

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ НАВКОЛО ОТВОРІВ У ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВКАХ ІЗ АЛЮМІНІЮ

Kalyuzhny V., Kulikov I., Nikolenko N.

The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([k\\_omd@ukr.net](mailto:k_omd@ukr.net))

### DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF INTENSIVE WORK- HARDENING OF METAL AROUND HOLES IN ALUMINIUM SHEET METAL STOCK PIECES

Приведен способ интензивного упрочнения металлов вокруг отверстий в листовых заготовках. Способ включает операции формообразования отверстий холодным выдавливанием с образованием выступов на поверхностях заготовки, пробивки перемычки та осадки выступов с формированием конечного отверстия. Методом конечных элементов проведен анализ операций интензивного упрочнения металла вокруг отверстия в листовой заготовке из алюминия. Установлены силовые режимы деформирования, распределение удельных усилий на инструменте, размеры полуфабрикатов и конечные размеры изделия. С учетом накопленных деформаций и напряжений по операциям выявлены размеры очага деформации в заготовке, величины упрочнения металла по сравнению с исходным состоянием.

**Ключевые слова:** листовая заготовка, интензивное упрочнение, выдавливание, пробивка, осадка, моделирование, интензивность деформаций и напряжений

#### Вступ

При отриманні отворів в листових заготовках або профілях пробиванням або обробкою різанням поверхневі шари металу мають механічні дефекти, які в подальшому приводять до зниження механічних властивостей місць з'єднання листових заготовок і профілів між собою (наприклад, заклепками), які працюють в умовах циклічного навантаження. В окремих типах з'єднань, для збільшення надійності і довговічності їх, виконують додаткове зміцнення поверхонь заготовок і профілів, а також зміцнення металу навколо отворів за допомогою холодної пластичної деформації, що забезпечує підвищення механічних властивостей здеформованого металу. Одним із методів підвищення властивостей і чистоти внутрішньої поверхні отворів є проведення одноразового або багаторазового дорнування [1, 2]. В листовій заготовці чи профілі пробиванням або обробкою різанням попередньо утворюють отвір, а потім виконують дорнування з різним натягом. На рис. 1 наведена схема дорнування отвору дорном 1 в листовій заготовці 2, яка встановлена на опорі 3. Недоліками такої схеми є невелика глибина пропрацювання структури металу пластичною деформацією навколо отворів, також мають місце утворення завусня на нижньому торці заготовки та витрати металу на утворення отворів. Другий спосіб зміцнення металу навколо отворів – це формування концентричних канавок (рис. 2). В профілі або листовій заготовці 2 попередньо виконують отвір, в який встановлюють оправку 3. Далі за допомогою пуансонів 1 і 4

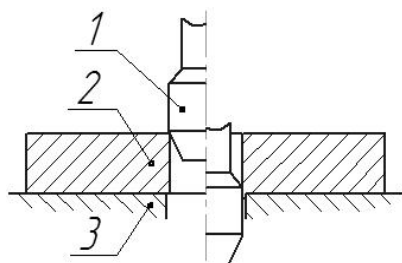


Рис. 1. Схема процесу дорнування отворів

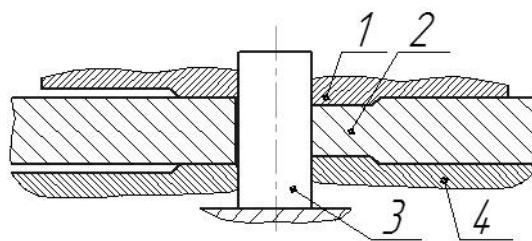


Рис. 2. Схема процесу зміцнення шляхом формування концентричних канавок

виконують зміцнення металу за рахунок формоутворення концентричних канавок, при цьому метал заповнює зазор між отвором і оправкою 3. Недоліками такого способу є утворення канавок на поверхнях профілів і листових заготовок, неможливість рівномірного по висоті пропрацювання структури металу пластичною деформацією в товстолистових заготовках та витрати металу на утворення отворів. Наведені приклади

показують, що дорнуванням і формоутворенням концентричних канавок не забезпечується інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією, а осередок деформації в заготовках розташовується в шарах металу біля отворів. Авторами [3] показана можливість інтенсивного зміцнення металів навколо отворів в листових заготовках з маловуглецевої сталі за допомогою використання операцій холодного об'ємного штампування.

