

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

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
ШТАМПУВАННЯ ОБ'ЄМНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ІМПУЛЬСНОМУ ПРЕСІ**

Навчальний посібник до дипломного проектування

Харків «ХАІ» 2018

УДК 621.7.044:004.94:621.979.07 (075.8)  
Р64

Колектив авторів:  
В. В. Третяк, В. Д. Сотников, Ю. О. Невешкін, А. В. Онопченко

Рецензенти: канд техн. наук, проф. Ю. В. Дудукалов,  
канд. техн. наук, доц. М. Ф. Савченко

**Розрахунок** параметрів технологічного процесу штампування Р64 об'ємних деталей на імпульсному пресі [Текст] : навч. посіб. до дипл. проектування / В. В. Третяк, В. Д. Сотников, Ю. О. Невешкін, А. В. Онопченко. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 52 с.

ISBN 978-966-662-622-9

Наведено розрахунки параметрів технологічного процесу штампування об'ємних деталей на імпульсному пресі в межах дипломного проектування. Подано загальні відомості щодо теми, змісту і порядку виконання конструювання оснащення і розрахунків для штампування об'ємних деталей імпульсними технологіями. Навчальний посібник складено відповідно до програми курсу «Технологія двигунобудування» («Заготівельне виробництво») і спеціального розділу «Імпульсна обробка» з предмета «Наукова і конструкторсько-технологічна підготовка виробництва».

Для студентів механічних факультетів.

Іл. 57. Бібліогр.: 28 назв

**УДК 621.7.044:004.94:621.979.07 (075.8)**

ISBN 978-966-662-622-9

© Колектив авторів, 2018  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2018

## ВСТУП

Об'ємне штампування на імпульсному пресі – прогресивний спосіб виробництва поковок, у першу чергу поковок з тонкими і важкодеформівними елементами.

Штампування на імпульсному пресі (рис. 1) можна виконувати у відкритих і закритих, однорівчачкових і багаторівчачкових штампах, на мірних і фасонних (попередньо спрофільованих) заготовках.

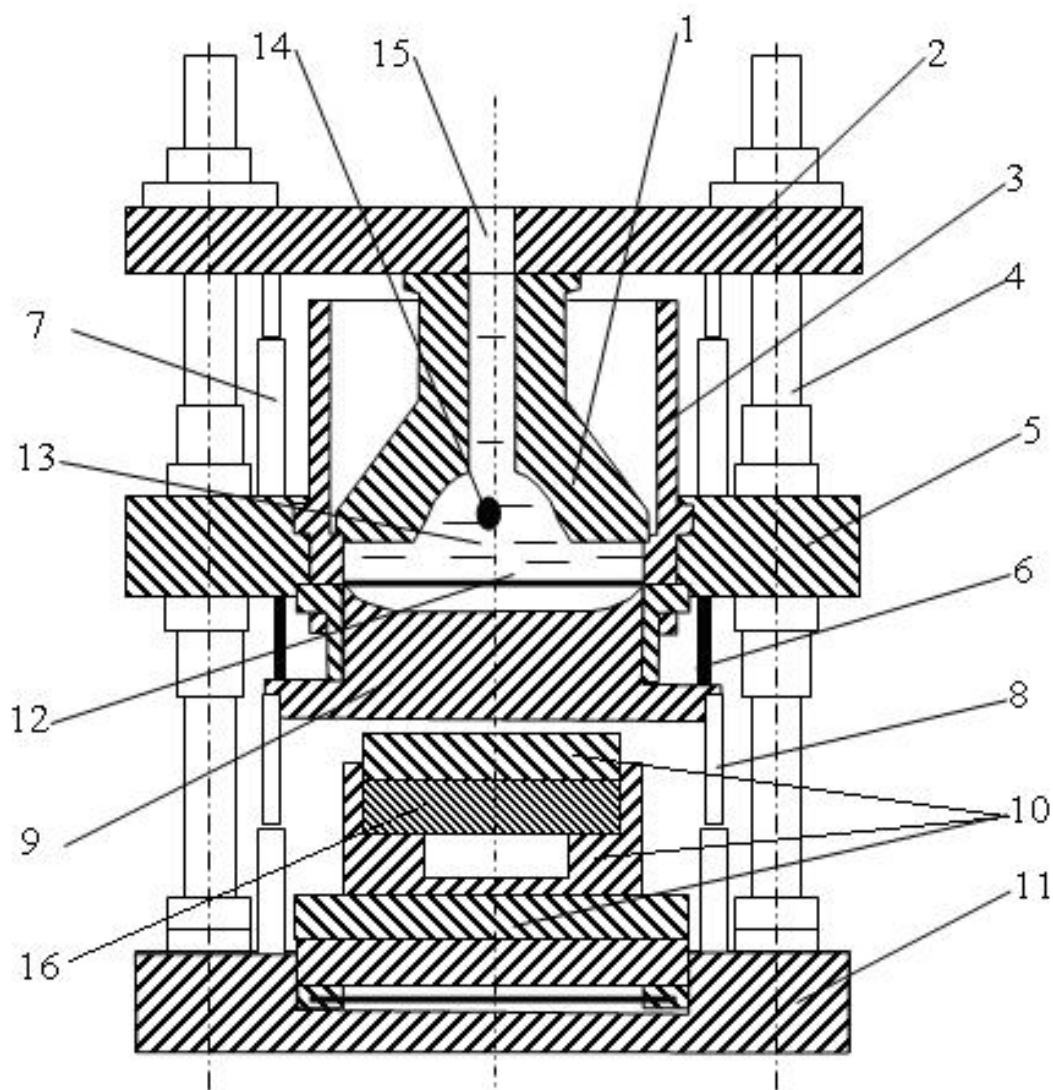


Рис. 1. Схема імпульсного преса:

- 1 – вибухова камера; 2 – рухома траверса; 3 – стакан; 4 – колони;
- 5 – нерухома траверса; 6 – фіксатор; 7 – амортизатор;
- 8 – циліндри повернення; 9 – ударник; 10 – технологічний блок;
- 11 – основа; 12 – еластична діафрагма; 13 – вода; 14 – заряд БВР;
- 15 – отвір; 16 – заготовка

На базі ВП-02 в ХАІ розроблено конструкцію імпульсного преса ВП-02М, який відрізняється від свого аналога технологічною частиною, пристосованою для об'ємного штампування заготовок (рис. 2).

## 1. ОПИС ІМПУЛЬСНОГО ПРЕСА ВП-02М

Універсальний імпульсний прес ВП-02М – механізоване устаткування для імпульсного штампування деталей з плоских, трубчастих та об'ємних заготовок у замкнутій вибуховій камері, при якому використовують як джерело енергії бризантну вибухову речовину (БВР).

Вибуховий прес призначено для виконання таких технологічних операцій:

- роздачі, формування і калібрування деталей з трубчастих заготовок;

- виробництва об'ємних поковок;

- рельєфного формування оболонок та обичайок;

- листового штампування деталей складних форм: витяжки з калібруванням, формування донних і бокових рельєфів, піднутрень, підсічок та інших елементів з перехідними радіусами, які порівнянні з товщиною заготовки:

- групового пробивання близько розташованих отворів.

Імпульсний прес ВП-02 – напівавтоматична установка. Переміщення робочих органів преса, складання і розбирання технологічного вузла преса виконуються в ручному та напівавтоматичному режимах.

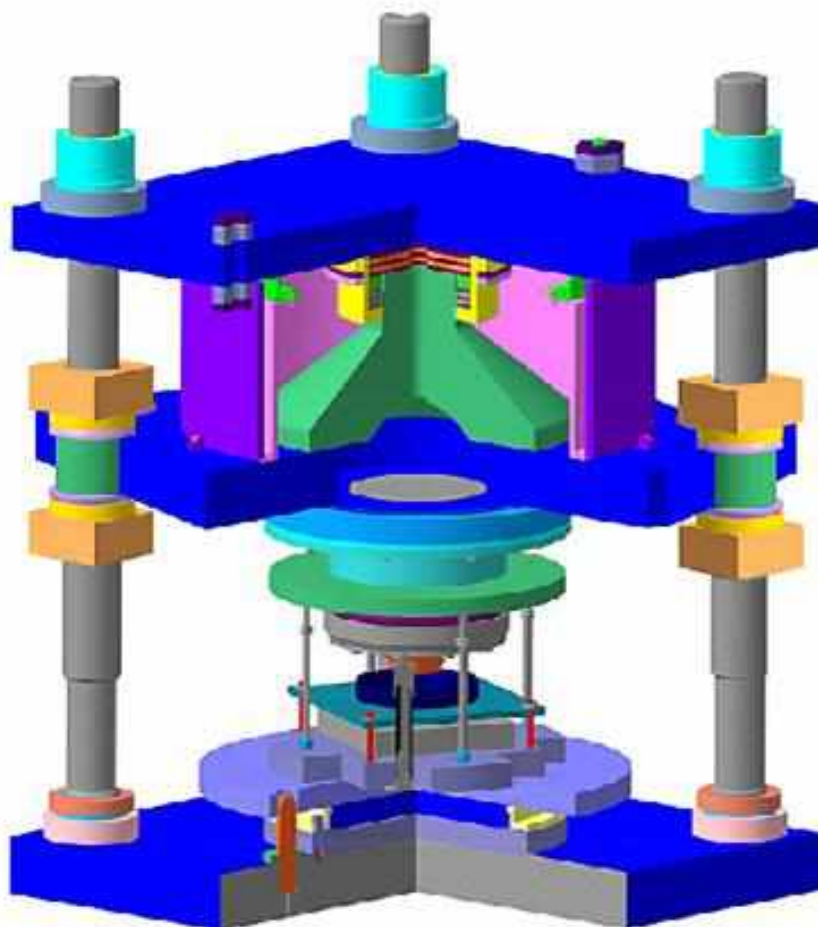


Рис. 2. Загальний вид імпульсного преса

Прес має пристрої блокування, які забезпечують повну безпеку при експлуатації.

### 1.1. Технічні дані імпульсного преса ВП-02М

Енергоносії	бризантна ВР (амоніт № 6ЖВ, ДШ)
Наявна технологічна енергія	160 кДж
Досяжні значення тиску рідини у вибуховій камері	2,0...300 МПа
Максимальна маса заряду	0,15 кг
Потужність електроприводу преса	15 кВт
Тривалість робочого циклу	2,5 хв
Габаритні розміри комплексу	2200x4700x2900 мм
Маса установки	біля 20000 кг
Рівень шуму	80 дБ

### 1.2. Опис пристрою ВП-02М

Імпульсний прес (рис. 3) складається з основи 1, на якій встановлено чотири колони 2, притискної плити 3 та рухомої траверси 4.

Основа має рухомий стіл, що приводиться в рух гідроциліндром 6 через тяги 7.

Стіл 5 переміщується по напрямних 8. В основі 1 також змонтовано короткоходовий циліндр 9 з поршнем 10.

У порожнинах 11 і 12 можна створити тиск гідросуміші до 120 атм. Для ущільнення порожнини 12 використовують гумову діафрагму 13.

Притискна плита 3 фіксується на колонах 2 гайками 14. Відстань від неї до столу 5 може регулюватися у діапазоні 300...800 мм.

До неї кріпиться притискне кільце 15 з еластичною діафрагмою 16.

Рухома траверса може переміщуватися по колоннах 2, на ній закріплено гайками 17 штоки 18, які через коромисло 19, амортизатор 20 і кронштейн 21 зв'язують її з притискною плитою 3.

Для пом'якшення навантаження від заряду БВР 22 на рухому траверсу 4 між нею і вибуховою камерою 23 встановлюють пакет гумових 24 і металевих 25 прокладок.

Для запобігання розльоту води 26 після підриву заряду БВР 22 застосовують захисні кожухи 27 і 28, які утворюють навколо вибухової камери герметичну порожнину.

Захисний кожух 28 одночасно є ємністю для води 26.

Порожнина, утворена захисними кожухами 27 і 28, з'єднана з порожниною вибухової камери 23 каналом 29, який може перекриватися клапаном 30, а для утворення в ній тиску існує канал 31.

Для забезпечення видалення повітря з-під еластичної діафрагми 16 у притискному кільці 15 є канал 32.

Зверху порожнина вибухової камери герметично закривається клиновим затвором 33, якому надає рух гідроциліндр 34.

Керування технологічним процесом виконують з пульта, розташованого поза межами преса в пультовій. Електрогідравлічна система забезпечує роботу вибухового преса у режимі ручного і напівавтоматичного керування.

Робочий процес виконують у такій послідовності.

У висунутому положенні стола 5 на ньому розташовують матрицю із заготовкою, після чого він переміщується гідроциліндром 6 під притискну плиту 3 і притискається до неї гідроциліндром 9.

Гідроциліндром 34 відкривається клиновий затвор 33, у вибуховій камері 23 розміщується заряд БВР 22.

Відкривається клапан 30 и через канал 31 у порожнині захисних кожухів 27 та 28 створюється надлишковий тиск, під дією якого частина води з цієї порожнини через канал 29 перетікає до вибухової камери 23.

При досягненні рівнем води в камері клинового затвору 33 він закривається гідроциліндром 34.

При цьому діафрагма 16 притискається до заготовки, а повітря з порожнини, створеної діафрагмою 16 і заготовкою, виводиться через канал 32.

Клапан 30 закривається і виконується підрив заряду БВР 22.

При цьому заготовка штампується, а вибухова камера 23 разом з підривною траверсою 4 рухається вгору.

Зусилля, яке діє на них, сприймається амортизаторами 20, які повертають їх у вихідне положення. Частина води з вибухової камери 23 викидається у порожнину захисних кожухів 27 і 28.

Після цього гідроциліндром 34 відкривається клиновий затвор 33 і гази, що виникають під час вибуху, відсмоктуються вентиляційною системою. Відкривається клапан 30 і при досягненні рівнем води клинового затвору 33 він закривається гідроциліндром 34.

Через канал 31 у порожнині захисних екранів 27 і 28 утворюється розрідження і під дією атмосферного тиску еластична діафрагма 16 відривається від заготовки та піднімається вище рівня нижньої частини притискного кільця 15, після чого клапан 30 закривається.

У порожнину 11 подається тиск гідросистеми, ствол разом з матрицею і штампованою деталлю опускається на напрямні 8, гідроциліндром 6 переміщується з-під притискної плити 3 для видалення деталі та встановлення нової заготовки.

На пристрої можна штампувати деталі з трубчастих заготовок.

Для цього притискне кільце 15 з діафрагмою 16 знімають, а вибухова камера 23 заповнюється водою 26 через канал у її верхній частині, який перекривається клиновим затвором 33.

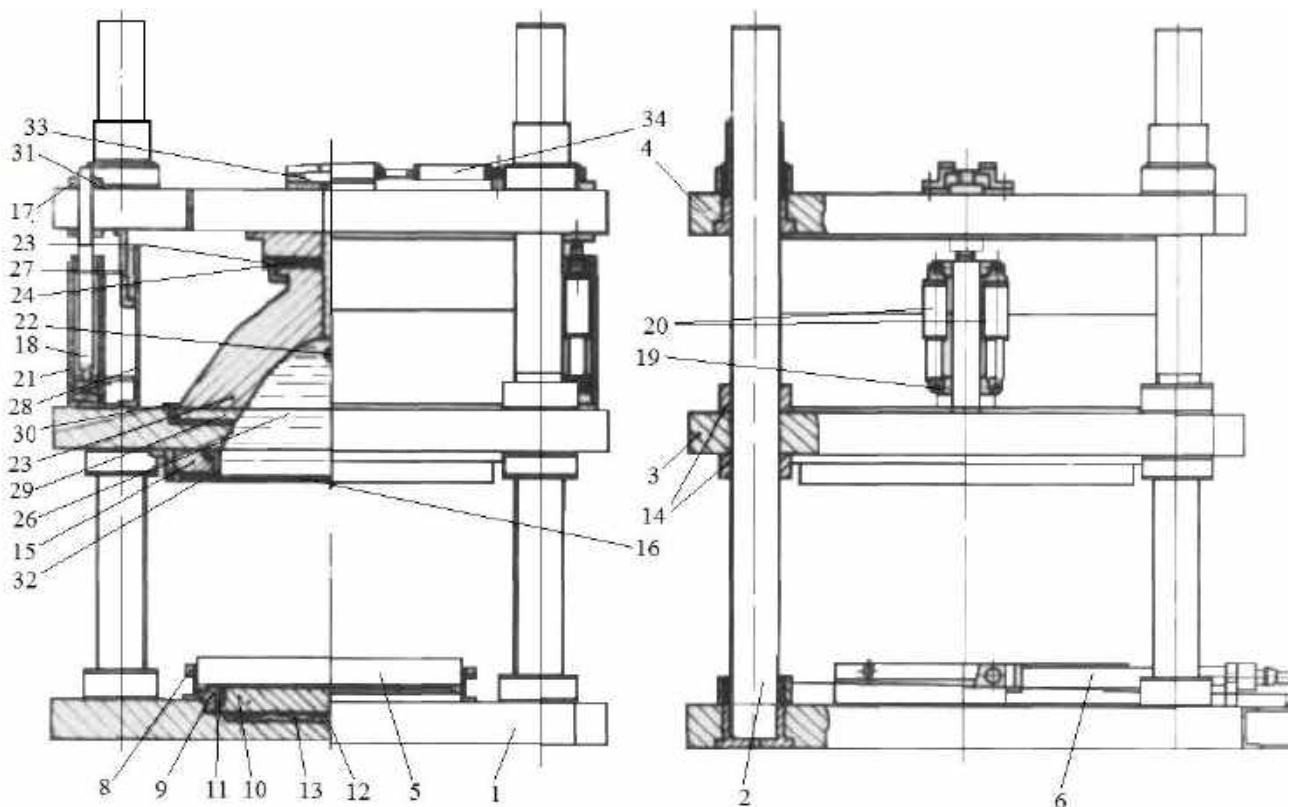


Рис. 3. Принципова схема імпульсного преса ВП-02М

### 1.3. Хвильові процеси у замкнутій камері імпульсного преса ВП-02М

Однією з перспективних розробок у використанні імпульсних процесів можна вважати конструкцію імпульсного преса для об'ємного штампування. Одним з істотних модулів цієї конструкції є замкнута вибухова камера.

Процеси деформування металів вибухом у замкнутих камерах можна описати двома різними способами: з використанням теорії гідродинаміки вибуху або з припущеннями, що приводять до принципу суперпозиції.

Першим способом необхідно розв'язати замкнуту і суттєво складну систему рівнянь, які описують неусталений двовимірний рух частинок передавального середовища і оброблюваного матеріалу.

При цьому враховують умови нерозривності й адіабатичності, закони тертя та витікання рідини через кільцеві канали для визначення параметрів процесу з урахуванням багатократних відбиттів збурень від дна та стінок камери, а також від заготовки, яка неперервно змінює свою конфігурацію.

Відносно точно розв'язання такої системи рівнянь відповідало б тільки окремому випадку штампування певної деталі.

Другий спосіб – обґрунтоване спрощення математичної моделі.

При штампуванні в замкнутих камерах разом з хвильовим процесом передачі енергії заготовці з'являється також гідростатична дія рідини, що стискається в усьому об'ємі камери. Чим більша енергія використовується на стискання рідини, тим більше значення має гідростатична дія.

При штампуванні заготовок з малою жорсткістю основна роль у процесі передачі енергії заряду БВР заготовці належить ударній хвилі та гідропотоку.

Оптимальною формою внутрішньої поверхні вибухової камери є параболічна поверхня. Це пояснюється тим, що при підриві заряду БВР у фокусі такої камери виникає плоска відбита хвиля, яка рухається перпендикулярно до заготовки і передає їй максимально можливу енергію.

При розгляданні хвильових процесів, які виникають у замкнутій камері, можна скористатися принципом Гюйгенса, який полягає, як відомо, у тому, що кожна точка хвилі або поверхні, з якою взаємодіє хвиля, може бути елементарним джерелом хвильових збурень.

Користуючись цим принципом, можна побудувати фронти прямих і відбитих хвиль.

Розглянемо картини хвильових взаємодій при підриві заряду БВР біля дна, у фокусі та на дистанції, що дорівнює двом фокальним відстаням у параболічній вибуховій камері.

Положення та послідовність ударних хвиль, що виникають унаслідок підриву заряду БВР у фокусі, наведено на рис. 4.

