50	950	81	0,85
2	1Х13	205	210	55	955	82	0,84
3	4Х13	210	215	60	960	88	0,81
4	9Х18	215	220	65	965	97	0,80
5	Х28	220	225	70	970	98	0,92
6	Р18	265	270	115	1015	99	0,91
7	СХ8	270	275	120	1020	87	0,95
8	1Х17Н2	275	280	125	1025	83	0,85
9	1Х18Н9Т	280	285	130	1030	84	0,84
10	ЭИ736	245	255	95	995	85	0,83
11	ЭИ481	255	260	105	1005	86	0,82
12	ЭИ435	260	265	110	1010	100	0,81
13	ЭИ437Б	225	230	75	975	101	0,80
14	ЭИ992	230	235	80	980	102	0,94
15	ЭИ602	235	240	85	985	103	0,95
16	ЭИ736Ш	240	245	90	990	104	0,96
17	ОХ23Ю5	285	290	135	1035	89	0,97
18	ОХ19Н9Ф2С	290	295	140	1040	90	0,86
19	ЭИ736	310	315	160	1060	91	0,92
20	ЭИ481	315	320	165	1065	92	0,91
21	ЭИ435	320	325	170	1070	93	0,90
22	ЭИ437Б	295	300	145	1045	94	0,89
23	ЭИ992	300	305	150	1050	95	0,88
24	ЭИ602	305	310	155	1055	96	0,87
25	ЭИ736Ш	325	330	175	1075	105	0,86

Примітка: інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

Таблиця 4.2 – Варіанти виконання індивідуальних завдань розрахунку маси частин молоту, що падають (Завдання № 5)

Варіанти	Марка сталі	D, мм	H, мм	h, мм	T, °C	v, м/с	σ_T , МПа ($\beta=1$)
1	У12	160	160	145	1100	5.5	80.3
2	1Х13	165	165	150	1110	5.6	82.6
3	Ст 45	170	170	155	1120	5.7	72.2
4	9Х18	175	175	160	1130	5.8	73.9
5	Х28	180	180	165	1140	5.9	74.4
6	P18	130	130	115	1015	6.1	75.5
7	СХ8	135	135	120	1020	6.2	91.1
8	1Х17Н2	140	140	125	1025	6.3	92.7
9	1Х18Н9Т	145	145	130	1030	6.4	93.5
10	ЭИ736	150	150	135	1145	6.5	94.8
11	ЭИ481	155	155	140	1005	5.7	70.3
12	ЭИ435	105	105	90	1010	5.8	71.4
13	ЭИ437Б	110	110	95	1130	5.9	87.9
14	ЭИ992	115	115	100	1135	6.1	88.1
15	ЭИ602	120	120	105	1125	6.3	85.6
16	ЭИ736Ш	125	125	110	1120	6.4	86.7
17	ОХ23Ю5	185	185	170	1035	6.5	83.5
18	ОХ19Н9Ф2С	190	190	175	1040	5.7	84.9
19	ЭИ736	195	195	180	1060	6.1	89.1
20	ЭИ481	200	200	185	1065	6.2	90.3
21	ЭИ435	205	205	190	1070	6.3	76.5
22	ЭИ437Б	210	210	195	1045	6.4	77.2
23	ЭИ992	215	215	200	1050	6.5	78.7
24	ЭИ602	220	220	205	1055	5.7	79.9
25	ЭИ736Ш	225	225	210	1075	6.1	95.8

Примітка: інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

Таблиця 4.3 – Варіанти виконання індивідуальних завдань розрахунку ковальського витягання (Завдання № 6)

Варіанти	Марка сталі	H, мм	B, мм	L, мм	h _k , мм	b _k , мм	a, мм	ε	σ _T , МПа (β=1)	b _{1обтисн} , мм	b _{2обтисн} , мм
1	У12	205	205	420	143	143	105	0.41	80.1	221	146
2	1Х13	210	210	440	145	145	110	0.41	82.3	228	150
3	4Х13	215	215	460	147	147	115	0.43	72.7	236	152
4	9Х18	220	220	480	150	150	120	0.40	73.4	240	160
5	Х28	225	225	500	155	155	125	0.38	74.9	245	167
6	Р18	230	230	520	160	160	130	0.37	75.5	250	172
7	СХ8	235	235	540	165	165	135	0.38	91.8	257	175
8	1Х17Н2	240	240	560	170	170	140	0.37	92.2	263	181
9	1Х18Н9Т	245	245	580	175	175	145	0.38	93.6	270	184
10	ЭИ736	250	250	600	180	180	150	0.36	94.8	274	191
11	ЭИ481	255	255	620	185	185	155	0.4	70.5	285	190
12	ЭИ435	260	260	640	190	190	160	0.36	71.1	287	199
13	ЭИ437Б	265	265	660	190	190	165	0.38	87.3	295	200
14	ЭИ992	270	270	680	190	190	170	0.41	88.2	305	200
15	ЭИ602	275	275	700	195	195	175	0.4	85.7	310	206
16	ЭИ736Ш	280	280	720	200	200	180	0.37	86.8	313	214
17	ОХ23Ю5	285	285	740	210	210	185	0.37	83.4	319	219
18	ОХ19Н9Ф2С	290	290	760	215	215	190	0.36	84.3	324	225
19	ЭИ736	295	295	780	220	220	195	0.35	89.6	329	230
20	ЭИ481	300	300	800	215	215	200	0.43	90.1	347	221
21	ЭИ435	305	305	820	215	215	205	0.44	76.9	355	224
22	ЭИ437Б	310	310	840	210	210	210	0.45	77.5	363	226
23	ЭИ992	315	315	860	220	220	215	0.43	78.4	366	233
24	ЭИ602	320	320	880	240	240	220	0.35	79.2	359	252
25	ЭИ736Ш	325	325	900	225	225	225	0.44	95.1	380	240