### Мета роботи

Метою роботи є використання розробленого способу інтенсивного зміцнення металу навколо отворів та визначення розрахунковим шляхом параметрів інтенсивного зміцнення металу навколо отворів в листових профілях із алюмінію та створення конструкції штампу для реалізації способу на практиці.

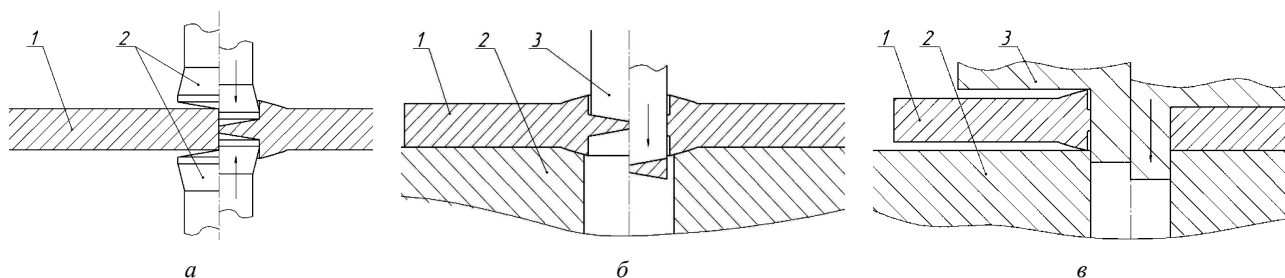


Рис. 3. Послідовність операцій інтенсивного зміцнення металу навколо отворів

Сутність розробленого способу інтенсивного зміцнення [3] (рис. 3) полягає в тому, що попередній отвір в листовій заготовці утворюється не обробкою різанням чи пробиванням, а формується двома пуансонами шляхом холодного видавлювання з перемичкою. Утворення отвору двома пуансонами (рис. 3а) забезпечує інтенсивне по всій висоті заготовки пропрацювання структури металу пластичною деформацією з утворенням виступів на нижній і верхній поверхнях заготовки. Причому, осередок деформації і зміцнення металу розповсюджується в заготовці на діаметр, який значно перевищує діаметр отвору. На другій операції (рис. 3б) в заготовці 1, що розміщена на матриці 2, пуансоном 3 виконується пробивання перемички. Третя операція (рис. 3в) включає осаджування виступів в заготовці 1, що встановлена на плиті 2, за допомогою пуансону з оправкою 3. Об'єм металу виступів заповнює зазор між оправкою і отвором з забезпеченням необхідного діаметра отвору. Крім інтенсивного зміцнення металу навколо отворів, також зменшуються витрати металу на утворення попередніх отворів у профілях або листових заготовках завдяки використанню операції видавлювання.

Для визначення розрахунковим шляхом параметрів інтенсивного зміцнення в листових профілях із алюмінію необхідно використовувати пружно-пластичну модель металу, що деформується зі зміцненням. Вказане дозволить виявити величину осередку деформації навколо отвору. Крім того, при виконанні операції осаджування, необхідно врахувати зміцнення здеформованого металу, яке було отримане при видавлюванні. Такий підхід потребує використання чисельного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ).

### Результати досліджень

Для моделювання операцій інтенсивного зміцнення металу навколо отворів був використаний програмний комплекс DEFORM, який дозволяє аналізувати переходи процесів обробки металів тиском з урахуванням технологічної спадковості після кожного переходу. Розрахункова схема для моделювання МСЕ процесу формоутворення отвору видавлюванням двома пуансонами (див. рис. 3а) приведена на рис. 4. Задача вісесиметрична, зображено половину вихідної заготовки 1 з алюмінію АД товщиною 5 міліметрів (мм) і діаметром 100 мм, яка встановлена на пуансоні 2 і плиті 3 та фіксується притискачем 4. Зусилля видавлювання  $P_d$  прикладається за допомогою пуансонів 2 і 5. Враховано тертя на контактуючих поверхнях заготовки з пуансонами (коефіцієнт тертя 0,08), зміцнення по ступеневій апроксимації діаграми істинних напружень. Процес формоутворення розподілявся на певну кількість кроків навантаження і моделювання закінчувалось коли відстань між пуансонами по вісі складала 0,5 мм (товщини перемички). На рис. 5 показана здеформована заготовка в розрізі після видавлювання. Форма та розміри заготовки, які отримані видавлюванням двома пуансонами, приведені на рис. 6. Об'єм металу, який витискається між пуансонами, приводить до формоутворення виступів на поверхнях заготовки і її товщина збільшується з 5 до 7,4 мм. Виступи закінчуються на радіусі заготовки 20 мм. Розрахункова залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону представлена на рис. 7. Максимальне значення зусилля отримане в кінці процесу і складає 94 кН. Моделюванням також встановлений напружено-деформований стан по всьому об'єму здеформованої заготовки. Це дозволило виявити розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях між заготовкою і