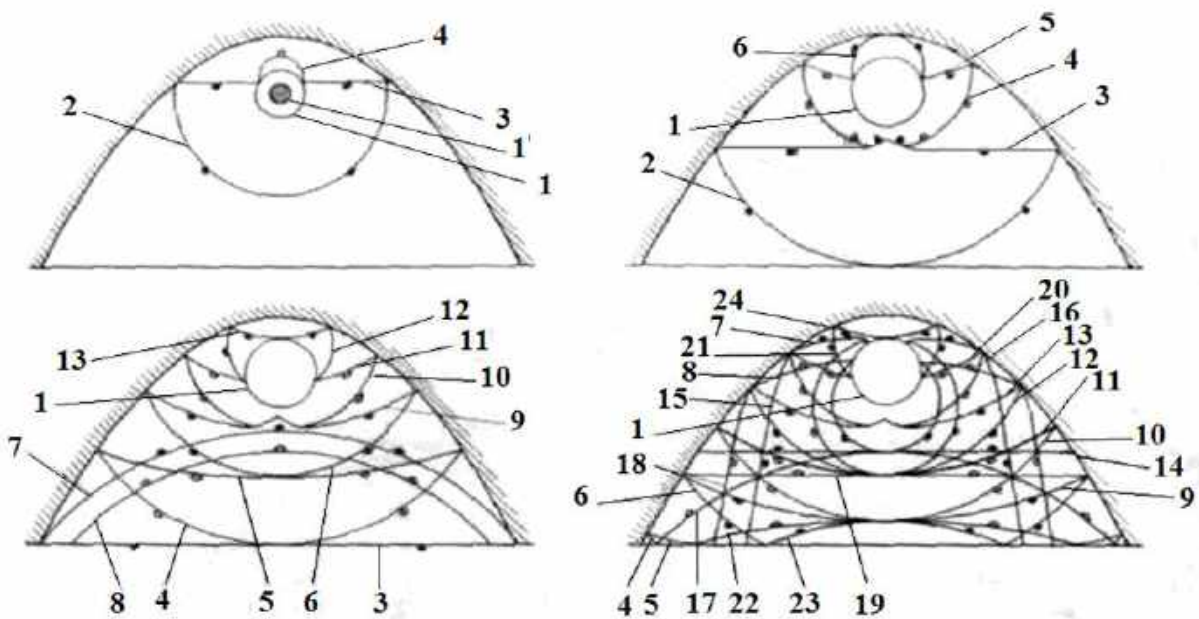


Рис. 4. Картина хвильових взаємодій у сферичній камері

При виході детонаційної хвилі на поверхню заряду 1 в рідині виникає сферична ударна хвиля 2, яка, відбиваючись від поверхні камери, утворює плоску хвилю 3, а в результаті відбиття від границь газового пузиря 1 виникає хвиля розрідження 4.

Поява цієї хвилі пояснюється меншим акустичним опором продуктів вибуху порівняно з акустичним опором води. Крім того, тиск у продуктах вибуху падає швидше, ніж тиск у фронті ударної хвилі.

Тому межу газового пузиря для відбитих хвиль стиснення можна вважати вільною поверхнею. При підході хвилі розрідження 4 до поверхні



камери виникає ще одна хвиля розрідження 5. Вихід хвилі розрідження на межу газового пузиря 1 призводить до появи хвилі стиснення 6 і т. д.

Газовий пузир екранує відбиті хвилі. Крізь нього вони не проходять. Взаємодія меж виникає лише через дифракційні хвилі. При обгинанні газового пузиря відбита плоска хвиля 3 дифрагує і тиск в її центральній частині падає, а потім він знову вирівнюється.

Під час відбиття від заготовки сферична ударна хвиля 2 утворює хвилю стиснення 7, за якою потім іде хвиля розрідження 8. Відбиваючись від заготовки, плоска ударна хвиля 3 також утворює хвилю розрідження 13. Хвилі розрідження 8 і 19 можуть створити біля поверхні заготовки кавітаційні зони.

Досягаючи поверхні камери, хвиля стиснення 7 утворює хвилю стиснення 15, а хвиля розрідження 8 – хвилю стиснення 18. Оскільки міцність води на розрив мала, то амплітуда хвилі розрідження 4 також мала, тому створеними нею хвилями стиснення 6, 9, 12, 13, 22, 23, 24 і хвилями 5, 10, 11, 15, 17, 20, 22 можна знехтувати.

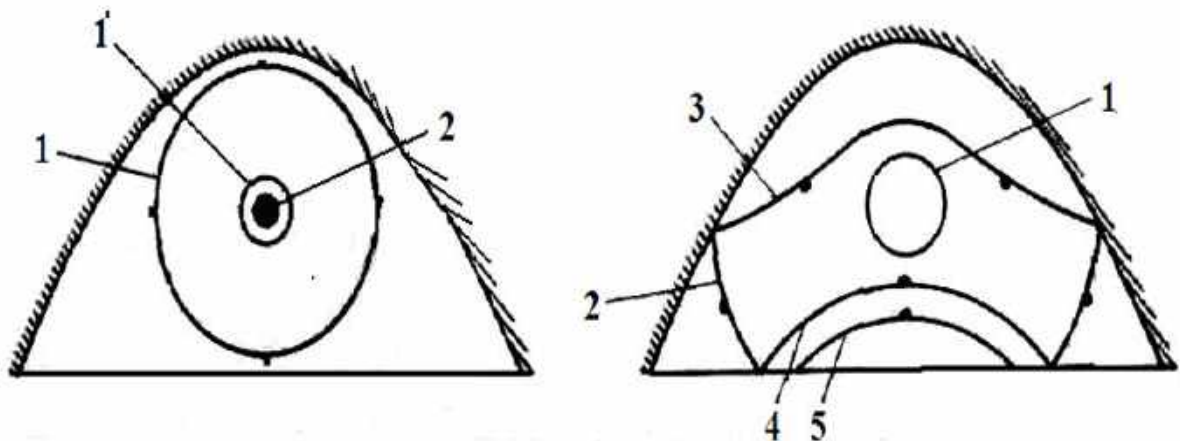


Рис. 5. Поширення ударних хвиль, що утворюються біля дна камери

При підриві заряду біля дна камери від нього поширюється сферична ударна хвиля (рис. 5) подвійної амплітуди, яка при відбитті від заготовки утворює хвилю стиснення 3, за якою потім іде хвиля розрідження 4. Досягаючи поверхні камери, ці хвилі відповідно утворюють хвилю стиснення 5 і хвилю розрідження 6.

Картину хвильових взаємодій при підриві заряду БВР на дистанції, що дорівнює двом фокальним відстаням, наведено на рис. 6.

Сферична ударна хвиля 3, яка відбивається від поверхні камери, утворює ударну хвилю 2 з криволінійним фронтом.

Як видно з рис. 4–6, основну роль у деформуванні заготовки відіграють сферична і плоска відбиті ударні хвилі.

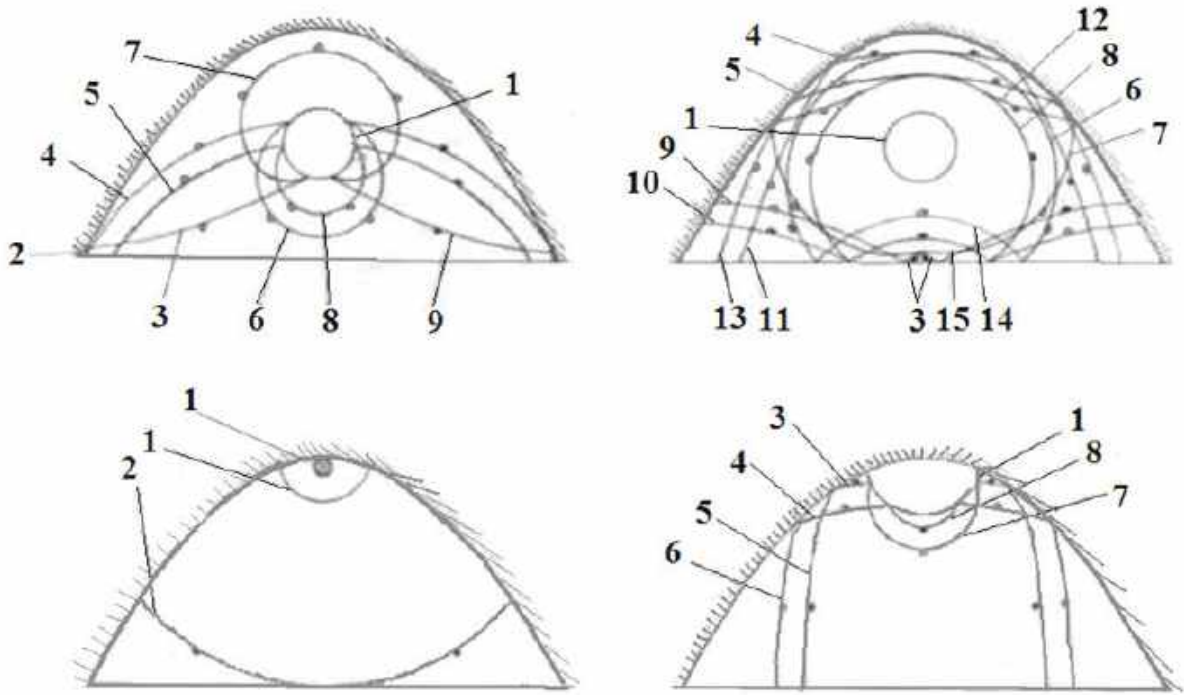


Рис. 6. Характер хвильових взаємодій при підриві заряду на дистанції, що дорівнює двом фокальним відстаням

Зміну тиску за фронтом сферичної ударної хвилі можна описати залежностями

$$P_{сф} = P_m e^{\frac{-t}{\theta}}; \quad (1)$$

$$P_m = A \left( \frac{R_0}{R} \right)^\alpha. \quad (2)$$

Характерний час падіння тиску в ударній хвилі обчислюють за емпіричним співвідношенням

$$\theta = B_2 \left( \frac{R_0}{R} \right)^\beta \frac{R_0}{C_0}. \quad (3)$$

Для тротилу

$$A = 1,47 \cdot 10^9 \frac{H}{M^2}; \quad \alpha = 1,13 \text{ при } \frac{R}{R_0} > 6; \quad (4)$$

$$B_2 = 1,4; \quad \beta_1 = 0,24 \text{ при } 20 > \frac{R}{R_0} > 240. \quad (5)$$

Тиск за фронтом плоскої відбитої ударної хвилі визначається при вирішенні задачі про відбиття сферичної ударної хвилі від параболічної поверхні.

При цьому можна отримати точне рішення для визначення амплітуди тиску у плоскій відбитій ударній хвилі та наближене рішення, яке описується залежністю (1):

$$P_{m2} = \frac{AR_0^\alpha}{a^\alpha (\bar{x} + 1)^{0,5}} \left\{ \left\{ \frac{1}{2\alpha - 1} \left\{ 1 - \frac{1}{(2 + \bar{x})^{\alpha-1}} \right\} \right\} \right\}^{0,5} \quad (6)$$

при  $\bar{x} > 0$ .

Отримані графіки зображено на рис. 7.



Рис. 7. Характер зміни тиску за фронтом плоскої відбитої ударної хвилі

Крива 1 відповідає амплітуді тиску в плоскій відбитій ударній хвилі, обчисленій за наближеною формулою (1), а крива 2 – за точною залежністю. Для порівняння на рис. 7 нанесено криву 3, яка відповідає амплітуді тиску в сферичній ударній хвилі.

Вибухова речовина – ТЕН. Вага заряду – 1 г. Фокусна відстань параболи – 3,06 см. З рис. 7 видно, що оптимальним є розташування вихідного перерізу вибухової камери з координатою  $\bar{x} = 2$ .

#### 1.4. Розрахунок енергії гідропотоку у вибуховій камері

Газовий пузир, розширюючись, передає рідині, що знаходиться у замкнутій камері, кінетичну енергію, яку вона потім передає заготовці, що штампується. Для спрощення вирішення задачі приймемо, що рідина у камері рухається із середньою швидкістю  $V_1$  (рис. 8).

Передавальне середовище і заряд вибухової речовини розташовують у разовий басейн, виготовлений з картону, або у металевий мікробасейн.

Під дією сферичної і плоскої ударних хвиль заготовка розганяється та досягає швидкості  $V_2$ , а в рідині з'являється кавітаційний розрив  $\Delta h$ .

Унаслідок опору пластичному деформуванню швидкість її переміщення зменшується і на поверхню заготовки осідає шар рідини висотою  $h$ .

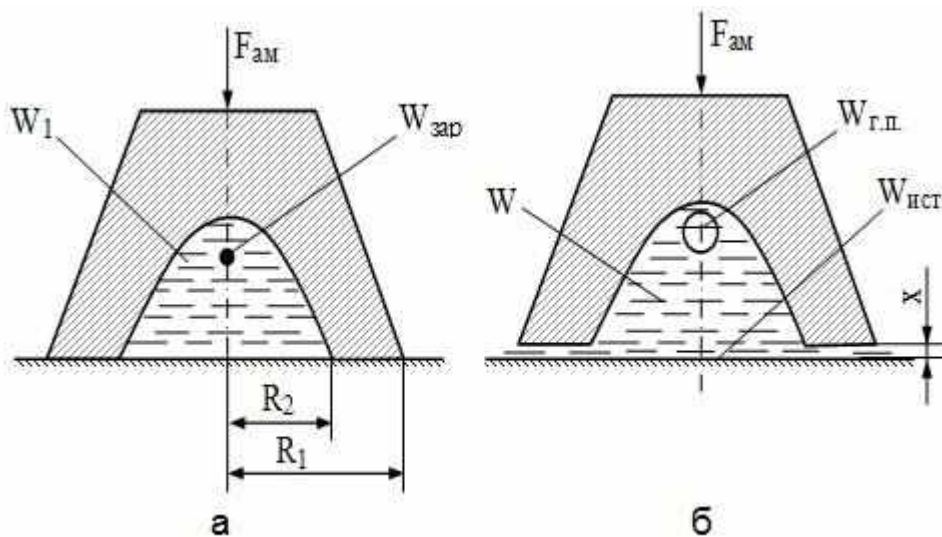


Рис. 8. Схема розрахунку енергії гідропотоку

У певний момент часу гідропоток досягає шару рідини висотою  $h$  і змикається з ним.

Утрати енергії, що виникають при цьому, визначають за виразом

$$\Delta E = \frac{M_1 (\pi R_k^2 h \rho_0 + M_2) (V_1 - V_2)^2}{2(M_1 + \pi R_k^2 h \rho_0 + M_2)}, \quad (7)$$

де  $M_1$  – маса рідини в камері;

$M_2$  – маса заготовки.

На межі змикання шарів з'являються хвилі тиску, які поширюються в обидві сторони від неї. Максимальний тиск, що виникає при зіткненні, в акустичному наближенні дорівнює

$$P = \rho_0 C_0 (V_1 - V_2). \quad (8)$$

Зі збільшенням різниці швидкостей тиск збільшується, але при цьому зростають і втрати енергії.

Величини об'ємів газового пузиря при підриві зарядів тротилу у діапазоні від 0,001 до 1 кг у різні моменти часу наведено на рис. 9. Величину енергії гідропотоку залежно від часу при підриві тих самих зарядів наведено на рис. 10.

Графіки на рис. 9 і 10 побудовано на базі залежностей, отриманих у роботі [1].

Середню швидкість гідропотоку  $V_1$  визначають таким чином:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2E}{M_1}}. \quad (9)$$

Якщо деталь, що штампується, вісесиметричної форми, то час зіткнення гідропотоку з заготовкою і величину енергії, що передається, можна визначити, знаючи закон переміщення заготовки.

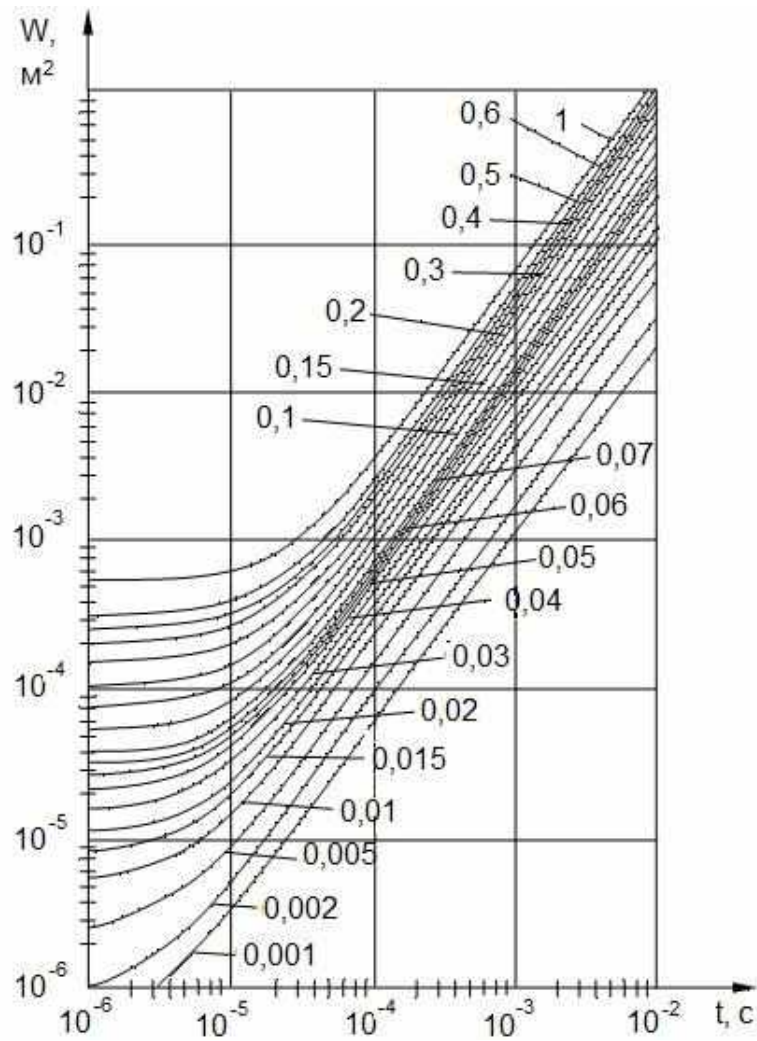


Рис. 9. Графіки залежності величини об'єму газового пузиря від часу для різних зарядів

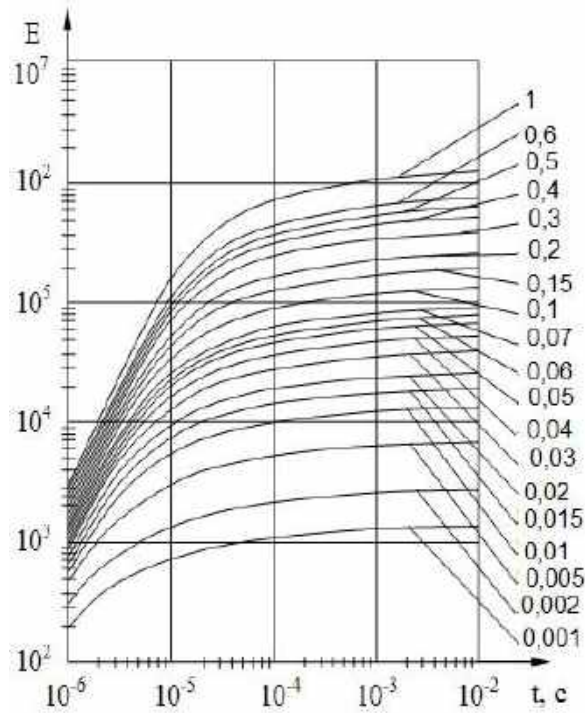


Рис. 10. Графіки залежності величини енергії гідропотоку від часу

Для деталей складної форми об'єм газового пузиря в момент зіткнення гідропотоку із заготовкою визначають орієнтовно за остаточною об'ємом відштампованої деталі.

ККД енергії гідропотоку

$$\eta = 1 - \frac{\Delta E_{еп}}{E_{еп}}. \quad (10)$$

Підставляючи вираз (7) у формулу (10), отримуємо

$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{M_1}{\pi R_k^2 h \rho_0} + 1} \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right)^2. \quad (11)$$

Значення ККД гідропотоку залежно від співвідношення мас, що співударяються, для різних співвідношень  $\frac{V_2}{V_1}$  наведено на рис. 11.

