

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_{II}), а також розмірами поковки на даній стадії осадки (рис. 4.1) [2].

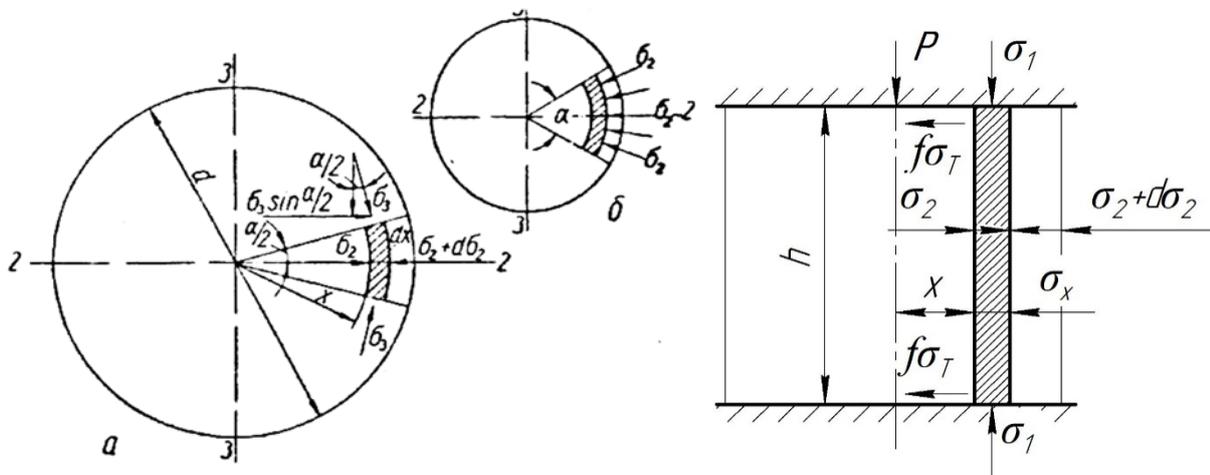


Рисунок 4.1 - Схема сил, діючих при осаджуванні циліндричної заготовки

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 $\tau = f_{II} \cdot \sigma_T$, (умова тертя Е. Зібеля), діючим на контактні 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_2 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 - штампів, особливо для остаточного доведення розмірів, де застосовують ручну працю. Технологічний процес штампування передбачає різання прокату на заготовки, їх нагрів, власне штампування, обрізання задирок (облоя), 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 облой (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 облоя. Чорнові штампи застосовують з метою виконання основної пластичної деформації. Вони відрізняються від чистового відсутністю канавки для облоя, великими глибиною, ухилами і радіусами закруглень, меншою шириною.