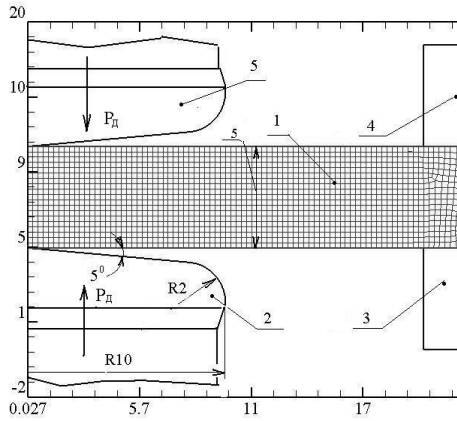


Рис. 4. Розрахункова схема процесу видавлювання (розміри в міліметрах)

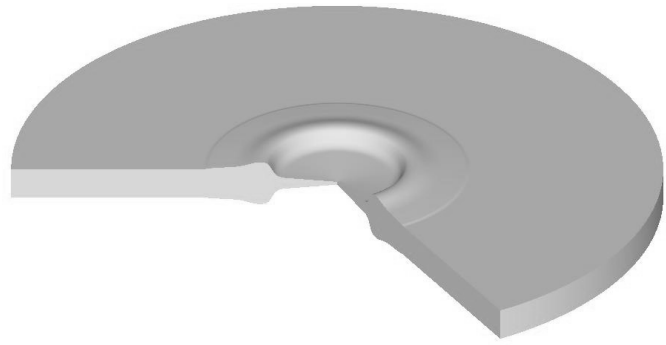


Рис. 5. Здеформована заготовка в розрізі після видавлювання

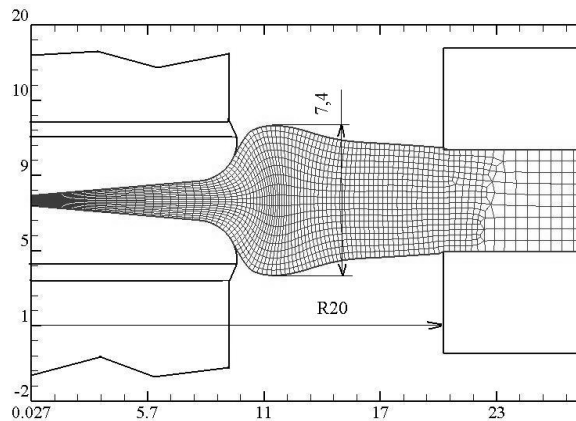


Рис. 6. Форма і розміри заготовки в міліметрах після видавлювання

деформуючим інструментом, що дозволяє встановити максимальні значення питомих на деформуючому інструменті. На рис. 8 представлений розподіл нормальних напружень на поверхні заготовки, що контактує з

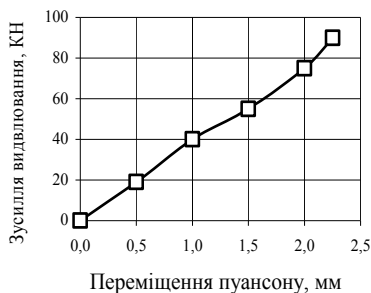


Рис. 7. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

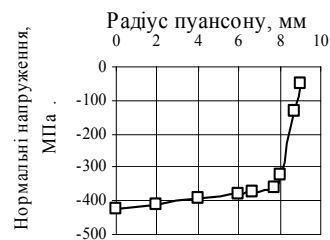


Рис. 8. Розподіл нормальних напружень на торці пуансону

торцем пуансону при максимальному значенні зусилля видавлювання. Максимальні по абсолютній величині значення питомих зусиль (414 МПа) виникають на вісі пуансону з поступовим зменшенням на конічній поверхні до радіуса заокруглення торця. По вказаному розподілу можливо прогнозувати стійкість пуансонів при формоутворенні отворів видавлюванням.