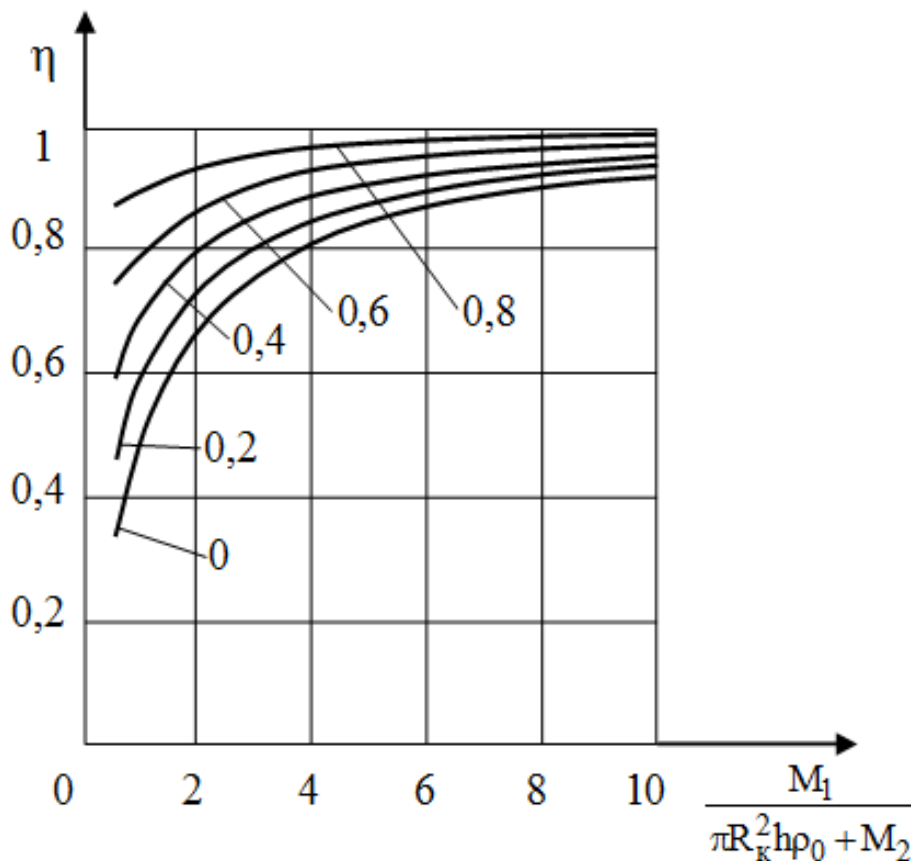


Рис. 11. Значення ККД гідропотоку залежно від співвідношення мас, що співударяються

Як видно з графіків, при співвідношенні маси води в камері до сумарної маси шару рідини, що осів на заготовку, і заготовки більше 8, що майже завжди виконується при штампуванні вибухом в замкнутій камері ККД, майже не зменшується зі зростанням цього співвідношення для будь-яких значень  $\frac{V_2}{V_1}$ .

Однак можливі випадки (при штампуванні жорстких заготовок, калібруванні, формовці рифтів та інше), коли швидкість заготовки в момент зіткнення з нею гідропотоку дорівнює нулю, а тиску (6, 8), який виникає при цьому, недостатньо для її деформування. У цьому випадку ККД енергії гідропотоку дорівнює нулю.

В операціях формування, калібрування, просічення отворів, коли зміна об'єму заготовки під час штампування незначна, швидкість зміни об'єму газового пузиря мала, що призводить до малості кінетичної енергії гідропотоку, який рухається від газового пузиря до заготовки.

У цьому випадку енергія газового пузиря передається заготовці через потенціальну енергію рідини, що стискається ним у вибуховій камері.

Для спрощення фізичної моделі процесу знехтуємо хвильовим характером зростання тиску у камері при розширенні газового пузиря. Це припущення передбачає нескінченно велику швидкість поширення хвилі тиску у вибуховій камері, що дозволяє вважати тиск однаковим у всіх точках рідини у будь-який момент часу.

Крім того, для спрощення розрахунків вибухову камеру і заготовку будемо вважати абсолютно жорсткими.

Як показали розрахунки, проведені в ХАІ з урахуванням цих припущень, першу пульсацію тиску в рідині при підриві заряду БВР у вибуховій камері з інерційним замиканням можна апроксимувати залежністю

$$P = P \sin^2 \frac{3}{2} \omega t \quad \text{при } t \leq \frac{1}{2\omega}. \quad (12)$$

Цю залежність можна використовувати для розрахунку параметрів технологічного процесу для пресів, які застосовуються для штампування об'ємних деталей.

### **1.5. Класифікатор штампованих заготовок, які рекомендуються для виготовлення на імпульсному пресі ВП-02М**

Спочатку високошвидкісне штампування розглядали як метод отримання точних поковок переважно у закритих штампах. Однак з часом область використання цього процесу була розширена, що обґрунтовувалось результатом накопичення технологічного досвіду.

Область використання і перспективність розвитку і удосконалення будь-якого процесу на певний період часу можна охарактеризувати такими факторами: номенклатурою деталей, поковки для яких доцільно виготовляти таким методом; наявністю матеріалів, оброблення яких відомими методами має складності; технологічними можливостями устаткування; продуктивністю устаткування, ступенем його універсальності та надійності, а також можливостями удосконалення; стійкістю штампового оснащення; економічними показниками виробництва; ступенем розробленості технологічного процесу та досвідом його використання у промисловості.

У номенклатурі деталей машин різноманітного призначення значну частку становлять деталі складних для виготовлення штампуванням конфігурацій. Це тонкостінні стакани різного виду, лопатки турбін, диски з тонкими полотнами, деталі типу тонких стрижнів зі стовщеннями тощо. Отримання точних заготовок для них ускладнюється ще й тим, що для сучасного машинобудування постійно освоюються нові матеріали.

Ці матеріали мають високі експлуатаційні властивості, що характеризуються зниженою технологічністю при обробленні тиском: потребують підвищених питомих зусиль, менш пластичні та мають вузький інтервал температур штампування, який для деяких матеріалів зміщено (щодо температур сталей) в область низьких температур на 150...300 °С, для інших, навпаки, – у бік високих температур на 200...400 °С. Це жароміцні матеріали, сплави титану, тугоплавкі метали.

Знижені технологічні характеристики мають також деякі високоміцні алюмінієві сплави.

Отже, економічно ефективним є виготовлення точних поковок для деталей складних конфігурацій з різноманітних металів і сплавів, але воно має серйозні технічні складності, пов'язані з технологічними можливостями існуючого ковальсько-штампувального устаткування та стійкістю штампів.

Штампування особливо складних конфігурацій інколи зовсім неможливе; виготовлення таких деталей проводять або з прутка, або з поковок, виготовлених куванням.

Як показує практика, високошвидкісне деформування є одним зі шляхів підвищення точності поковок.

Технологічні можливості високошвидкісного штампування базуються на ряді особливостей процесу й устаткування, найбільш суттєвими з яких є: підвищена (8...20 м/с) швидкість деформування, яка дозволяє скоротити тривалість процесу штампування, виконувати його практично без теплообміну, що утворює умови для виготовлення особливо складних і точних поковок з тонкими елементами (ребрами, лопатками, полотнами тощо), які важко отримати на звичайних молотах і пресах; наявність нижнього (а на деяких моделях молотів і верхнього) виштовхувача з великим ходом і значним зусиллям, що дозволяє отримувати поковки з мінімальним штампувальним схилом або без нього.

Високошвидкісне штампування дозволяє оброблювати різні метали та сплави; можна штампувати не тільки вісесиметричні поковки, але й деталі довільних форм.

На рис. 12 зображено форму для перегляду класифікатора об'ємних деталей, розроблену на кафедрі 204 Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

На рис. 13 зображено класифікатор штампованих поковок, що рекомендуються для штампування на імпульсному пресі.



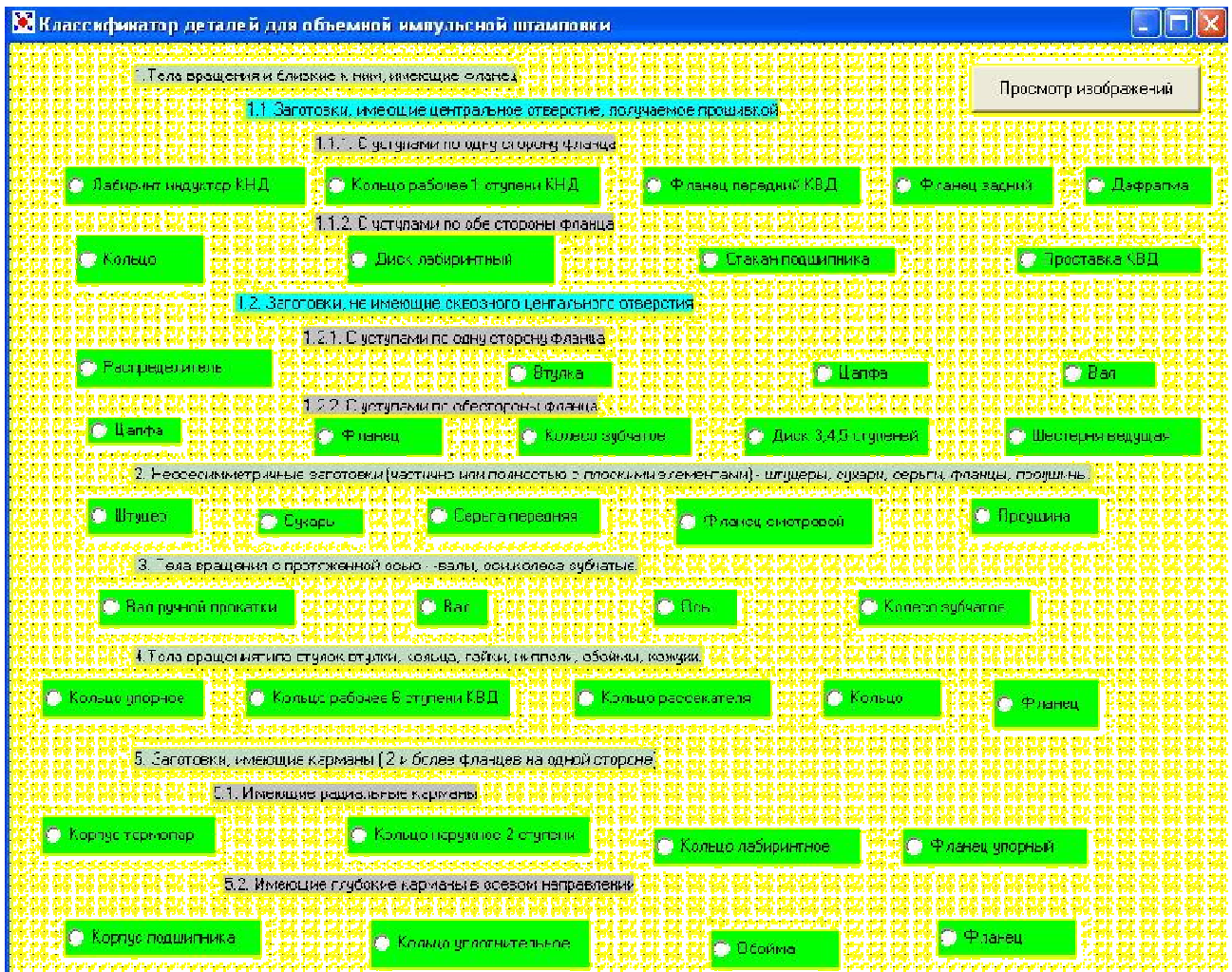


Рис. 12. Форма для перегляду класифікатора для імпульсного штампування об'ємних деталей

## 1.6. Штампи для виготовлення поковок на імпульсному пресі ВП-02М

Штампи високошвидкісних молотів працюють у складних умовах навантаження, які характеризуються такими показниками: імпульсивністю зростання навантаження – при початковій швидкості деформування 20 м/с час удару знаходиться в межах 0,001...0,003 с; прискореннями, що в середньому становлять до 5000g; силою удару, що залежить від енергії та робочого ходу і досягає значних величин; інтенсивним впливом на кріпильні деталі штампа інерційних зусиль, які разом з подальшими знакозмінними силами, що виникають після удару, призводять до його саморозгвинчування та самозатягування.

Штампи, що застосовуються у технології високошвидкісного об'ємного штампування, поділяють за такими ознаками:

- конструктивною – на однорознімні (з однією поверхнею розніму) та багаторознімні (з двома і більше поверхнями розніму);
- способом монтажу на молоті – на індивідуальні та універсальні (блокові).

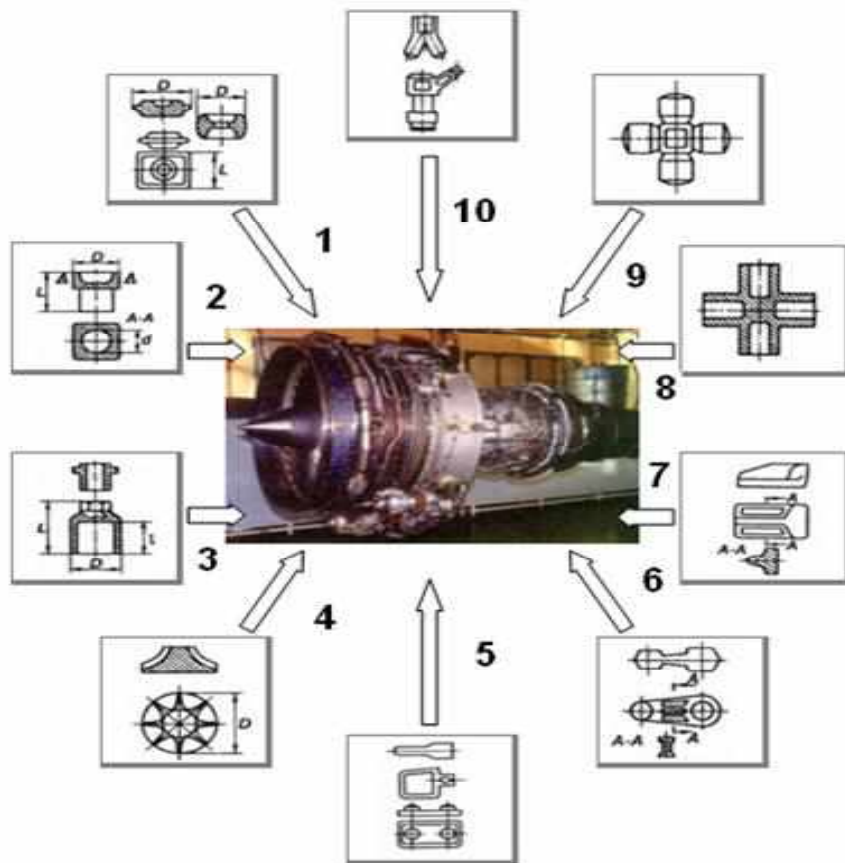


Рис. 13. Класифікатор штампованих поковок, що рекомендуються для штампування на імпульсному пресі: 1 – тіла обертання і близькі до них з короткою віссю (фланці, шестерні, бобишки, кільця, обойми); 2 – тіла обертання з протяжною віссю (вали, шестерні, болти); 3 – тіла обертання типу стакани (фланці, втулки, циліндри); 4 – тіла обертання з короткими ребрами (крильчатки); 5 – плоскі заготовки з бобишками і потовщеннями (накладки, кермо повороту); 6 – важелі, качалки, траверси; 7 – заготовки складної конфігурації з односторонніми і двосторонніми ребрами (стикові фітинги); 8 – корпусні деталі, перехідники; 9 – заготовки арматури з відростками і порожнинами (хрестовини, фітинги, трійники); 10 – масивні заготовки типу стикових і силових вузлів (вилки, корпуси)

Перші монтують за допомогою перехідних плит, причому більшість деталей штампа використовують для складання тільки одного або декількох найменувань оснащення, інші закріплюють в універсальні блоки, призначені для монтажу оснащення для групи виробів. В останньому випадку індивідуально виготовляють матриці, пуансони та виштовхувачі.

На рис.14–16 наведено три моделі штампів: два закритих та один відкритий для виготовлення поковок типу: стрижень з фланцем, диск і корпус.

Штамп для формоутворення поковки типу стрижень з фланцем 7 (рис. 14) складається з матриці 3 і пуансона 2, які закріплені в універсальному блоці, а також виштовхувача 4.

Набір підштампових плит 6 використовують при кріпленні попереднього й остаточного штампів.

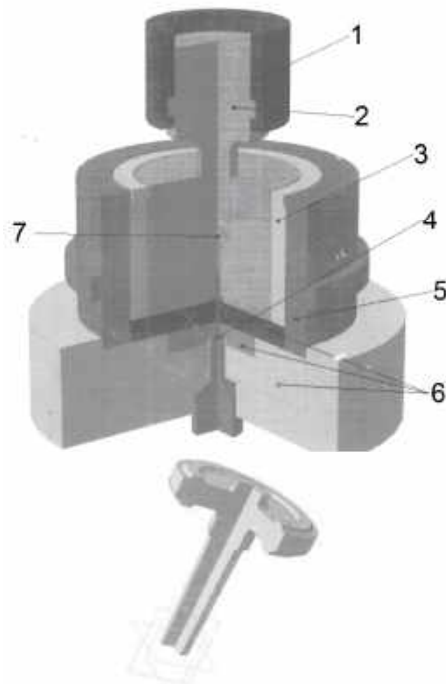


Рис. 14. Штамп для формоутворення поковки типу стрижень з фланцем

Штампи виготовлено зі сталі 5ХНМ. Їх деталі термічно оброблені на твердість: пуансони HRC 48, матриці HRC 47, виштовхувач HRC 45. Конструкція забезпечує зазор між торцем стрижня та виштовхувачем не менше 5 мм.

Штамп для формоутворення дискової фрези 7 (рис. 15) містить збірний пуансон 1 зі швидкознімною робочою частиною, збірно-бандажовану матрицю 2 зі вставкою 3, які закріплені на плиті 6, виштовхувач 4, що фіксується у нижньому положенні зворотною пружиною 5.

Робочі частини пуансона і матриці можна виконати зі сталі 4Х5В2ФС з термічною обробкою на HRC 48—52.

На рис. 16 зображено штамп для формоутворення поковки корпусу.

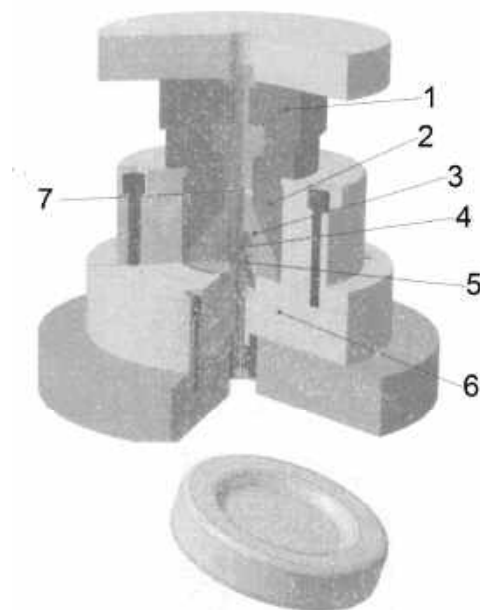


Рис. 15. Штамп для формоутворення поковки дискової фрези

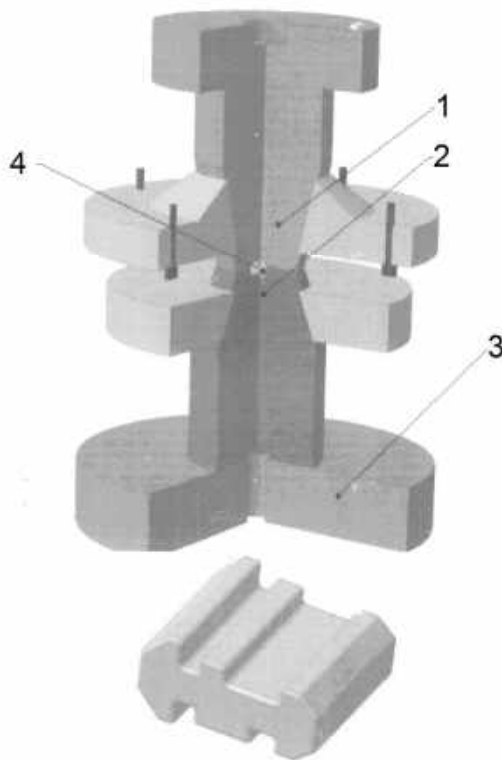


Рис. 16. Штамп для формоутворення поковки корпусу

## 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШТАМПУВАННЯ НА ІМПУЛЬСНОМУ ПРЕСІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТА ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ

### 2.1. Можливості пакета прикладних програм

Наведений нижче пакет прикладних програм призначено для розрахунку енергетичних характеристик, розрахунку заряду й уточнювального розрахунку параметрів технологічного процесу для осаджування і видавлювання при імпульсному штампуванні.