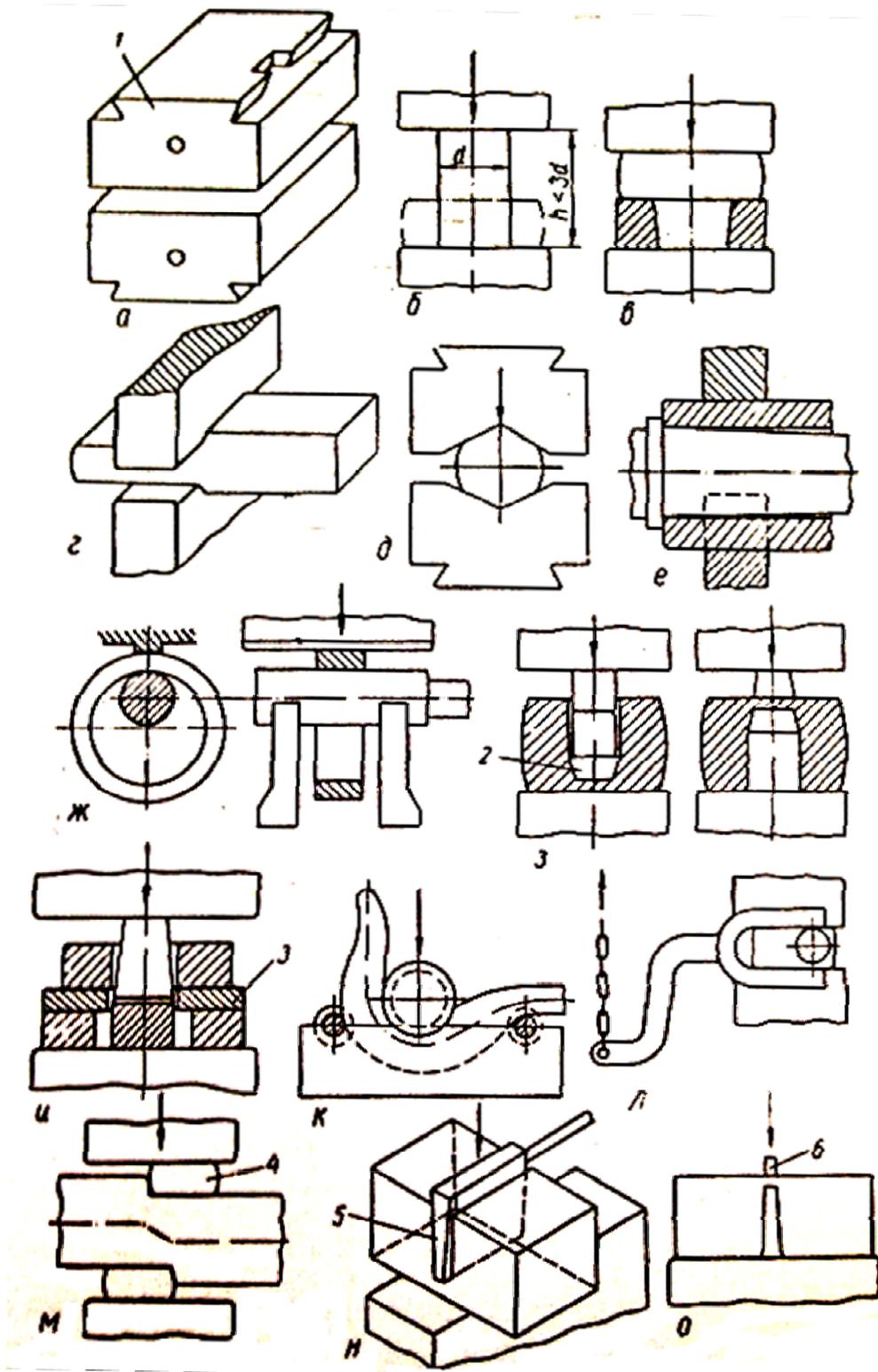


Рисунок 4.2 - Схеми виконання основних операцій вільного кування: а - бойки; б - осадка; в - висадка; г - витягання плоскими бойками; д- витягання фасонними бойками; е - витягання за допомогою оправки; ж - роздача на оправці; з - прошивка; і - прошивка на підкладному кільці; к - гнучка; л - закручування;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

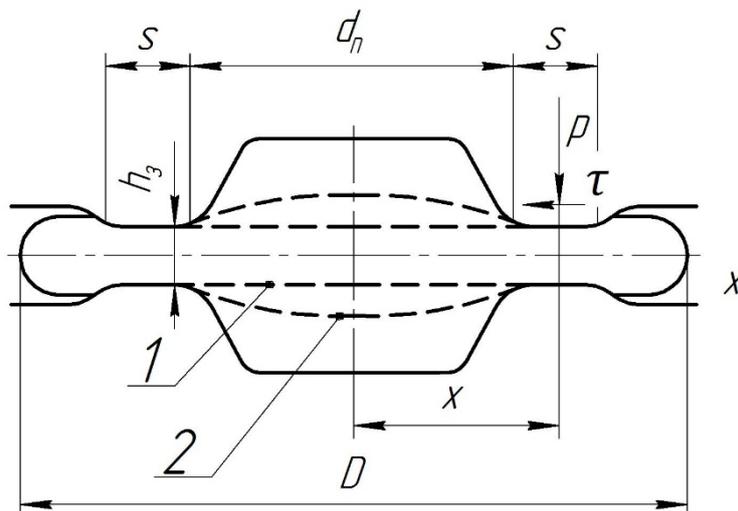


Рисунок 4.3 - Схема відкритого штампування

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.

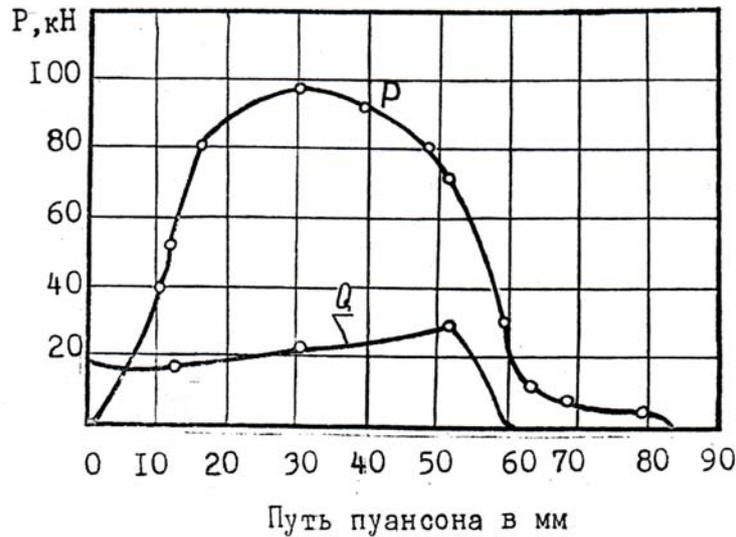


Рисунок 4.4 - Зміна сили P в процесі витягання гільзи і сили притиску Q

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.

4.7 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.