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією оцінювали по розподілу інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$ . На рис. 9 показаний розподіл  $\epsilon_i$  по об'єму здеформованої заготовки. Інтенсивне деформування в заготовці розповсюджується до діаметра 38 мм навколо отвору діаметром 20 мм. Розповсюдження осередку деформації в заготовці і величину зміцнення здеформованого металу в заготовці визначали по розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (рис. 10). Межа текучості  $\sigma_s$  в шарах металу навколо отворів досягає значення 130 МПа з поступовим зменшенням до величини умовної течії  $\sigma_{0,2}$  вихідного стану металу на діаметрі 42 мм.

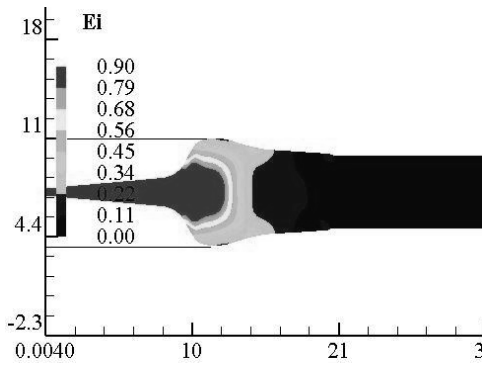


Рис. 9. Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon$ ; (розміри по осям в міліметрах)

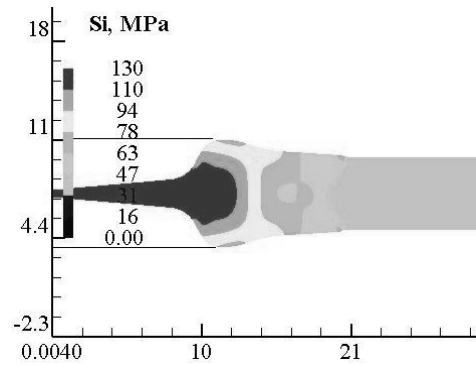


Рис. 10. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma$ ; (розміри по осям в міліметрах)

Наступна операція – пробивання перемички після формоутворення отвору. Розрахункова схема пробивання наведена на рис. 11. Заготовка 1, яка отримана видавлюванням, встановлена на матриці 2 і

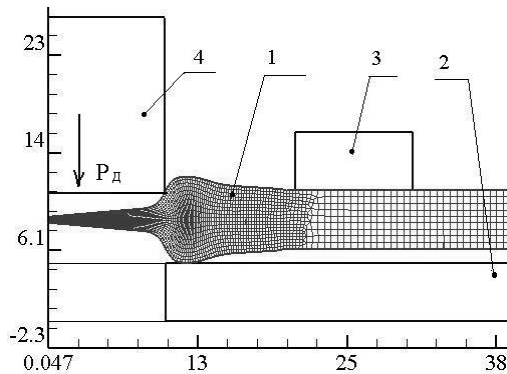


Рис. 11. Розрахункова схема пробивання перемички (розміри в міліметрах)

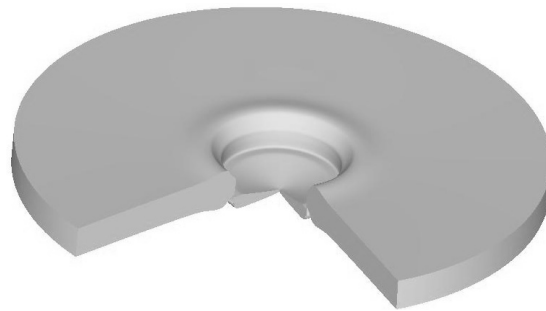


Рис. 12. Заготовка в розрізі на завершній стадії пробивання перемички

фіксується при пробиванні притискачем 3. Зусилля пробивання  $P_d$  прикладається за допомогою пуансона 4. При пробиванні врахована технологічна спадковість заготовки, яка отримана видавлюванням. На рис. 12 показана zdeформована заготовка в розрізі на завершній стадії пробивання (відділення перемички). Залежність зусилля пробивання від переміщення пуансона зображена на рис. 13. Максимальне значення зусилля пробивання складає 11 кН.