Методику орієнтовного та уточнювального розрахунків енергосилових параметрів високошвидкісного штампування наведено нижче.

В основу визначення енергії, необхідної для отримання номенклатури вибраних деталей, вибору способу і переходів штампування, покладено форму і розміри поковки.

Заготівельні рівчаки для поковок першої групи вибирають шляхом побудови розрахункової заготовки та її епюри перерізів за діаграмою границь використання заготівельних рівчаків і коефіцієнтів підкатки.

У деяких випадках ці розрахунки надто громіздкі, тому їх слід виконувати на ПЕОМ. Для цієї мети створено програму розрахунку, яку використовували у дипломному проектуванні для розрахунку параметрів деталей типу «Вал».

Для грубого розрахунку енергії можна скористатися методикою, аналогічною для розрахунку необхідної енергії для пароповітряних молотів подвійної дії, згідно з якою масу падаючих частин визначають за такими формулами:

– для круглих в плані поковок

$$m_0 = 5,6 \cdot 10^{-3} \sigma (1 - 0,0005 D_n) \left\{ 3,75 \left( \epsilon + \frac{D_n}{4} \right) (75 + 0,001 D_n^2) + D_n \left( \frac{\epsilon^2}{2} + \frac{\epsilon D_n}{4} + \frac{D_n^2}{50} \right) I_n \left[ 1 + 2,5 \frac{(75 + 0,001 D_n^2)}{D_n h_{об}} \right] \right\}; \quad (13)$$

– для поковок некруглої форми

$$m_0 = 5,6 \cdot 10^{-3} \sigma (1 - 0,0005 D_{3\epsilon}) \left\{ 3,75 \left( \epsilon + \frac{D_{3\epsilon}}{4} \right) (75 + 0,001 D_{3\epsilon}^2) + D_{3\epsilon} \left( \frac{\epsilon^2}{2} + \frac{\epsilon D_{3\epsilon}}{4} + \frac{D_{3\epsilon}^2}{50} \right) I_{сеп} \left[ 1 + 2,5 \frac{(75 + 0,001 D_{3\epsilon}^2)}{D_{3\epsilon} h_{об}} \right] \right\} \left( 1 + 0,1 \sqrt{\frac{I_{сеп}}{\epsilon_{сеп}}} \right), \quad (14)$$

де  $m_0, m_m$  – маса падаючих частин, кг;

$D_n$  – діаметр поковки, мм;

$\epsilon, h_{об}$  – відповідно ширина і висота містка облойної канавки, мм;

$D_{3\epsilon} = 1,13 \sqrt{F_n}$  – зведений діаметр некруглої у плані поковки, мм;

$I_{сеп} = \frac{F_n}{I_n}$  – середня ширина поковки, мм;

$\sigma$  – границя міцності матеріалу при температурі кування, Па.

Для відкритих штампів форму і розміри облойної канавки можна вибирати залежно від способу штампування і подальших обрізання облою та пробивання отвору.

У довідковій літературі детально описано конструктивні особливості заготівельних і штампувальних ривчаків молотових штампів, наведено основні розрахункові співвідношення і розміри, визначено їхнє положення на дзеркалі штампа.

## 2.2. Методика «грубого» розрахунку енергії деформування і розрахунок маси заряду

Знаючи швидкість руху верхнього штампа, роботу  $A$  деформування об'ємної заготовки можна розрахувати за формулою

$$A = \frac{G_{п.ч} V^2}{2}, \quad (15)$$

де  $V$  – швидкість, м/с;

$G_{п.ч}$  – вага падаючих частин устаткування для штампування, кг:

$$G_{п.ч} = 5,6 \cdot 10^{-3} \sigma (1 - 0,0005 D_{3\epsilon}) \left\{ 3,75 \left( I_o + \frac{D_{3\epsilon}}{4} \right) (75 + 0,001 D_{3\epsilon}^2) + D_{3\epsilon} \left( \frac{I_o^2}{2} + \frac{I_o D_{3\epsilon}}{4} + \frac{D_{3\epsilon}^2}{50} \right) I_n \left[ 1 + \frac{2,5 (75 + 0,001 D_{3\epsilon}^2)}{D_{3\epsilon} h_o} \right] \right\} \left( 1 + 0,1 \sqrt{\frac{I_n}{b_{сеп}}} \right), \quad (16)$$

де  $\sigma$  – тимчасовий опір розриву матеріалу поковки при температурі закінчення штампування;

$l_n$  – довжина поковки у плані, мм;

$l_o$  – ширина містка облойної канавки, мм;

$h_o$  – висота містка облойної канавки, мм;

$b_{сер}$  – середня ширина поковки у плані, мм:

$$b_{сер} = \frac{F_n}{l_n}; \quad (17)$$

$D_{зв}$  – зведений діаметр некруглої у плані поковки, мм:

$$D_{зв} = 1,13\sqrt{F_n}, \quad (18)$$

де  $F_n$  – площа поковки у плані, мм<sup>2</sup>.

Енергія, що міститься у заряді бризантної вибухової речовини,

$$W = Qm, \quad (19)$$

де  $Q$  – теплотворна здатність БВР, Дж/кг;

$m$  – маса заряду, кг.

ККД процесу  $\eta$  знаходять за формулою

$$\eta = \frac{A}{W} \cdot 100\%. \quad (20)$$

Відповідно, порівнюючи роботу з виділеною енергією, отримуємо

$$\frac{G_{п.ч}V^2}{2} = Qm\eta. \quad (21)$$

З формули (21) маємо

$$m = \frac{G_{п.ч}V^2}{2Q\eta} k, \quad (22)$$

де  $k$  відповідає кількості ударів у закритому штампі.

На рис. 17 наведено головне меню програми для розрахунку енергетичних параметрів вибухового преса, виконаної «грубим» розрахунком для круглої поковки.

### 2.3. Модуль «грубого» розрахунку технологічних параметрів при роботі на імпульсному пресі

У результаті «грубого» розрахунку програмою виконується визначення ваги падаючих частин, ваги заряду та необхідної роботи залежно від конструктивних особливостей заготовки.

Вхідні дані (наприклад, швидкість руху матриці, ККД тощо) необхідно коригувати для нової номенклатури протягом експериментальних досліджень.

На рис. 17 зображено меню для розрахунку технологічних параметрів залежно від конструктивних особливостей круглої поковки.

Аналогічні розрахунки виконують для некруглої у плані поковки. Меню роботи цього модуля наведено на рис.18.

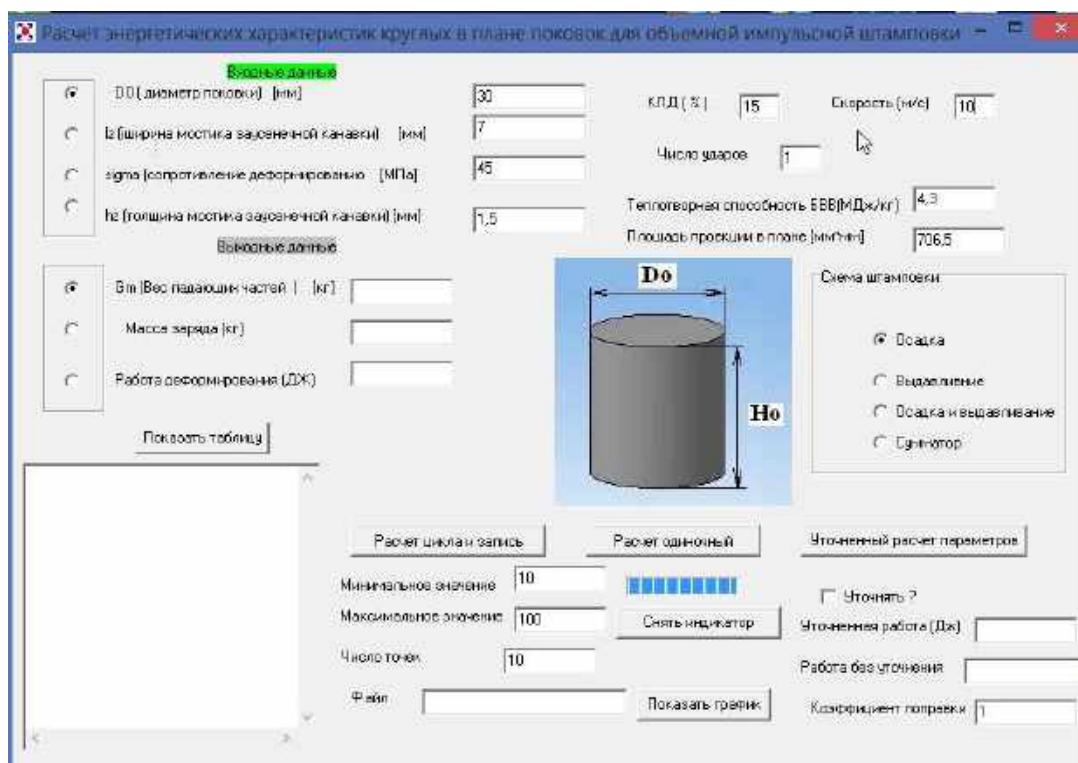


Рис. 17. Меню розрахунку технологічних параметрів залежно від конструктивних особливостей круглої поковки

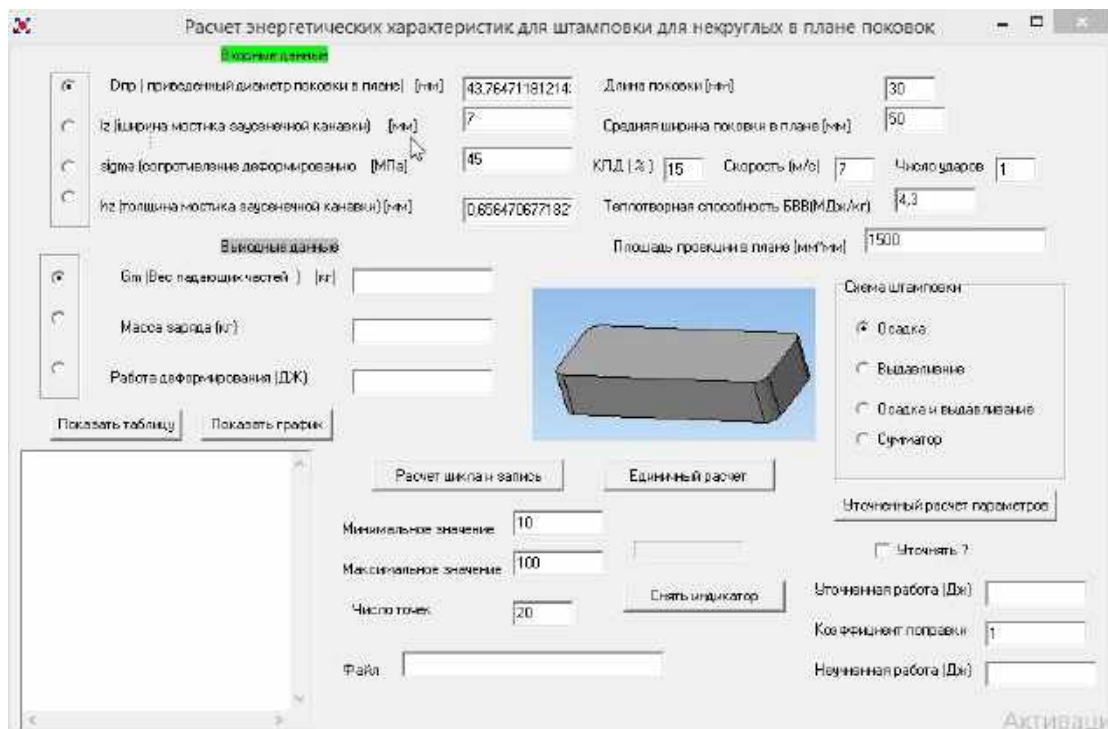


Рис. 18. Меню розрахунку технологічних параметрів залежно від конструктивних особливостей некруглої поковки

Результати розрахунків можна переглянути у графічному меню, яке наведено на рис. 19.

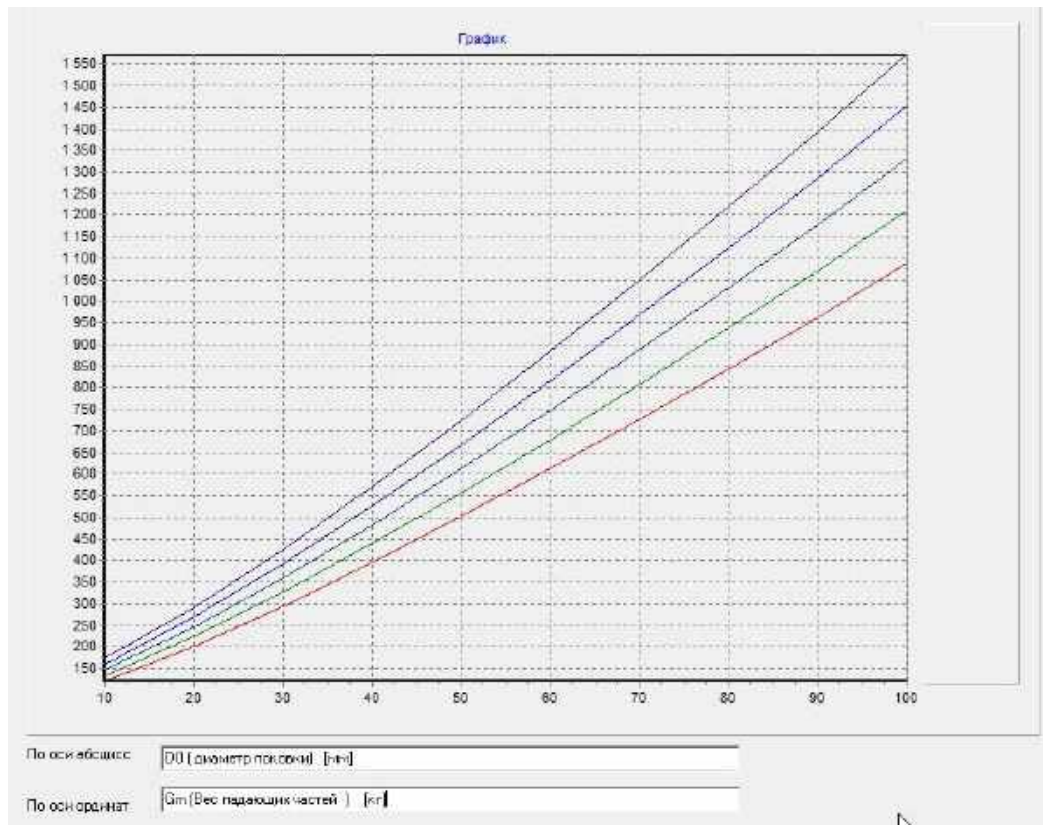


Рис. 19. Меню графічного відображення розрахунку технологічних параметрів залежно від конструктивних особливостей круглої поковки

## 2.4. Уточнювальна методика розрахунку енергосилових параметрів високошвидкісного штампування

### 2.4.1. Розрахунок роботи деформування

Методика орієнтовного й уточнювального розрахунків енергосилових параметрів високошвидкісного штампування. Як алгоритм вибрано розрахунок, аналогічний розрахунку параметрів для високошвидкісних молотів, оскільки швидкість деформування для штампування вибухом близька до швидкості деформування на високошвидкісних молотах.

Енергію деформування визначають за формулою

$$E_0 = keV \frac{1}{\varphi}, \quad (23)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує складність конфігурації поковки,  $k = 1,05 \dots 1,3$ .

ККД удару  $\varphi$  змінюється в межах  $0,66 \dots 0,95$ . При штампуванні з великим ходом формозмінення слід користуватися більшою величиною ККД, при «жорстких» ударах – меншою.



Питомі енергії деформування  $e$  для двох основних схем формозмінення – осаджування та видавлювання. При визначенні енергії видавлювання необхідно мати на увазі, що при розрахунку слід враховувати тільки об'єм частини заготовки, що видавлюється, об'єм частини заготовки, що знаходиться у контейнері та не підлягає деформуванню, не враховують. Якщо штампування відбувається за «змішаною» схемою, то енергію слід обчислювати по елементах, кожен з яких формується за однією з «чистих» схем, а результати підсумувати.

Пробне штампування слід починати зі значення енергії на 15...25 % менше, ніж розрахункове. При штампуванні наступних двох – чотирьох заготовок енергію збільшують, досягаючи оптимального виконання поковки.

## 2.4.2. Розрахунок енергосилових параметрів

Орієнтовна методика не враховує ряд практично діючих факторів: форму та розміри початкової заготовки, змінення кута конуса з заходом та сили інерції (при видавлюванні), які інколи мають суттєвий вплив на проходження процесу.

### 2.4.2.1. Штампування за схемою осадження

Екранну форму для розрахунку за схемою осадження наведено на рис. 20. Розрахункові формули для визначення енергії, зусилля та питомого зусилля деформування:

$$E_0 = a a_i V \delta_{сер}^\eta; \quad (24)$$

$$Q_{max} = 1,3 a a_i F_k \eta \delta_{сер}^{\eta-1}; \quad (25)$$

$$p_{max} = 1,3 a a_i \eta \delta_{сер}^\eta, \quad (26)$$

де  $\delta_{сер}$  — середній ступінь деформування:  $\delta_{сер} = 2,3 \lg \left( \frac{F_0}{F_k} \right)$ ;

1,3 – коефіцієнт, який враховує пікове підвищення зусиль у кінцевий момент штампування: у фазі виконання радіусів скруглень і видавлювання облою;

$a_i$  – добуток коефіцієнтів:  $a_i = a_1 a_2 a_3 a_4$ . Тут  $a_1$  пов'язаний з характерним розміром заготовки (рис. 21) і враховує тепловтрати (а отже, і опір деформуванню);  $a_2$  враховує співвідношення розмірів заготовки (рис. 22);  $a_3 = \frac{1}{\varphi} = 1,05...1,5$ ;  $a_4$  враховує складність конфігурації поковки:  $a_4 = 1,05...1,3$ .

Аналогічну форму для розрахунку невісесиметричних поковок наведено на рис. 18.

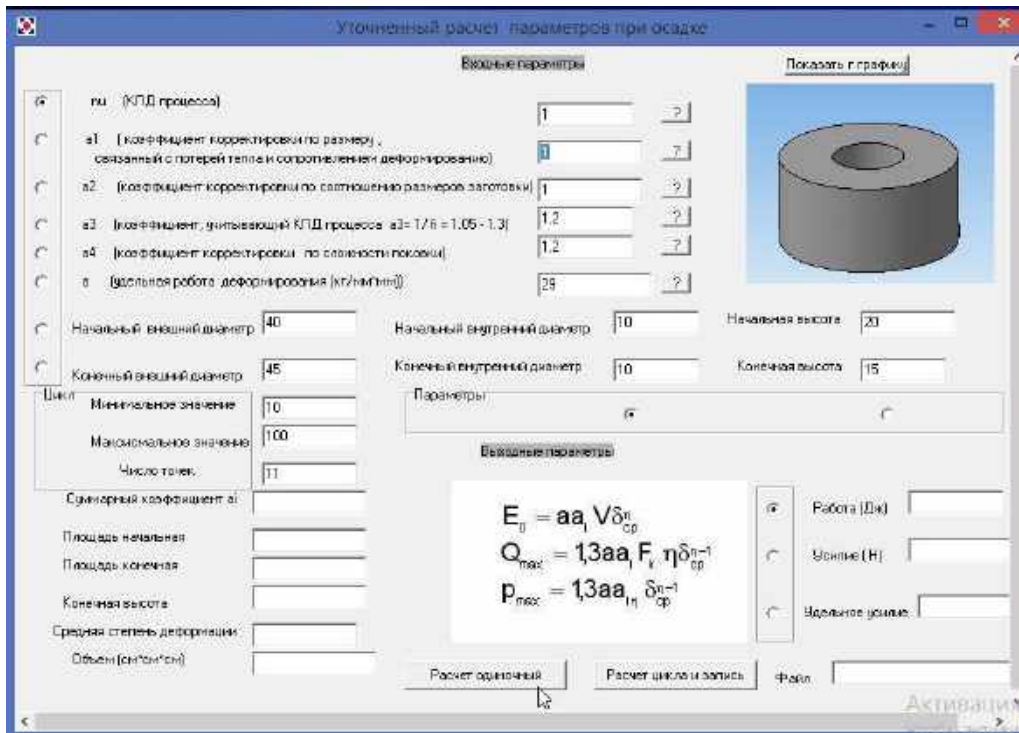


Рис. 20. Экранна форма для розрахунку вісесиметричних поковок за схему «Осадження»

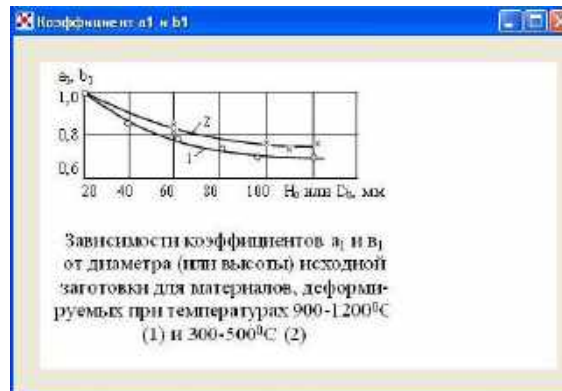


Рис. 21. Графіки залежності коефіцієнтів  $a_1$  і  $b_1$  від діаметра (або висоти) початкової заготовки для матеріалів, що деформуються при температурах 900...1200 °C і 300...500 °C



Рис. 22. Коефіцієнт  $a_2$  залежно від співвідношення розмірів початкової заготовки при осадженні

Параметри  $a$  і  $\eta$  наведено на рис. 23.