Примітка: інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

Таблиця 4.4 – Варіанти виконання індивідуальних завдань визначення сили кривошипного пресу (Завдання № 7)

Варіанти	Марка сталі	h_0 , мм	h_3 , мм	d , мм	S , мм	D , мм	v , м/с	d_1 , мм	t , °C	σ_t , МПа ($\beta=1$)
1	У12	58	3.625	116	14.5	137.75	0.81	87	1000	80.1
2	1Х13	76	4.750	152	19.0	180.50	0.82	114	1010	82.3
3	4Х13	94	5.875	188	23.5	223.25	0.83	141	1020	72.7
4	9Х18	112	7.000	224	28.0	266.00	0.84	168	1030	73.4
5	Х28	130	8.125	260	32.5	308.75	0.85	195	1100	74.9
6	Р18	148	9.250	296	37.0	351.50	0.86	222	1110	75.5
7	СХ8	166	10.375	332	41.5	394.25	0.87	249	1120	91.8
8	1Х17Н2	184	11.500	368	46.0	437.00	0.88	276	1130	92.2
9	1Х18Н9Т	202	12.625	404	50.5	479.75	0.89	303	1060	93.6
10	ЭИ736	220	13.750	440	55.0	522.50	0.90	330	1070	94.8
11	ЭИ481	238	14.875	476	59.5	565.25	0.70	357	1080	70.5
12	ЭИ435	256	16.000	512	64.0	608.00	0.71	384	1090	71.1
13	ЭИ437Б	274	17.125	548	68.5	650.75	0.72	411	1030	87.3
14	ЭИ992	292	18.250	584	73.0	693.50	0.73	438	1100	88.2
15	ЭИ602	310	19.375	620	77.5	736.25	0.74	465	1110	85.7
16	ЭИ736Ш	328	20.500	656	82.0	779.00	0.75	492	1060	86.8
17	ОХ23Ю5	346	21.625	692	86.5	821.75	0.76	519	1070	83.4
18	ОХ19Н9Ф2С	364	22.750	728	91.0	864.50	0.77	546	1080	84.3
19	ЭИ736	382	23.875	764	95.5	907.25	0.78	573	1000	89.6
20	ЭИ481	400	25.000	800	100.0	950.00	0.79	600	1010	90.1
21	ЭИ435	202	12.625	836	104.5	650.75	0.89	627	1030	76.9
22	ЭИ437Б	220	13.750	872	109.0	693.5	0.90	654	1100	77.5
23	ЭИ992	238	14.875	908	113.5	736.25	0.70	681	1090	78.4
24	ЭИ602	310	17.125	944	118.0	180.5	0.85	708	1030	79.2
25	ЭИ736Ш	328	18.25	980	122.5	223.25	0.86	735	1100	95.1

Примітка: інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

Таблиця 4.5 – Варіанти виконання індивідуальних завдань визначення максимальної сили витягання гільзи (Завдання № 8)

Варіанти	Марка сталі	R _H , мм	S, мм	R _U , мм	r _м , мм	Q, кН	f	ε, %	σ _{Т0} , МПа
1	У12	67.5	0.9	31.3	8.8	19.4	0.123	46.2	80.1
2	1Х13	67.6	0.8	31.4	8.9	19.5	0.124	46.4	82.3
3	4Х13	67.7	0.7	31.5	7.1	17.5	0.125	45.6	72.7
4	9Х18	67.8	0.6	31.6	7.2	17.6	0.117	45.8	73.4
5	Х28	67.1	1.5	31.7	8.5	19.0	0.132	47.4	74.9
6	Р18	67.2	1.6	30.8	8.6	19.1	0.133	47.8	75.5
7	СХ8	67.3	1.7	30.9	8.7	19.2	0.134	45.0	91.8
8	1Х17Н2	67.4	1.8	31.0	8.1	19.3	0.135	45.2	92.2
9	1Х18Н9Т	67.9	1.9	31.1	8.2	18.6	0.122	47.0	93.6
10	ЭИ736	66.9	0.9	31.2	8.3	18.7	0.114	47.2	94.8
11	ЭИ481	66.8	0.8	31.8	8.4	18.8	0.115	45.2	70.5
12	ЭИ435	66.7	0.7	31.9	7.3	18.9	0.116	45.4	71.1
13	ЭИ437Б	66.6	0.6	30.0	7.4	17.7	0.126	46.6	87.3
14	ЭИ992	66.5	0.5	30.1	7.5	17.8	0.127	46.8	88.2
15	ЭИ602	66.4	1.5	30.2	7.6	17.9	0.128	47.8	85.7
16	ЭИ736Ш	66.3	1.6	30.3	7.7	18.0	0.129	45.0	86.8
17	ОХ23Ю5	66.2	1.7	30.4	7.8	18.1	0.130	47.2	83.4
18	ОХ19Н9Ф2С	66.1	1.8	30.5	7.9	18.2	0.131	46.8	84.3
19	ЭИ736	67.8	1.9	30.6	8.4	18.3	0.118	47.0	89.6
20	ЭИ481	67.9	1.1	30.8	7.3	18.4	0.119	47.4	90.1
21	ЭИ435	66.9	1.2	30.9	7.4	18.8	0.120	47.6	76.9
22	ЭИ437Б	66.8	1.3	31.7	8.9	18.9	0.121	47.8	77.5
23	ЭИ992	66.5	1.4	31.8	7.1	19.0	0.136	45.0	78.4
24	ЭИ602	66.4	0.6	31.9	7.9	17.7	0.137	45.2	79.2
25	ЭИ736Ш	66.3	0.5	30.0	8.4	17.8	0.138	45.4	95.1

Примітка: інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.