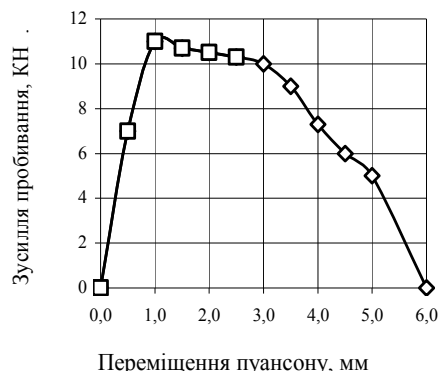


Рис. 13. Залежність зусилля пробивання від переміщення пуансону

Розрахунковий аналіз останньої операції осаджування проводилось з урахуванням накопичених деформацій і напружень в заготовці, які отримані на переході формоутворення отвору. Розрахункова схема осаджування показана на рис. 14. Заготовка 1 після пробивання перемички встановлена на плиті 2. В отвір заготовки встановлена оправка 2 діаметром 18 мм, яка визначає кінцевий розмір отвору. Зусилля осаджування  $P_d$  прикладається за допомогою плити 4. На рис. 15 показана заготовка в розрізі після осаджування. Залежність зусилля осаджування від переміщення плити представлена на рис. 16. Зусилля суттєво зростає в кінці

осаджування і досягає значення 400 кН. Розподіл питомих зусиль (нормальних напружень) по радіусу плити зображений на рис. 17. Максимальне значення вказаних напружень складає 210 МПа.