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$a_1, \text{кгс/мм}^2$	$\eta$	Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$a_1, \text{кгс/мм}^2$	$\eta$
АК6		28,6	1,11	1X13	20	95,2	1,18
		27,0			950	32,0	
		26,4			1050	27,4	
		17,0			1150	24,5	
Сталь 45	90	110	1,14	12X18H9T	20	115	1,22
	1000	31,3			950	38,5	
	1100	25,2			1050	32,8	
	1200	22			1150	31,0	
BT3-1	900	41,9	1,0	XH77TЮP	20	181	1,27
	950	30,5			950	94	
	1050	28,5			1050	72,5	
					1150	52	
BT8	950	36,8	1,0	Нимоник 80	1150	51	1,36
	1000	34,5					
	1050	30,3					
	1100	27,1					
30XГСА	950	33,6	1,13	Алюминий	20	16,8	1,21
	1050	28,3					
	1150	24,5					

Рис. 23. Таблица параметров  $a$  и  $\eta$

#### 2.4.2.2. Штампування за схемою видавлювання

Видавлювання відбувається у два послідовні етапи: запресування (осадження) і власне видавлювання.

Робота запресування

$$A_1 = 0,06 a a_1 a_2 V, \quad (27)$$

де 0,06 – ступінь деформування, який визначається величиною зазору, що забезпечує зручність укладання заготовки у штамп, приблизно постійний в усіх випадках.

Робота, необхідна для видавлювання:

$$A_2 = b b_i \frac{V_k}{\xi} \left( 1 + \frac{m_k}{M} \alpha \right), \quad (28)$$

где  $b_i = b_1 b_2 b_3 b_4 b_5$  – добуток коефіцієнтів;

$b_1 = a_1$  – характерний розмір початкової заготовки (рис. 24);

$b_2$  – співвідношення розмірів початкової заготовки (рис. 25);

$b_3 = a_3 = 1,05 \dots 1,5$ ;

$b_4 = 1,0 \dots 1,3$  – складність конфігурації поковки;

$b_5$  – враховує вплив кута конуса з заходом (рис. 26).

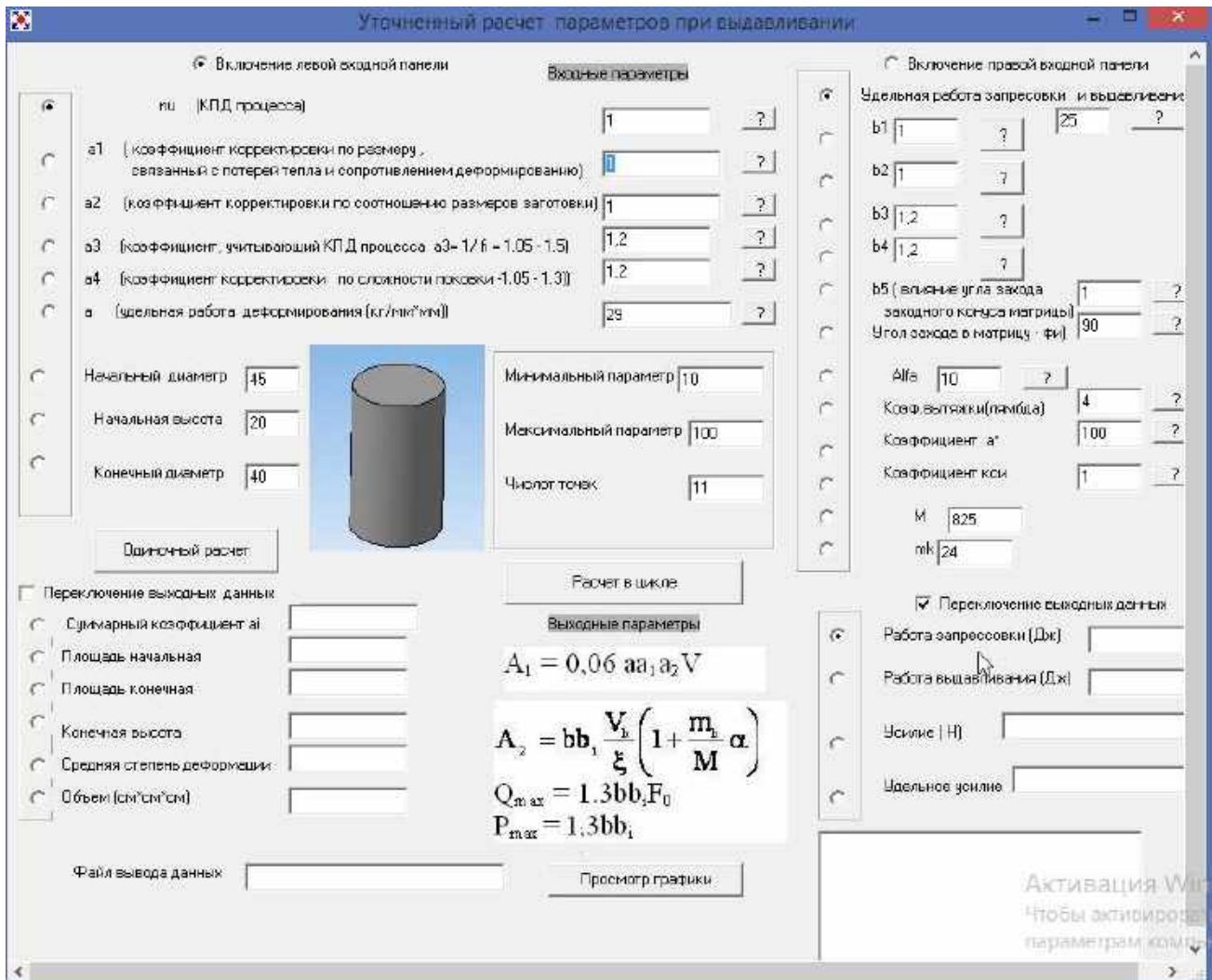


Рис. 24. Форма для розрахунку параметрів вісесиметричних поковок при видавлюванні



Рис. 25. Коэффициент  $b_2$  залежно від співвідношення розмірів початкової заготовки при видавлюванні

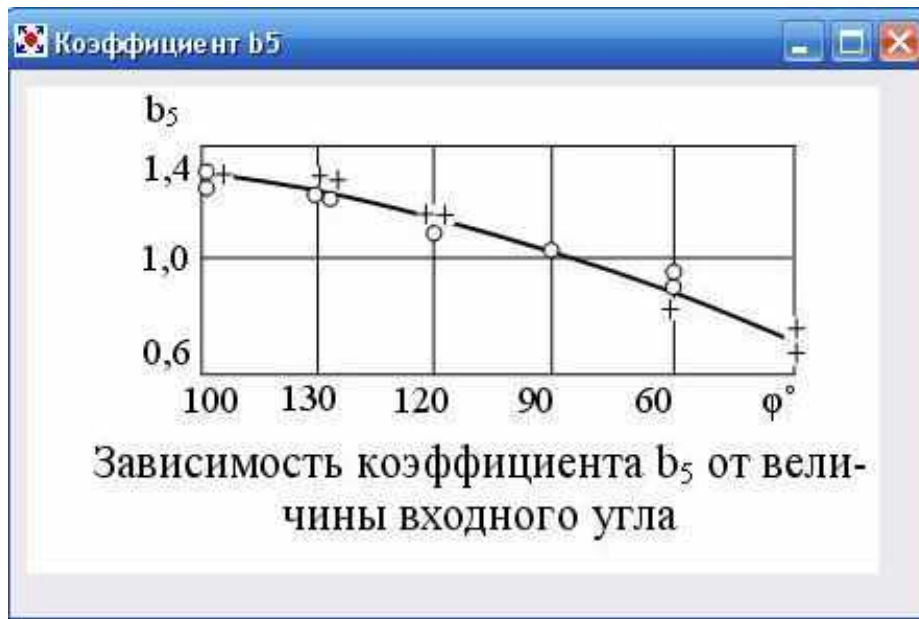


Рис. 26. Коэффициент  $b_5$  залежно від величини входного кута матриці  
Значення параметрів  $b$  і  $\xi$  наведено на рис. 27, а  $\alpha$  – на рис. 28.

Параметры  $b$  и  $\xi$  для типовых металлов (выдавливание)

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$\xi$	$b$ (кг/мм <sup>2</sup> ) при коэффициенте вытяжки, $\lambda$												
			1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
Сталь 45	1000	1,0	28	41	53	59	64	66	69	71	73	75	77	80	84
	1100		20	28	38	43	49	52	55	58	59	61	64	66	69
	1200		18	24	31	35	39	41	43	44	45	46	48	51	53
АК6	20	1,0	30	40	51	56	61	64	67	70	72	74	77	81	85
	150		26	35	43	46	50	52	54	55	56	58	59	61	64
	250		21	29	38	42	45	46	47	48	48	49	50	51	53
	350		14	20	25	28	30	31	32	33	34	35	36	37	39
ВТЗ-1	800	0,88	28	42	58	64	71	74	77	80	81	83	86	88	91
	900		25	32	40	44	47	48	49	49	50	51	51	51	52
	1000		23	29	36	39	41	43	44	45	45	46	46	47	48
30ХГСА	1000	1,0	19	32	46	47	55	64	65	67	68	69	71	73	75
	11100		18	28	41	46	54	62	63	66	68	71	74	77	82
	1200		18	28	41	45	47	50	51	52	53	54	55	56	56
12Х18Н9Т	1000	1,06	27	41	58	64	68	70	72	73	75	77	79	81	83
	1100		21	34	47	55	60	64	67	69	72	74	77	81	85
	1200		19	30	42	46	49	50	51	52	53	54	55	56	57

Рис. 27. Значення параметрів  $b$  і  $\xi$  для типових матеріалів

Якщо поковка має декілька елементів, які формуються видавлюванням, то роботу  $A_2$  визначають для кожної частини, а повну енергію штампування – за такою формулою:

$$E_0 = A_1 + \sum A_2. \quad (29)$$

При розрахунку силових параметрів видавлювання можливі два випадки.

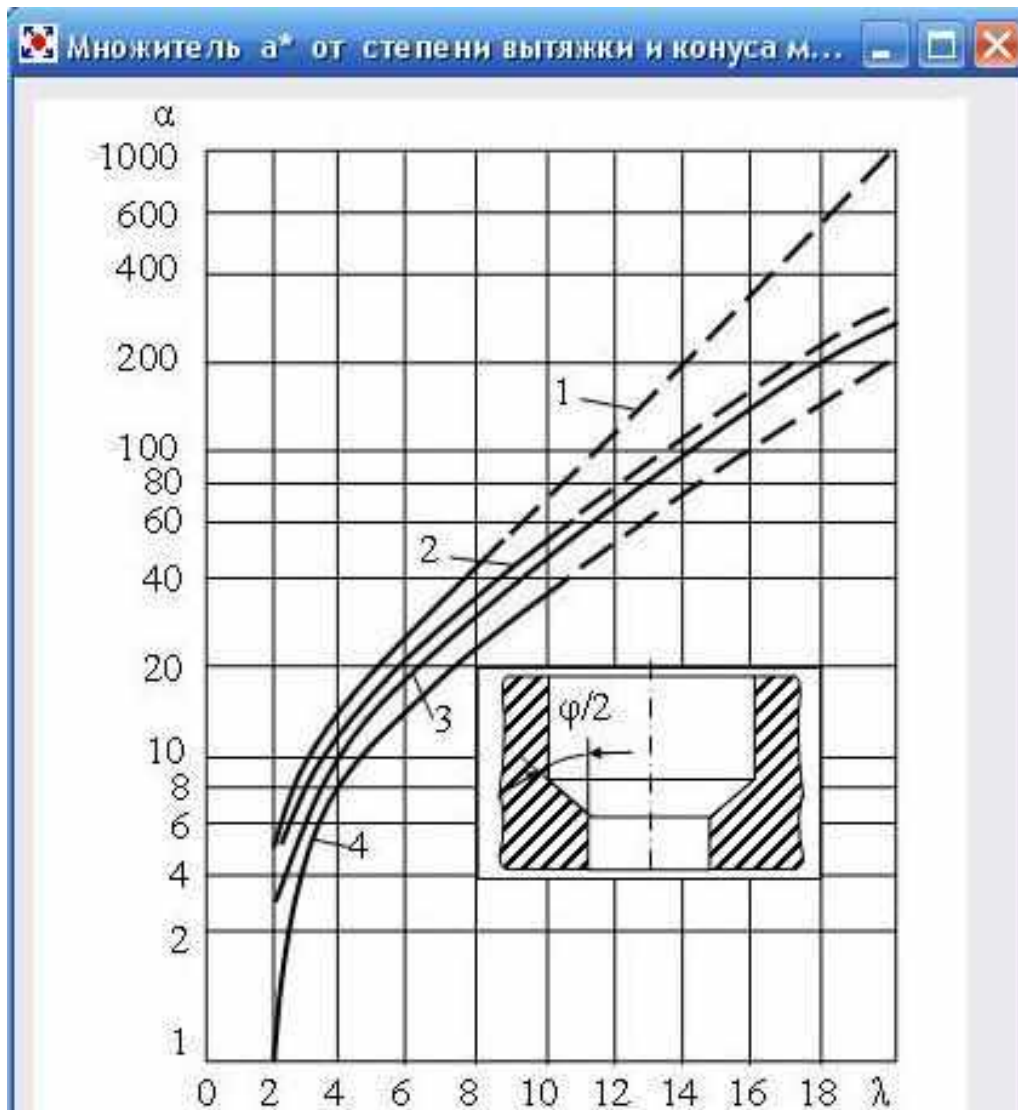


Рис. 28. Графіки залежності множника  $\alpha$ , який визначає динамічну складову питомого зусилля при вісесиметричному видавлюванні, від коефіцієнта витяжки при куті конуса з заходом  $180^\circ$  (1),  $120^\circ$  (2),  $90^\circ$  (3),  $60^\circ$  (4)

1. Гравюра штампа заповнюється повністю. При цьому найбільші зусилля розвиваються у момент виконання радіусів скруглення та витікання облою, тоді

$$Q_{max} = 1,3bb_j F_0; \quad (30)$$

$$p_{max} = 1,3bb_j. \quad (31)$$

2. Поковку і штамп спроектовано при частково незаповненій гравюрі (наприклад, стрижень, що видавлюється, не повинен досягати виштовхувача). У цьому випадку найбільші зусилля будуть на початку процесу, коли інерційна складова максимальна:

$$Q_{max} = bb_j F_0 \left( 1 + 2 \frac{m_k}{M} \alpha \right); \quad (32)$$

$$p_{max} = bb_i \left( 1 + 2 \frac{m_k}{M} \alpha \right). \quad (33)$$

За наявності декількох елементів, що видавлюються, силові параметри розраховують для тієї частини, яка формується з найбільшою витяжкою.

На рис. 29 наведено форму для розрахунку параметрів для несиметричної поковки.

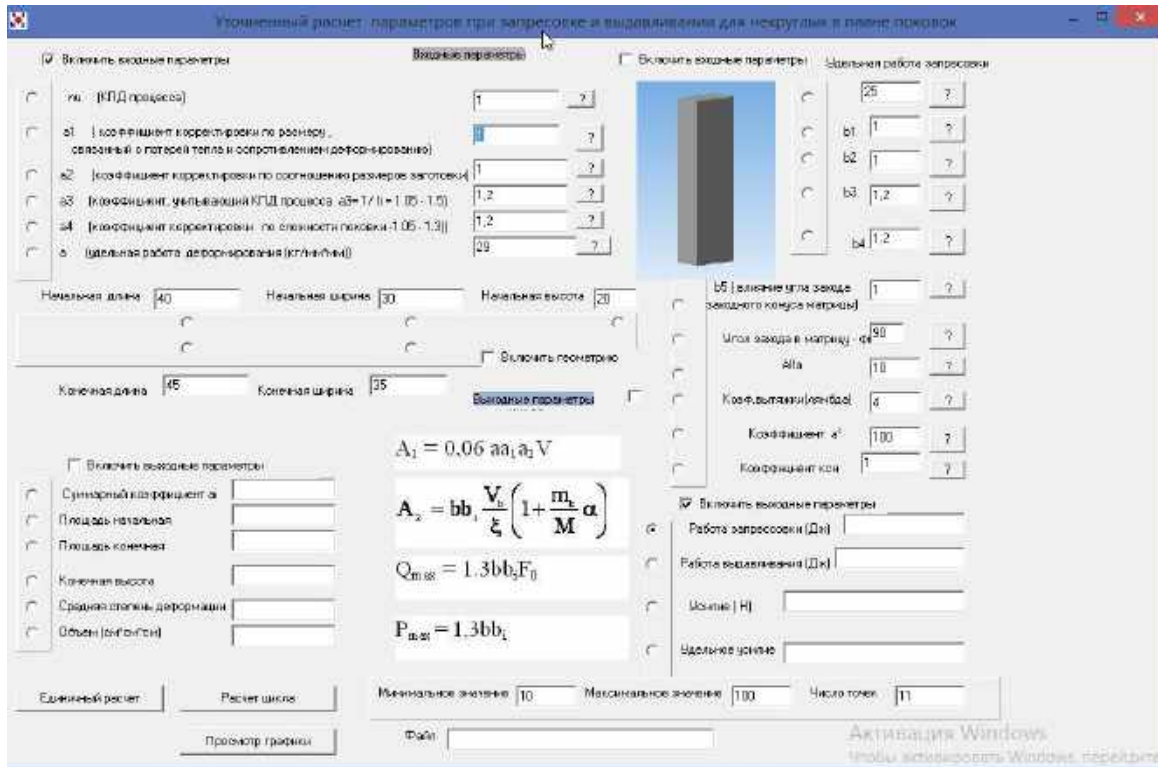


Рис. 29. Форма для розрахунку параметрів невісесиметричних поковок при видавлюванні

### 2.4.2.3. Штампування за схемою осадження з видавлюванням

Розрахунок енергії проводять з розчленуванням поковки на елементи та подальшим підсумовуванням робіт формозмінення по кожному з них.

Силові параметри визначають для елемента, який формується з найбільшим обтисненням.

## 2.5. Розрахунок наявної енергії

Наявна енергія

$$E_P = \frac{E_0}{\text{ККД}}, \quad (34)$$

де  $E_0$  – робота деформування.

Розрахунок ККД достатньо громіздкий і складний. На сьогоднішній день не існує точної схеми розрахунку. Завдяки дослідженням було отримано значення ККД = 30 %, що є прийнятним для розглядуваного випадку, тому

$$E_p = \frac{E_0}{0,3}. \quad (35)$$

## 2.6. Розрахунок величини заряду

Величину заряду розраховують за формулою

$$g = \frac{E_p}{q}, \quad (36)$$

де  $q$  – теплотворна здатність БВР.

Теплотворна здатність для амоніту № 6ЖВ дорівнює 1025 ккал/кг. Перед розрахунком необхідно перевести вимірювання у систему СІ:

1 кал = 4,1868 Дж, звідки  $q = 1025 \cdot 10^3 \cdot 4,1868 = 4291470 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

## 2.7. Приклад розрахунку параметрів стрижня з фланцем

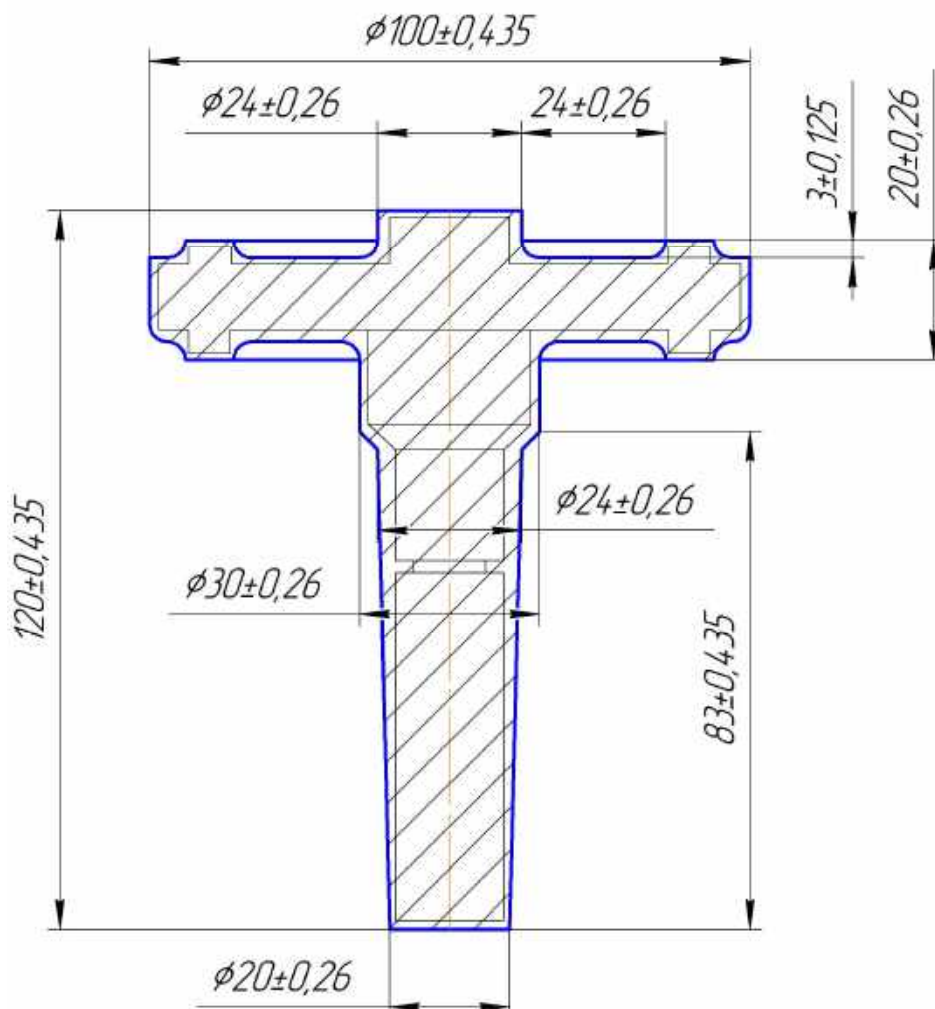


Рис. 30. Поковка

Матеріал – 07X16Н6, температура нагрівання у печі – 1000 °С, початкова заготовка:  $H_0 = 120$  мм,  $D_0 = 100$  мм.

Після внесення усіх параметрів і коефіцієнтів заготовки у програму, виконують розрахунки, наведені на рис. 31, 32.



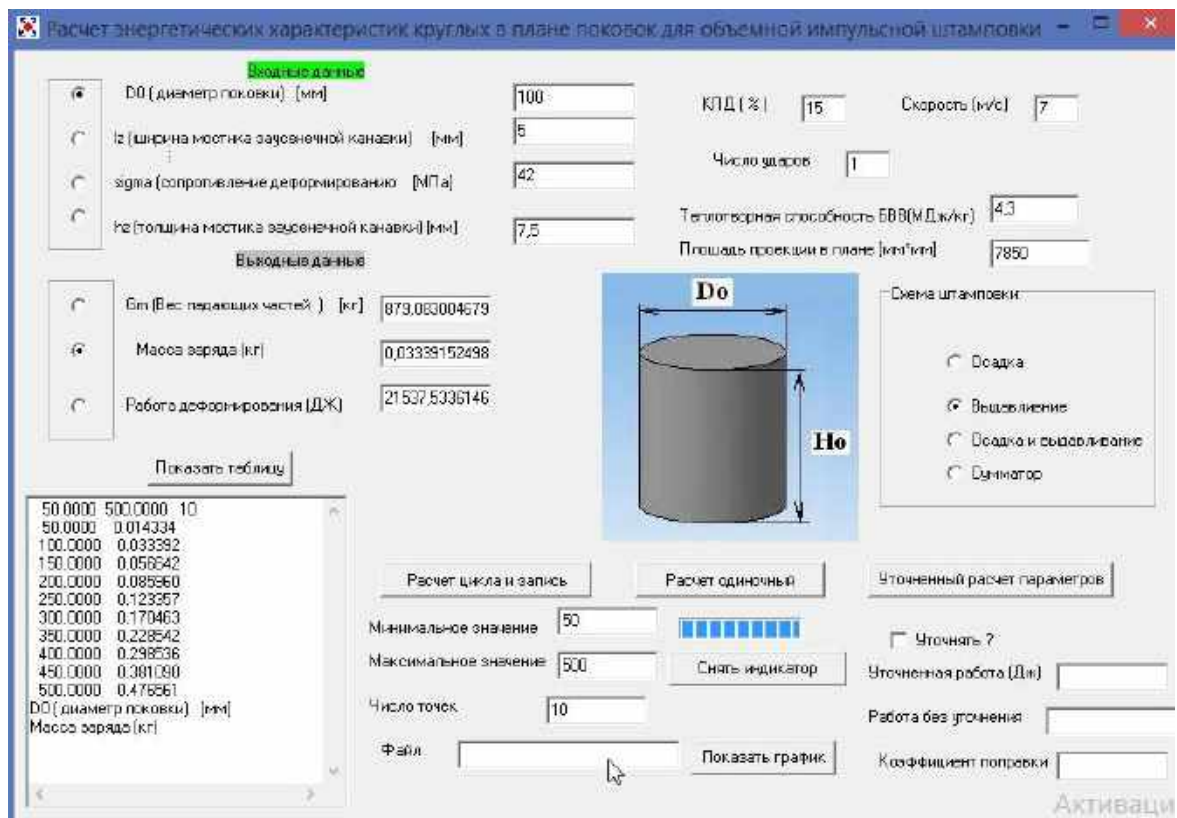


Рис. 31. Результаты розрахунку енергетичних характеристик

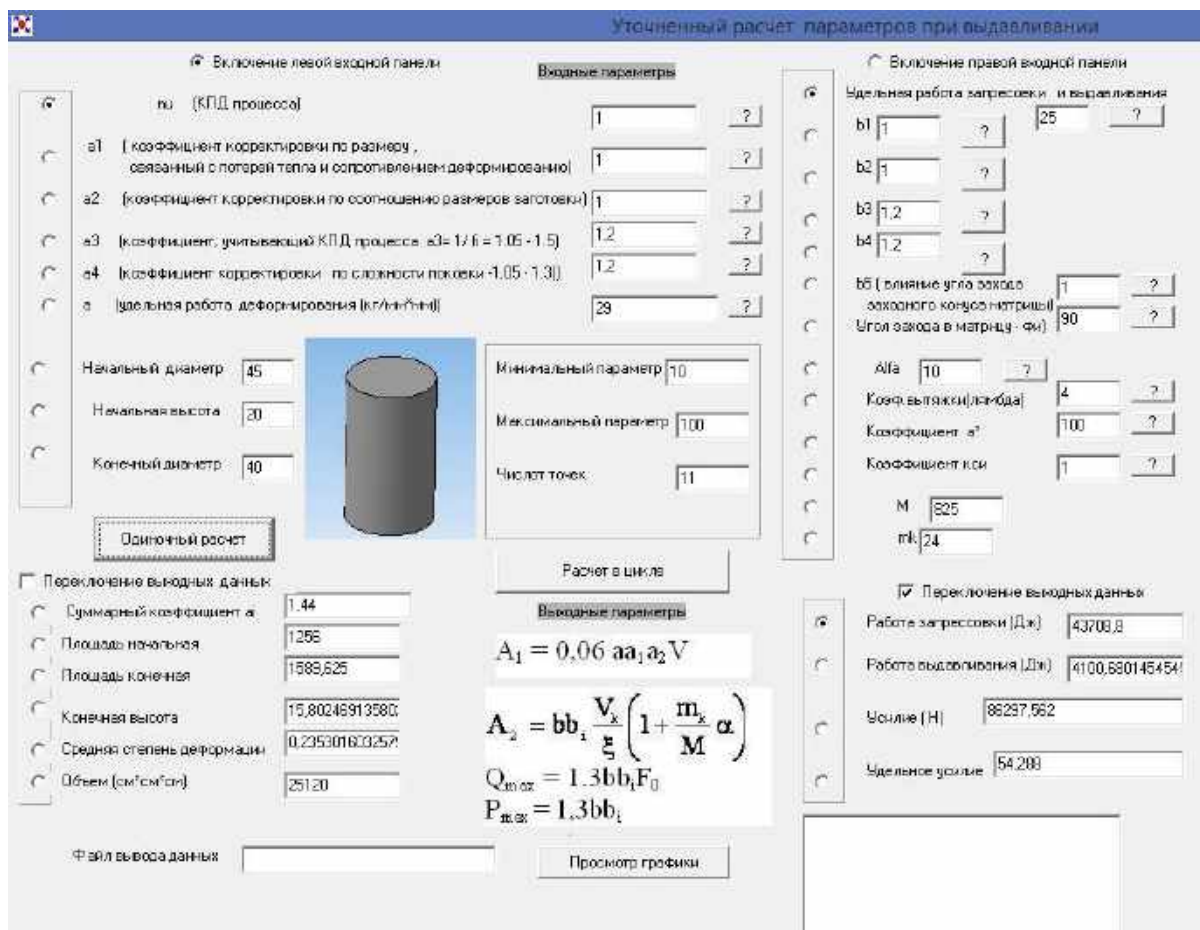


Рис. 32. Результаты уточняющего розрахунку параметрів поковки при видавлюванні

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

При проектуванні технічних об'єктів можна виділити дві основні групи процедур: аналіз і синтез. Для синтезу характерне використання структурних моделей, для аналізу – використання функціональних моделей. У САПР аналіз виконується математичним моделюванням. Математичне моделювання – процес створення моделі з метою отримання відомостей про реальний об'єкт. Альтернативою математичного моделювання є фізичне макетування, але у математичного моделювання є ряд переваг: менші терміни на підготовку аналізу; значно менша матеріаломісткість, особливо при проектуванні великогабаритних об'єктів; можливість виконання експериментів на критичних режимах, які привели б до руйнування фізичного макета, та ін.

Моделювання більшості технічних об'єктів можна виконувати на мікро-, макро- та метарівнях, що відрізняються ступенем деталізації розгляду процесів в об'єкті.

Математичною моделлю технічного об'єкта на мікрорівні є система диференціальних рівнянь в частинних похідних, що описує процеси в суцільному середовищі із заданими крайовими умовами, але точне її розв'язання вдається отримати лише для окремих випадків, тому перше завдання, що виникає при моделюванні, полягає у побудові наближеної дискретної моделі. Для цього використовують методи скінченних різниць і інтегральних граничних рівнянь, одним з варіантів останнього є метод граничних елементів. Оскільки апроксимуюча система алгебраїчних рівнянь, що отримується при дискретизації простору, має високий порядок, то при моделюванні досить складних технічних об'єктів доводиться приймати ряд припущень і спрощень.

Нині метод скінченних елементів (МСЕ) є одним з найбільш популярних методів вирішення крайових задач в САПР. У математичному відношенні метод належить до групи варіаційно-різницевих. Строгий доказ таких важливих властивостей, як стійкість, збіжність і точність методу, наведено у відповідних розділах математики і часто являє собою непросту проблему.

Проте МСЕ активно розвивається, з його допомогою без строгого математичного обґрунтування використовуваних прийомів успішно вирішуються складні технічні проблеми. Правильність же роботи створених алгоритмів і програм, що реалізують МСЕ, перевіряють на відомих точних рішеннях. Почавши розвиватися як метод вирішення завдань будівельної механіки, МСЕ швидко завоював такі сфери інженерної діяльності, як проектування літаків і автомобілів, космічних ракет, теплових і електродвигунів, турбін, теплообмінних апаратів та ін.

До основних переваг МСЕ належать доступність і простоту його розуміння і застосовність методу для задач з довільною формою області рішення, можливість створення на основі методу високоякісних універсальних програм для ЕОМ.

В МСЕ вихідна область визначення функції розбивається за допомогою сітки, у загальному випадку нерівномірної, на окремі ділянки – скінченні елементи. Шукана безперервна функція апроксимується кусково-неперервною, визначеною на множині скінченних елементів. Апроксимація може задаватися довільним чином, але частіше за все для цих цілей використовують поліноми, які вибираються таким чином, щоб забезпечити безперервність шуканої функції у вузлах на межах елементів.

Аналогічний підхід може бути і у випадках дво- і тривимірних областей визначення шуканої функції.

Для двовимірних областей найчастіше використовують елементи у формі трикутників і чотирикутників. При цьому елементи можуть мати як прямолінійні, так і криволінійні межі, що дозволяє з достатнім ступенем точності апроксимувати межу будь-якої форми.

Для тривимірних областей найпоширенішими є елементи в формі тетраедра і паралелепіпеда, які також можуть мати прямолінійні та криволінійні межі.

### 3.1. Визначення деформувальних зусиль

Активне зусилля, яке розвивається робочою машиною на інструменті у напрямку його руху, у кожен момент деформування дорівнює опору, який чинить метал деформуванню. Це активне зусилля і є тим деформувальним зусиллям, за величиною якого вибирають необхідну машину для оброблення тиском. Деформувальне зусилля може передаватися металу або шляхом безпосереднього контакту з інструментом, що тисне на нього, або тиском ділянок металу, які примикають до осередку деформації та не деформуються.

Таким чином, щоб визначити величину деформувального зусилля, необхідно знати величину і розподіл напружень на поверхні контакту осередку деформації і величину площі цієї поверхні (рис. 33).

Схема, наведена на рис. 33, ілюструє загальний випадок операції оброблення тиском контактної поверхні  $AB$ , на яку діє активне зусилля у напрямку руху інструменту по стрілці  $C$ , розподіл нормальних напружень наведено епюрою " $a\sigma$ ". Нормальне елементарне зусилля  $dP_H$ , яке діє на елементарній ділянці  $dF_K$ , визначають як

$$dP_H = \sigma_H dF_K. \quad (37)$$

У напрямку руху інструменту на деформівний метал діє складова елементарного зусилля

$$dP = \sigma_H dF_K \cos \alpha, \quad (38)$$

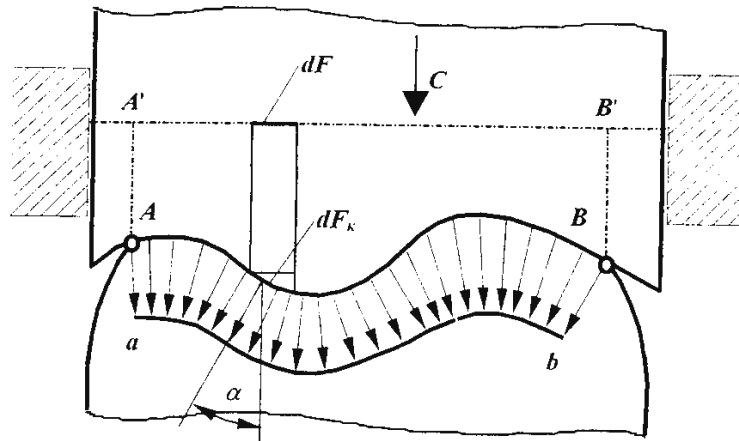


Рис. 33. Схема визначення деформувального зусилля

де  $\alpha$  – кут між напрямком нормального напруження  $\sigma_H$  і напрямком руху інструменту  $C$ .

Добуток  $dF_k \cos \alpha$  є площиною  $dF$  елементарної ділянки контактної поверхні  $dF_k$  на площину, перпендикулярну до напрямку руху інструменту. Таким чином, вираз (38) матиме вигляд

$$dP = \sigma_H dF. \quad (39)$$

Деформувальне зусилля  $P$  визначають інтегруванням:

$$P = \iint_F \sigma_H dF, \quad (40)$$

де  $\sigma_H$  – нормальне напруження на контактній поверхні;

$F$  – проекція контактної поверхні інструменту на площину, перпендикулярну до напрямку руху інструменту.

Вираз (40) можна записати у прямокутних координатах

$$P = \iint_F \sigma_H dx dy \quad (41)$$

та у циліндричних

$$P = \iint_F \sigma_H \rho \cdot d\rho d\theta. \quad (42)$$

На практиці  $\sigma_H$  часто є функцією однієї координати, тому необхідності у подвійному інтегруванні не виникає. В окремих випадках нормальне напруження на контактній поверхні можна вважати постійною величиною, тому деформувальне зусилля визначають за простим виразом

$$P = \sigma_H F. \quad (43)$$

Цей вираз відповідає відомому положенню гідравліки, згідно з яким «сума проєкцій (на будь-яку вісь) тисків, що сприймаються криволінійною стінкою, дорівнює тиску, помноженому на проєкцію стінки на площину, перпендикулярну до зазначеної осі». Цей принцип щодо оброблення металів

тиском уперше було розглянуто І. М. Павловим та узагальнено С. І. Губкіним.

Геометричний зміст інтеграла (40) полягає в тому, що його числове значення являє собою об'єм епюри розподілу нормальних напружень по площині контакту, побудованої на площині, перпендикулярній до руху інструменту. Іншими словами, дуже часто з достатньою для практичних цілей точністю можна замінити обчислення подвійного інтеграла по поверхні обчисленням об'єму епюри нормальних напружень з використанням формул елементарної геометрії.

Питомий тиск деформування отримуємо діленням деформувального зусилля  $P$  на відповідну площу, тобто

$$q = \frac{P}{F} = \frac{\iint \sigma_n dF}{F}. \quad (44)$$

Знання питомого зусилля деформування дає можливість визначити деформувальне зусилля для формозмінення заготовки будь-якої геометрії, а потім вже за значенням повного деформувального зусилля вибрати необхідне для виконання технологічного процесу деформування устаткування.

Таким чином, визначення питомого зусилля деформування є основною задачею силового аналізу процесів оброблення металів тиском, а для визначення питомого зусилля необхідно знати розподіл нормальних напружень по поверхні заготовки, яка сприймає деформувальне зусилля.

Для встановлення величини і розподілу напружень в обробленні металів тиском користуються різними, не взаємно виключними методами аналізу технологічних процесів:

- метод сумісного розв'язання диференціальних рівнянь рівноваги та рівняння пластичності;
- метод характеристик (ліній ковзання);
- метод опору металу пластичним деформаціям;
- метод робіт з використанням варіаційних принципів.

У теперішній час найчастіше використовують перший метод.

Хоча метод сумісного розв'язання наближених рівнянь рівноваги з урахуванням умови пластичності часто не відрізняється математичною строгістю і принципово не придатний для визначення розподілу напружень по об'єму деформованого тіла. Він дозволяє отримувати рівняння залежності питомих зусиль від різних факторів і в кінцевому підсумку з достатньою для практичних цілей точністю вибрати необхідне устаткування для виконання технологічного процесу деформування.

Зупинимось коротко на можливостях методу розв'язання диференціальних рівнянь рівноваги сумісно з рівнянням пластичності для різних видів напруженого стану.

При об'ємному напруженому стані маємо три рівняння рівноваги з шістьма невідомими і умову пластичності з тими самими невідомими. Таким чином, задача двічі статично невизначувана. За аналогією з теорією пружності додатково використовуємо ще три рівняння зв'язку між напруженнями і деформаціями і шість рівнянь нерозривності деформацій, які вносять додаткові нові невідомі (шість деформацій і модуль пластичності). У результаті отримуємо тринадцять рівнянь з тринадцятьма невідомими.

При вісесиметричному напруженому стані, яке є окремим випадком об'ємного напруженого стану, маємо два рівняння рівноваги з чотирма невідомими та умовою пластичності, яка включає ті самі невідомі. Задача статично невизначувана і для її розв'язання використовуємо рівняння зв'язку між деформаціями і напруженнями, а також рівняння сумісності деформацій. Усього отримуємо вісім рівнянь з вісьмома невідомими. Задача статично визначувана і її розв'язання є можливим.