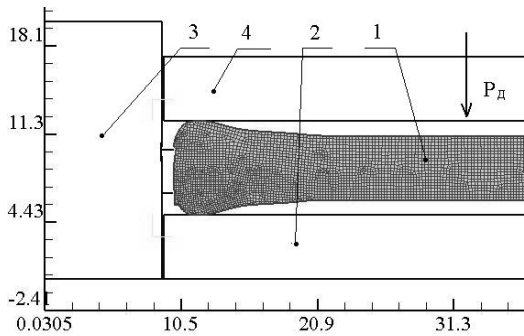


Рис. 14. Розрахункова схема осаджування

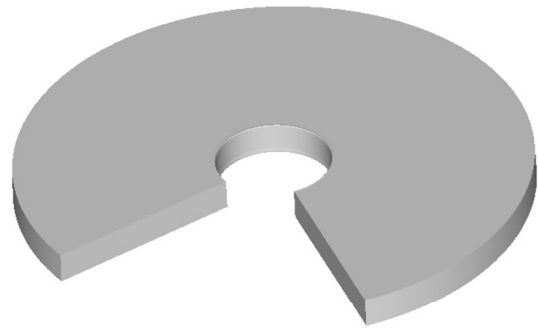


Рис. 15. Заготовка в розрізі після осаджування

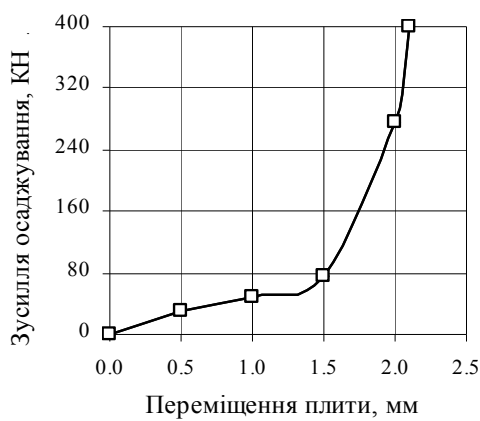


Рис. 16. Залежність зусилля осаджування від переміщення плити

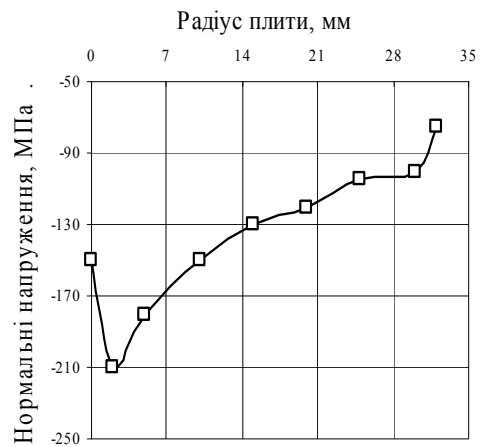


Рис. 17. Розподіл нормальних напружень по радіусу плити

Розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  після осаджування приведені відповідно на рис. 18 і 19. Інтенсивне пропрацювання структури металу пластичною деформацією в заготовці проходить до діаметра 36 мм. Максимальне значення інтенсивності деформацій зростає на величину 0,6 в

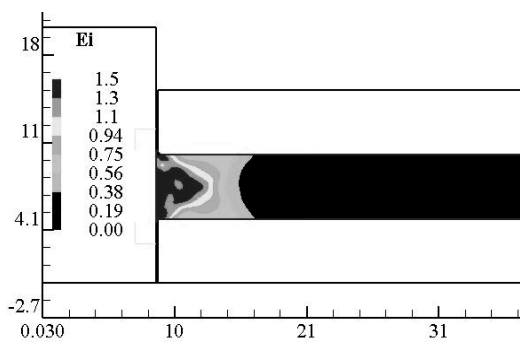


Рис. 18. Розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  (розміри по осям в міліметрах)

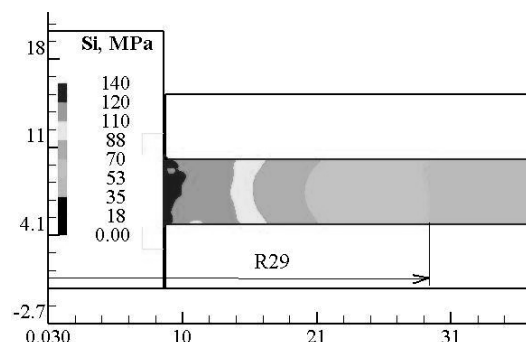


Рис. 19. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (розміри по осям в міліметрах)

порівнянні з видавлюванням (див. рис. 9). Осередок деформації, як видно з розподілу інтенсивності напружень, розповсюджується в заготовці до діаметра 58 мм (після видавлювання було 42 мм). Здеформований метал отримує додаткове зміцнення, а в порівнянні з вихідним станом шари металу біля отвору зміцнюються в 3 рази.

Для прикладу реалізації нового способу зміцнення металу навколо отворів був вибраний алюмінієвий профіль. У профілі необхідно зміцнити метал навколо отворів, які розташовані з відповідним кроком (рис. 20). На рис. 20а зображений вихідний профіль довжиною 6000 мм з розмірами полок 60 мм і 32 мм. На полці

висотою 60 мм необхідно утворити отвори діаметром 10 мм, а також забезпечити зміцнення металу навколо них (рис. 20б). Отвори розташовані з кроком 60 мм.

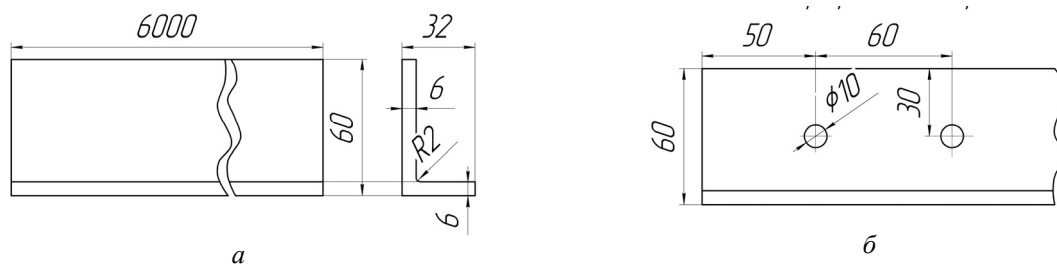


Рис. 20. Розміри вихідного профілю (а) та профілю з отворами (б), навколо яких необхідно виконати зміцнення металу