Для плоского напруженого і плоского деформованого станів маємо два рівняння рівноваги і умову пластичності. Усього маємо три рівняння з трьома невідомими. Хоча задача статично визначувана, однак система рівнянь має точні замкнуті рішення тільки для окремих випадків, наприклад у випадку, коли дотичні напруження на контурі дорівнюють нулю.

Стосовно точного вирішення задач силового аналізу технологічних процесів оброблення металів тиском слід зробити суттєве зауваження. При сучасному стані рівня розвитку обчислювальної техніки можна звести вирішення цих задач до заданого ступеня точності і отримати дуже точне значення величини деформування зусилля. Але «точне знання деформування зусилля» суперечить ДСТУ, який регламентує випуск устаткування для оброблення металів тиском, а також практичним вимогам виробництва – мати у своїх цехах достатній ряд одиниць устаткування, яке відрізняється потужністю, але забезпечує необхідну гнучкість і мобільність виробництва. Останній фактор на практиці часто є вирішальним.

Точно визначити величини потрібного зусилля деформування, а також роботи деформації необхідно у тому випадку, коли енергію, яку направлено на деформування металічної заготовки, можна плавно дозувати у часі, наприклад при електрогідравлічному і магнітно-імпульсному штампуванні, що не можна беззаперечно сказати про штампування вибухом.

Сьогодні у більшості випадків доцільно користуватися спрощеними методами розрахунку. Схему одного з них можна подати таким чином:

- задачу необхідно звести до вісесиметричної або плоскої. За необхідності деформівну заготовку розділяють на ряд ділянок, для яких виконуються умови прийнятої схеми спрощення;

- диференціальні рівняння рівноваги, взяті за формою і координатами, які відповідають умовам задачі, спрощують. У результаті спрощень кількість рівнянь рівноваги можна скоротити до одного.

Умову пластичності також використовують наближену. У більшості випадків для практичних цілей можна користуватися умовою пластичності Треска – Сен-Венана, не звертаючись до більш точної енергетичної умови пластичності Губера – Мізеса – Генки.

### **3.2. Вибір програмного рішення моделювання процесу об'ємного штампування**

Об'ємне штампування – одна з самих прогресивних технологій отримання заготовок, а в ряді випадків і готових деталей виробів машинобудування, приладобудування, радіоелектронних і обчислювальних засобів.

За даними приладобудівних і машинобудівних підприємств до 75 % заготовок і деталей виготовляють методами штампування.

Специфічною особливістю процесу штампування є висока вартість інструменту – штампів. Цей фактор висуває особливо жорсткі вимоги до якості розроблення технологічних процесів. Під час роботи штампи зазнають великих напружень, що спричиняються під дією деформувальних зусиль, які розвиваються машиною (молотом, пресом). Нагрівання робочих частин штампа у процесі експлуатації до температур відпуску різко знижує їх стійкість.

Для визначення стійкості штампів і оптимізації процесів штампування існує потреба у дослідженні його напружено-деформованого стану. В останній час широкого поширення набули пакети програм, основані на ідеології методу скінченних елементів, які дозволяють моделювати процеси гарячого штампування.

У сучасному машинобудівному (авіадвигунобудівному) виробництві постійно виникає необхідність у виготовленні нових видів продукції, де використовуються все більш досконалі й складні деталі. Поява нової нетипової номенклатури завжди породжувала складності у інженерів і технологів заводів не тільки при запуску виробництва, але й на етапах розробки. З огляду на складні параметри продукції, що виготовляється, навіть самі досвідчені технологи не можуть абсолютно точно проаналізувати заздалегідь правильність усього розробленого технологічного процесу. Особливо гостро ця проблема стоїть в області оброблення металів тиском, а саме для об'ємного штампування.

Використання сучасних пакетів програм для проектування технологій різних видів виробництв в основному орієнтовано на зменшення термінів підготовки виробництва, налагодження технології, а також мінімізації фінансових витрат. Проектування технологічних процесів у сучасних CAD/CAM/CAE дозволяє також скоротити витрати, які можуть з'явитися під час виробництва, оскільки зараз можна більш точно прогнозувати дефекти різного роду, пов'язані з недоопрацюванням технології.

Аналізуючи періодичну літературу, можна з упевненістю сказати, що збільшився інтерес до CAE-систем в області оброблення металів тиском

як до надійного засобу, за допомогою якого можна за оптимально короткий час проектувати технологічні процеси будь-якої складності. Однак ще на багатьох підприємствах поки не впроваджують у процес проектування сучасні CAE-системи або через високу вартість програмних продуктів, або просто нехтуючи сучасними досягненнями в області технології «на завтра». Але цей процес неминучий і у найближчому майбутньому інтегровані CAD/CAM/CAE-системи займуть своє місце у процесі проектування і підготовки виробництва, а ті хто цього не зробив, можуть просто втратити ринок.

Прагнення технолога ковальсько-пресового виробництва без проведення експерименту на основі розрахунку визначити необхідне деформувальне зусилля, розрахувати потрібну кількість переходів отримання поковки заданої форми, граничне формозмінення без руйнування деформівного матеріалу отримати початкові дані для розрахунку на міцність і стійкість деформувального інструменту, а також технологічні параметри здебільшого можуть бути здійснені завдяки використанню сучасних спеціалізованих програмних засобів. На сьогодні для вирішення конкретних технологічних задач кування і штампування пропонуються різні комп'ютерні програми. Загально визнаними лідерами у цьому напрямку вважаються американські компанії SFTC з системою DEFORM та MSC з системою Autoforge/Superforge, французька компанія TRANVALOR з системою FORGE і російська компанія "Квантор-Софт" з системою QForm.

Вибір програмного рішення для моделювання ґрунтувався на порівнянні можливостей зазначених програмних комплексів.

### **3.3. Моделювання процесу об'ємного штампування у DEFORM-2D/3D**

Для визначення необхідної енергії деформування, а також відстеження дефектів виконували комп'ютерне моделювання процесу штампування для відібраних деталей. Програмне рішення було вибрано у підрозд. 3.2, ним є програмний продукт DEFORM-2D/3D.

Початкові дані для моделювання:

- конструкція штампа;
- геометрія початкової заготовки;
- криві зміцнення матеріалу кожної деталі;
- криві питомої теплопровідності і теплоємності;
- умови тертя (закон Кулона);
- характеристики устаткування (навантаження);
- температура.

Схематично постановку і вирішення задачі можна подати графічно (рис. 34). Розглянемо моделювання процесу штампування заготовки «шестірня ведуча». Це вісесиметрична задача і її можна розглядати у двовимірній постановці у модулі DEFORM-2D.



За кресленням заготовки (з урахуванням розширення матеріалу при нагріванні) спроектований штамп було виконано у середовищі SolidWorks та імпортовано у DEFORM PreProcessor у вигляді верхньої і нижньої матриць. Геометрію початкової заготовки отримано за допомогою вбудованих примітивів. Попереднє моделювання показало, що наявність у верхній частині заготовки радіуса скруглення більше 0,5 мм призводить до появи «складки» у верхній частині деталі. Тому заготовку було змінено (зменшено радіус у верхній частині).

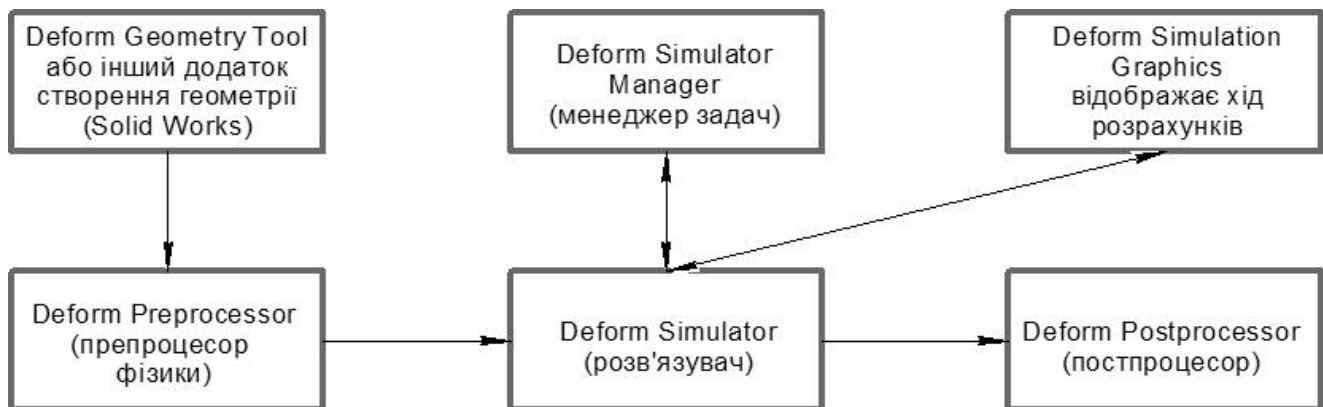


Рис. 34. Схема постановки і вирішення задачі з використанням пакета DEFORM

Моделювання штампування шестірні було розділено на такі етапи:

- нагрівання заготовки у печі протягом 40 хвилин (розрахунок теплообміну);
- перенесення нагрітої заготовки (1160 °С) від печі до штампа. Тривалість – 10 секунд (розрахунок теплообміну);
- витримка заготовки на нижньому штампі. Тривалість – 3 секунди (розрахунок теплообміну);
- операція штампування на молоті (розрахунок теплообміну і деформацій).

Моделювання нагрівання виконували таким чином.

Вибравши необхідні параметри точності сітки, отримали подання досліджуваного об'єкта (рис. 35). Виконуючи поділення загального часу на 116 кроків (15 секунд кожен крок), встановлюючи температуру навколишнього середовища 1160°С і температуру заготовки 20°С, переходимо до наступного етапу постановки задачі – розбиття заготовки на кінцеві елементи.

Під час розбиття було отримано сітку з 987 елементами.

Розмір найменшого елемента становив 0,62 мм при співвідношенні найбільшого елемента до найменшого, яке дорівнює 3. Визначення крайових умов теплопередачі заготовки полягали у зазначенні поверхонь, які контактують з навколишнім середовищем.

Такими поверхнями вибрали один торець і зовнішню циліндричну поверхню (вважаємо, що заготовка лежить у печі і її нижня поверхня (торець) не зазнає теплообміну).

Після встановлення матеріалу кривими зміцнення (сталь 14ХГСН2МА-Ш), питомої теплопровідності та теплоємності було виконано моделювання процесу нагрівання заготовки у печі.

Аналіз результатів моделювання показав, що рівномірна температура досягається приблизно за 1515 секунд, або майже 25 хвилин (у заводському технологічному процесі заготовку нагрівають за 29 хвилин). На рис. 36 наведено зміну температури у чотирьох точках.

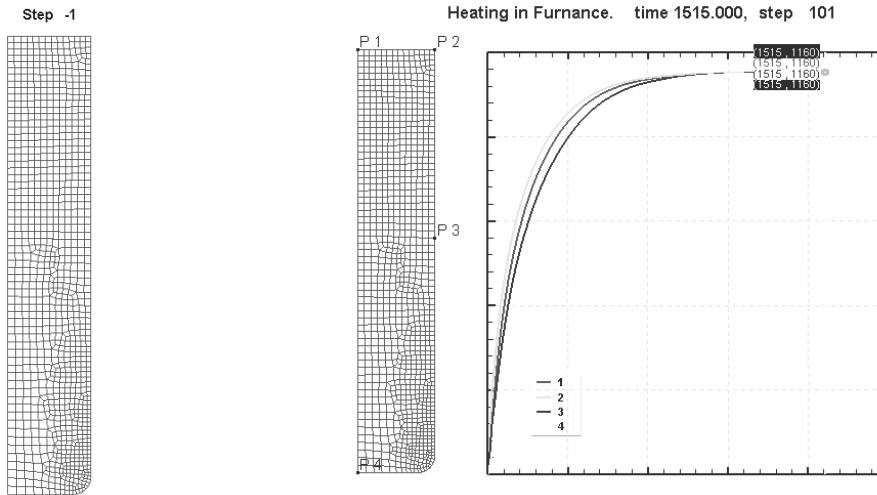


Рис. 35. Сітка на основі геометрії

Рис. 36. Змінення температури у реперних точках заготовки ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ) протягом процесу нагрівання, що моделюється

Моделювання перенесення заготовки від печі до штампа виконували таким чином.

Для моделювання процесу перенесення заготовки від печі до штампа, а саме охолодження на повітрі, були переглянуті параметри моделювання. За початковий крок було вибрано крок № 101 бази даних (на якому усі точки заготовки мають рівномірну температуру 1160°C).

Також були переглянуті крайові умови, оскільки тепер уся поверхня заготовки буде брати участь у теплообміні з навколишнім середовищем.

Результати моделювання наведено на рис. 37 і 38.

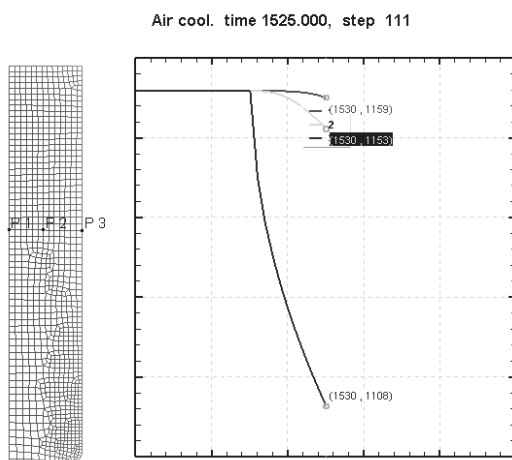


Рис. 37. Охолодження у реперних точках  $P_1, P_2, P_3$

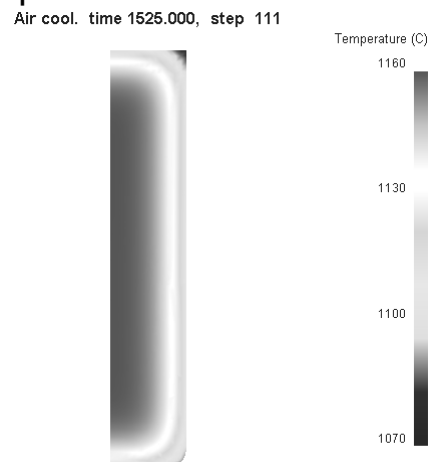


Рис. 38. Розподіл температури заготовки після перенесення до штампа

При моделюванні знаходження заготовки у нижньому штампі (з моменту встановлення її у штамп і до моменту контакту з верхнім штампом) знадобилось додати до задачі геометрію оснащення і задати необхідні параметри точності сітки, дані матеріалу, температури, поверхні взаємодії з навколишнім середовищем тощо.

Подання досліджуваного об'єкту з нанесеною сіткою наведено на рис. 39, результати розрахунку – на рис. 40 і 41.

Для моделювання штампування на молоті до задачі було додано геометрію верхнього штампа, визначено крайові умови, задано параметри руху верхнього штампа, а саме: енергія молота – 50 кДж, маса падаючих частин – 3150 кг, ефективність удару – 0,8. Умова останова – відстань між штампами – 0,1 мм. Результати моделювання наведено на рис. 42 – 46.

Step -112

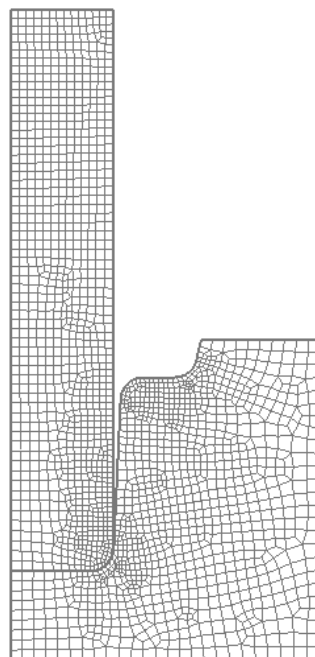


Рис. 39. Взаємне розташування об'єктів і сітка

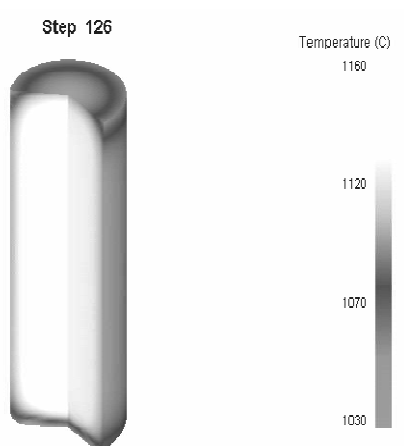


Рис. 40. Розподіл температури заготовки після трьох секунд знаходження у нижньому штампі

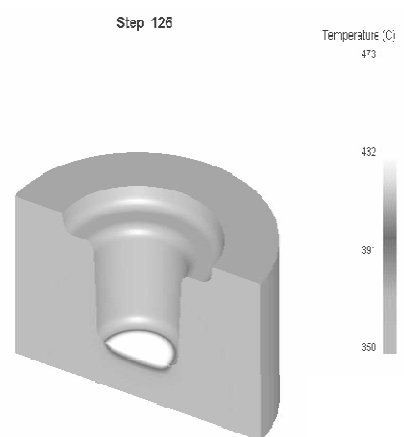


Рис. 41. Розподіл температури у нижньому штампі

Step 126 (-127)

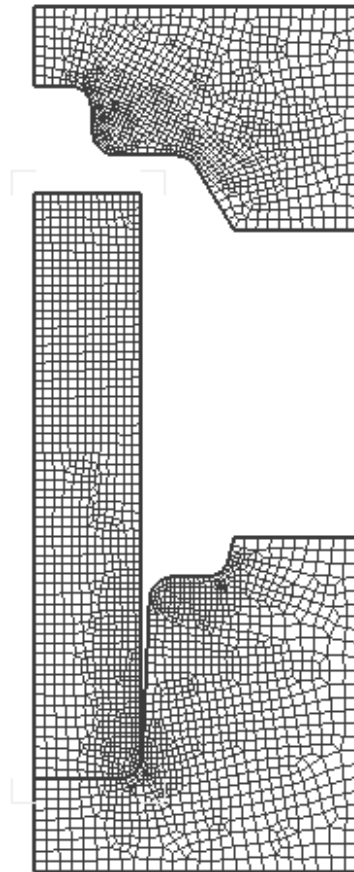


Рис. 42. Взаємне розташування об'єктів і сітка

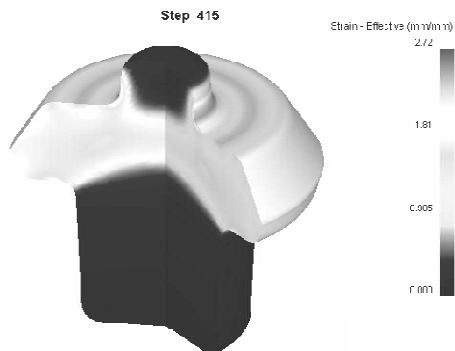


Рис. 43. Розподіл деформацій



Рис. 45. Розподіл напружень (415-й крок)

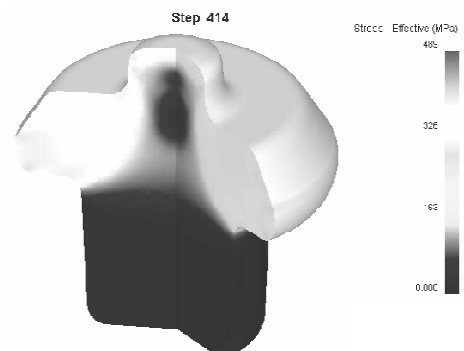


Рис. 44. Розподіл напружень (414-й крок)

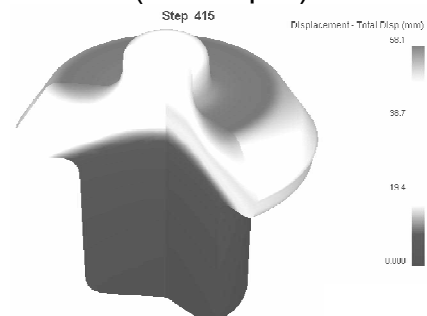


Рис. 46. Розподіл переміщень

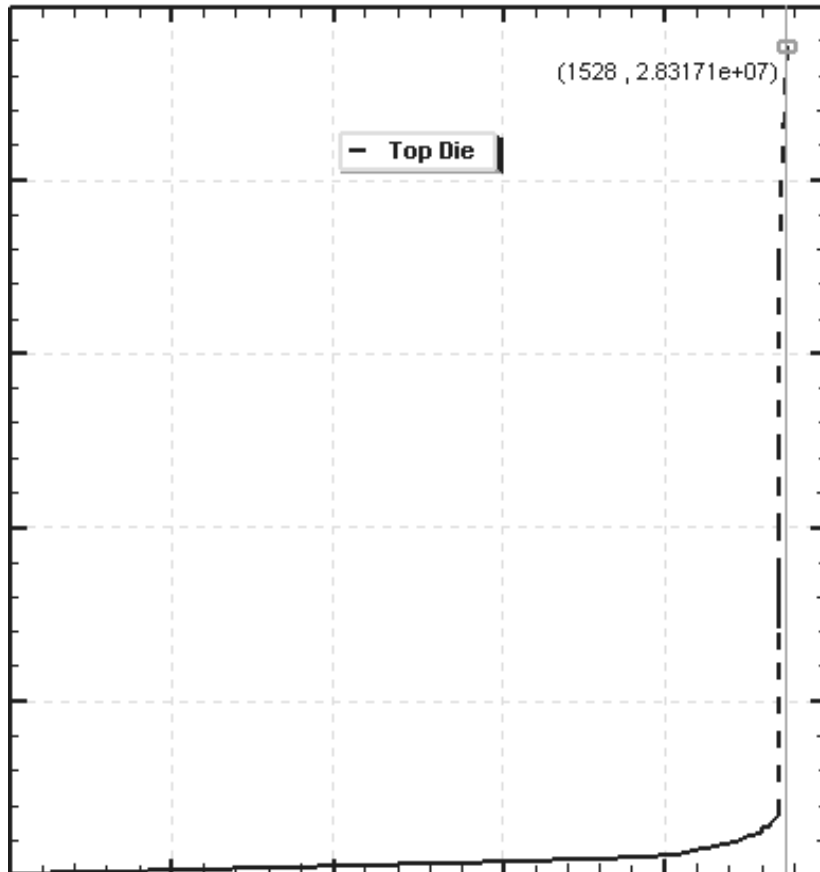


Рис. 47. Графік змінення енергії у часі

З рис. 47 видно, що енергія, необхідна для формозмінення заготовки, становить  $A_{потр} = 2,83171 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 28,317 \text{ кДж}$ .

ККД пристроїв, що розглядаються, може досягати 30 %.

Визначимо масу заряду БВР (ТЕН), необхідного для формоутворення заготовки, що розглядається.

ККД процесу можна визначити за формулою

$$\eta = \frac{A_{потр}}{A_{наяв}}, \quad (45)$$

де  $A_{потр}$  – потрібна робота, яку необхідно прикласти до заготовки для її деформування;

$A_{наяв}$  – наявна робота, тобто енергія БВР.

Тоді

$$A_{наяв} = \frac{A_{потр}}{\eta} = \frac{28,317 \text{ кДж}}{0,3} = 94,39 \text{ кДж}. \quad (46)$$

А масу заряду БВР визначимо за залежністю

$$m_{БВР} = \frac{A_{наяв}}{q} = \frac{94,39 \text{ кДж}}{4223 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 0,0225 \text{ кг}. \quad (47)$$

У такий же спосіб моделювали процес об'ємного холодного формоутворення деталі типу «Крильчатка» (АМГ2). У зв'язку зі складністю конфігурації моделювання виконували у DEFORM-3D. Процес було поділено на дві операції: осадження і видавлювання. Як видно з рис. 48, у місці майбутнього фланця на заготовці була зменшена сітка.

Результати моделювання наведено на рис. 49 – 52.

Підсумовуючи значення необхідних робіт для виконання операцій, отримуємо

$$A_{\text{потр}} = 13,48 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 13,48 \text{ кДж} . \quad (48)$$

Підставимо цей вираз у (46) і (47), у результаті

$$A_{\text{наяв}} = \frac{A_{\text{потр}}}{\eta} = \frac{13,48 \text{ кДж}}{0,3} = 44,93 \text{ кДж} \quad (49)$$

$$m_{\text{БВР}} = \frac{A_{\text{наяв}}}{q} = \frac{44,93 \text{ кДж}}{4223 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 0,0107 \text{ кг} \approx 11 \text{ г} . \quad (50)$$

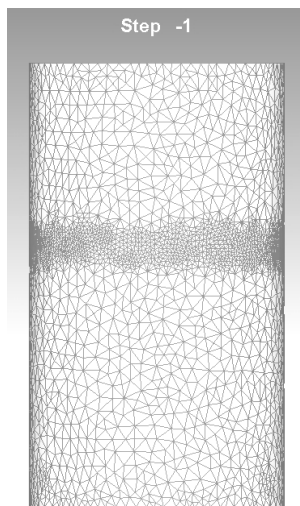


Рис. 48. Поділення заготовки

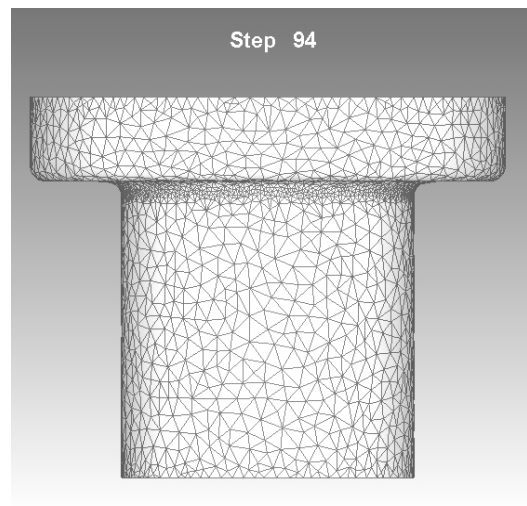


Рис. 49. Заготовка після операції осадження

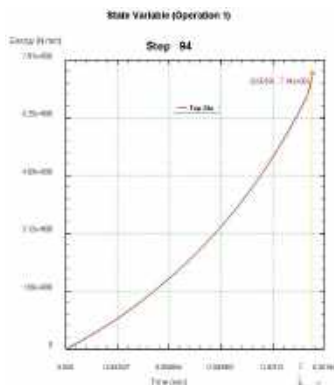


Рис. 50. Графік змінення енергії,  $H \cdot \text{мм}$ , у часі,  $c$

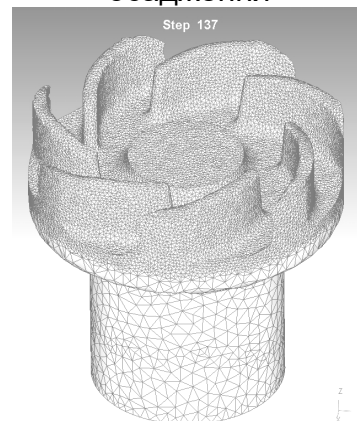


Рис. 51. Заготовка після операції видавлювання

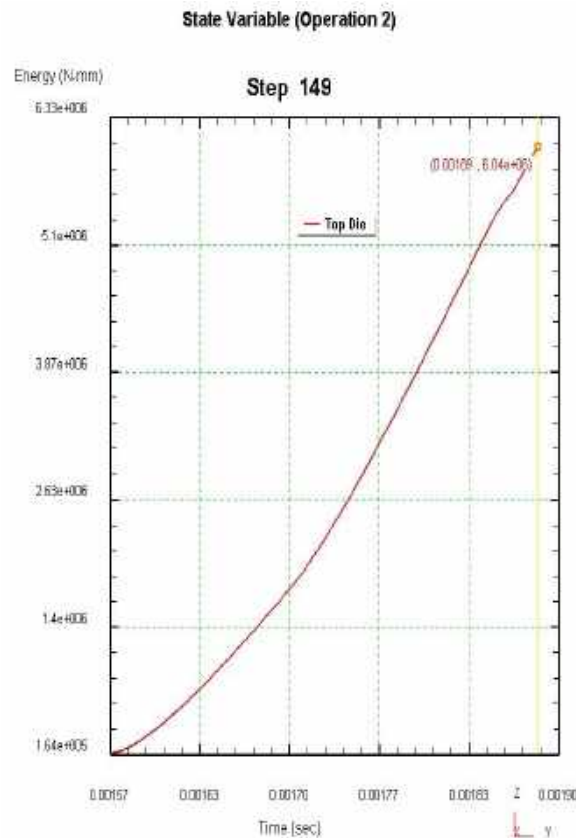


Рис. 52. Графік змінення енергії,  $H \cdot mm$  у часі,  $c$

Також моделювався процес об'ємного штампування ще однієї деталі типу «Крильчатка» (свинець).

Взаємне розташування заготовки, матриці і пуансона у DEFORM-3D наведено на рис. 53 (початковий стан).

Перший варіант моделювання – отримання деталі на гідравлічному пресі (статика). Діаметр заготовки – 38 мм, висота – 4 мм. На рис. 54 і 55 помітні виявлені дефекти: центральна утяжина і радіальні утяжини під лопатками.

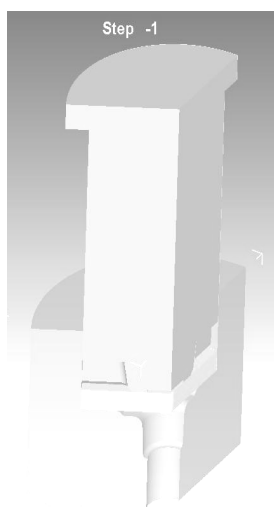


Рис. 53. Взаємне розташування об'єктів процесу моделювання

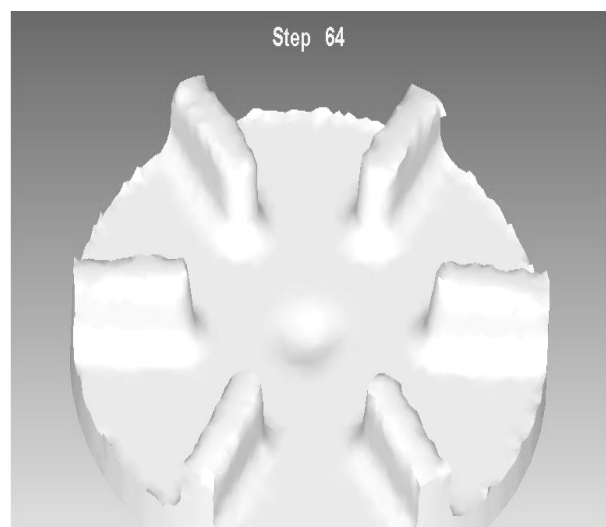


Рис. 54. Поява центральної утяжини

Центральна утяжина виникає у результаті втрати контакту з пуансоном у центральній частині, оскільки метал видавлюється у «хвостовик». Радіальні утяжини також обумовлені напрямком руху металу, в даному випадку з нижньої частини заготовки, що добре видно на рис. 56.

Другий варіант моделювання – використання значення навантаження, визначене з осцилограми (див. рис. 36). У результаті було отримано деталь, наведену на рис. 57.

Підставляючи отримані результати у вирази (46) і (47), отримаємо

$$A_{нааяв} = \frac{A_{потр}}{\eta} = \frac{0,634 \text{ кДж}}{0,3} = 2,11 \text{ кДж}; \quad (52)$$

$$m_{БВР} = \frac{A_{нааяв}}{q} = \frac{2,11 \text{ кДж}}{4223 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 0,00049 \text{ кг} \approx 0,5 \text{ г}. \quad (53)$$

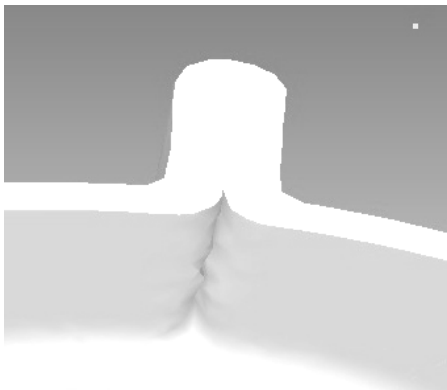


Рис. 55. Утворення складки під лопатками

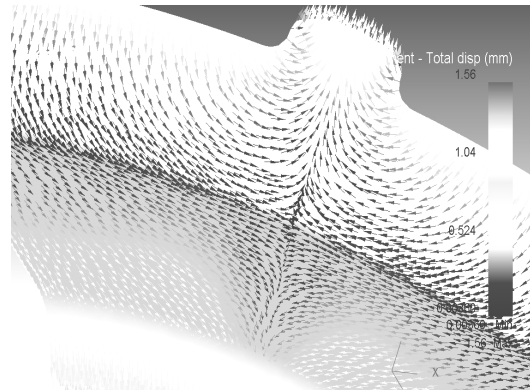


Рис. 56. Поле переміщень матеріалу

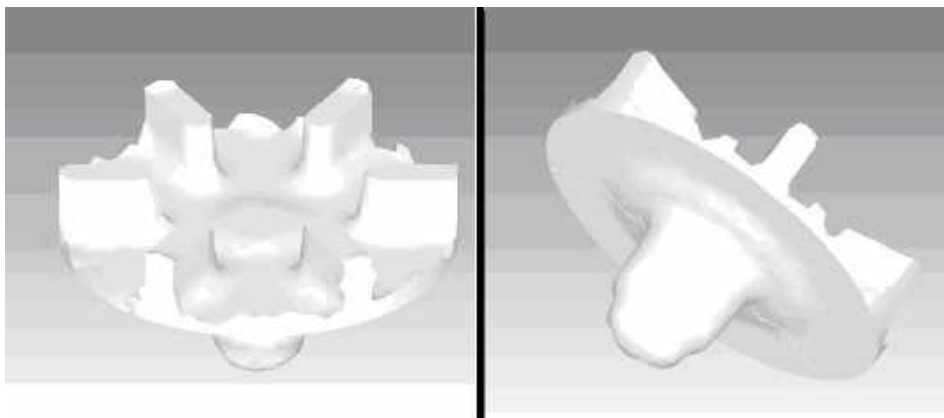


Рис. 57. Результат моделювання динамічного формоутворення

Таким чином, використання програмного комплексу DEFORM дозволяє моделювати процеси оброблення металів тиском і термообробки, а перевірка великої кількості різних варіантів технологічного процесу шляхом моделювання менш витратна, ніж проведення натурних експериментальних досліджень.



## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Пихтовников, Р. В. Перспектива развития листовой штамповки взрывом / Р. В. Пихтовников, В. К. Борисевич // Импульсная обработка металлов давлением. – М. : Машиностроение, 1977. – 144 с.
2. Борисевич, В. К. Тенденции и проблемы развития импульсных технологий / В. К. Борисевич // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : темат. зб. наук. пр. / Донбаська державна машинобудівна академія. – Краматорськ, 2002. – С. 16–20.
3. Евгеньев, Г. Б. Системология инженерных знаний : учеб. пособие для вузов / Г. Б. Евгеньев. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 346 с.
4. Зорик, В. Я. Информационная технология классификационной обработки данных в проектировании техпроцессов листовой штамповки взрывом / В. Я. Зорик, Л. А. Филипковская, В. В. Третьяк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : темат. зб. наук. пр. / Донбаська державна машинобудівна академія. – Краматорськ, 2007. – С. 286–289.
5. Третьяк, В. В. Расчет параметров импульсных процессов в объектном представлении / В. В. Третьяк, А. В. Онопченко, Т. В. Лоза // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 92–95.
6. Невешкин, Ю. А. Процесс взрывной объемной штамповки на современном этапе развития / Ю. А. Невешкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11 (47). – С. 150–157.
7. Невешкин, Ю. А. Исследование процесса штамповки крыльчатки энергией взрыва бризантных взрывчатых веществ в спецустановках / Ю. А. Невешкин // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні. ІКТМ'2010 : Всеукр. наук.-техн. конф. : тези доп. / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – Харків, 2010. – С. 157.
8. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1975. – 360 с.
9. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 275 с.
10. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – М. : Машиностроение, 1977. – 520 с.
11. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
12. Пихтовников, Р. В. Штамповка листового металла взрывом / Р. В. Пихтовников, В. И. Завьялова. – М. : Машиностроение, 1964. – 164 с.
13. Степанов, В. Г. Импульсная металлообработка в судовом машиностроении / В. Г. Степанов, И. А. Шавров. – Л. : Судостроение, 1968. – 252 с.
14. Пихтовников, Р. В. Сверхскоростная штамповка-вытяжка листового металла / Р. В. Пихтовников // Тр. ХАИ. – Харьков, 1957 – Вып. 17. – 147 с.
15. Интерактивный программный комплекс для расчета технологических процессов импульсных технологий. Компьютерная программа /

В. В. Третьяк, А. М. Гринченко, Т. В. Лоза, А. В. Онопченко, А. С. Федорова // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 577712 від 19. 12. 2014 р.

16. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001. – Т. 1. – 912 с.

17. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 944 с.

18. Фираго, В. П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей / В. П. Фираго. – М. : Машиностроение, 1973. – 468 с.

19. Система генерации баз знаний : руководство пользователя. – М. : Центр СПРУТ-Т, 2000. – 14 с.

20. Шишков, М. М. Марочник сталей и сплавов – 3-е изд., доп. – Донецк : Юго-Восток, 2002. – 456 с.

21. Согришин, О. П. Штамповка на высокоскоростных молотах / О. П. Согришин, Л. Г. Гришин, В. М. Воробьев. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.

22. Пат.98684 Україна, МПК (2006.01) В 21 D 26/06. Прес імпульсного штампування / В. К. Борисевич, О. Я. Качан, В. Ф. Мозговий, В. П. Павіченко, О. І. Сабакар, В. В. Третьяк ; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – № а201015315 ; заявл. 20.10.10 ; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1.

23. Ковка и объемная штамповка стали : в 2 т. / под ред. М. В. Сторожева. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 1. – 435 с.

24. Ковка и объемная штамповка стали : в 2 т. / под ред. М. В. Сторожева. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 2. – 448 с.

25. Обработка металлов резанием : справочник технолога / А. А. Панов [и др.] ; под общ. ред. А. А. Панова. – М. : Машиностроение, 1988. – 736 с.

26. Анучин, М. А. Штамповка взрывом / М. А. Анучин, О. Д. Антоненков. – М. : Машиностроение, 1972. – 152 с.

27. Интеллектуальная система проектирования и нормирования технологических процессов СПРУТ-ТП : руководство технолога. – М. : Центр СПРУТ-Т, 2000. – 47 с.

28. Третьяк, В. В. Расчетная модель и ее программная реализация для определения энергии, необходимой для изготовления объемной детали импульсными нагрузками / В. В. Третьяк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков, 2013. – № 59. – С. 153–161.

## Зміст

ВСТУП.....	3
1. ОПИС ІМПУЛЬСНОГО ПРЕСА ВП-02М.....	4
1.1. Технічні дані імпульсного преса ВП-02М.....	5
1.2. Опис пристрою ВП-02М.....	5
1.3. Хвильові процеси у замкнутій камері імпульсного преса ВП-02М.....	7
1.4. Розрахунок енергії гідропотоку у вибуховій камері.....	11
1.5. Класифікатор штампованих заготовок, які рекомендуються для виготовлення на імпульсному пресі ВП-02М.....	15
1.6. Штampi для виготовлення поковок на імпульсному пресі ВП-02М.....	17
2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ШТАМПУВАННЯ НА ІМПУЛЬСНОМУ ПРЕСІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТА ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ.....	20
2.1. Можливості пакета прикладних програм.....	20
2.2. Методика «грубого» розрахунку енергії деформування і розрахунок маси заряду.....	21
2.3. Модуль «грубого» розрахунку технологічних параметрів при роботі на імпульсному пресі.....	22
2.4. Уточнювальна методика розрахунку енергосилових параметрів високошвидкісного штампування.....	24
2.4.1. Розрахунок роботи деформування.....	24
2.4.2. Розрахунок енергосилових параметрів.....	25
2.4.2.1. Штампування за схемою осадження.....	25
2.4.2.2. Штампування за схемою видавлювання.....	27
2.4.2.3. Штампування за схемою осадження з видавлюванням.....	31
2.5. Розрахунок наявної енергії.....	31
2.6. Розрахунок величини заряду.....	32
2.7. Приклад розрахунку параметрів стрижня з фланцем.....	32
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ.....	34
3.1. Визначення деформувальних зусиль.....	35
3.2. Вибір програмного рішення моделювання процесу об'ємного штампування.....	39
3.3. Моделювання процесу об'ємного штампування у DEFORM-2D/3D.....	40
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	49

Навчальне видання

**Третяк Володимир Васильович  
Сотников Володимир Данилович  
Невешкін Юрій Олександрович  
Онопченко Антон Віталійович**

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
ШТАМПУВАННЯ ОБ'ЄМНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ІМПУЛЬСНОМУ ПРЕСІ**

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2018

Підписано до друку 11.07.2018

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 2,9. Обл.-вид. арк. 3,25. Наклад 100 пр.

Замовлення 244. 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](mailto: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