Була розроблена конструкція штампу (рис. 21), в якому послідовно розташовані три позиції для виконання операцій інтенсивного зміцнення: 1 позиція - формоутворення отворів видавлюванням двома пуансонами з утворенням виступів на поверхнях профілю; 2 позиція – пробивання перемички, яка має місце при видавлюванні; 3 позиція – осаджування виступів з формуванням кінцевих розмірів отворів. Штамп містить блок з нижньої 22 і верхньої 21 плит. В нижню плиту запресовані дві колонки 20, в верхню плиту – дві втулки 19. До нижньої плити прикріплена за допомогою гвинтів 28 матриця 17 і зафіксована штифтами 29. В матриці 22 встановлений пуансон для видавлювання 2, який спирається на плиту 22. В матриці 17 встановлені два тимчасові упори 12 з пружинами 30, які прикріплені за допомогою гвинтів 32 і шайб 33, а також уловлювач 11. До нижньої плити прикріплені гвинтами жорсткі упори 26 і 27 різної висоти. На верхній плиті закріплений гвинтами 34 хвостовик 24, за допомогою якого верхня плита фіксується в повзуні кривошипного пресу. На верхній плиті встановлені опорні підкладки 3, 6 і 7, на які опираються пуансон для видавлювання 2, пробивання перемички 23 і осаджування 14 з оправкою 11. Пуансони зафіксовані відповідно пуансонотримачами 4, 23 і 16 та гвинтами 7 і 27. В верхній плиті змонтований жорсткий прискач 8 за допомогою чотирьох гвинтів 10 та пружин 31. Штамп працює наступним чином. Профіль 1 спочатку подається між упорами 26 і 25 зправа наліво до першого тимчасового упору. При першому ході пресу ході вниз виконується операція формоутворення отвору видавлюванням двома пуансонами 2. При цьому на верхній і нижній поверхнях профілю утворюються виступи. Далі профіль подається до другого тимчасового упору. При другому ході пресу виконується одночасно пробивання перемички пуансоном 23 і формоутворення отвору видавлюванням пуансонами 2. Далі профіль подається і фіксується на уловлювачі 11 отвором, який отриманий пробиванням. При третьому ході пресу у профілі, який зафіксований на уловлювачі, виконуються одночасно операції формоутворення отвору видавлюванням, пробивання перемички і осаджування виступів пуансоном 14. При цьому формуються кінцеві розміри отвору, які визначаються оправкою 13. В подальшому профіль подається до тих пір, поки будуть отримані всі отвори по довжині. В матриці 17 встановлені два тимчасові упори 12 з пружинами 30, які прикріплені за допомогою гвинтів 32 і шайб 33, а також уловлювач 11. До нижньої плити прикріплені гвинтами жорсткі упори 26 і 27 різної висоти. На верхній плиті закріплений гвинтами 34 хвостовик 24, за допомогою якого верхня плита фіксується в повзуні кривошипного пресу. На верхній плиті встановлені опорні підкладки 3, 6 і 7, на які опираються пуансон для видавлювання 2, пробивання перемички 23 і осаджування 14 з оправкою 11. Пуансони зафіксовані відповідно пуансонотримачами 4, 23 і 16 та гвинтами 7 і 27. В верхній плиті змонтований жорсткий прискач 8 за допомогою чотирьох гвинтів 10 та пружин 31. Штамп працює наступним чином. Профіль 1 спочатку подається між упорами 26 і 25 зправа наліво до першого тимчасового упору. При першому ході пресу ході вниз виконується операція формоутворення отвору видавлюванням двома пуансонами 2. При цьому на верхній і нижній поверхнях профілю утворюються виступи. Далі профіль подається до другого тимчасового упору. При другому ході пресу виконується одночасно пробивання перемички пуансоном 23 і формоутворення отвору видавлюванням пуансонами 2. Далі профіль подається і фіксується на уловлювачі 11 отвором, який отриманий пробиванням. При третьому ході пресу у профілі, який зафіксований на уловлювачі, виконуються одночасно операції формоутворення отвору видавлюванням, пробивання перемички і осаджування виступів пуансоном 14. При цьому формуються кінцеві розміри отвору, які визначаються оправкою 13. В подальшому профіль подається до тих пір, поки будуть отримані всі отвори по довжині.

**Висновки.** 1. Приведений спосіб інтенсивного зміцнення металу навколо отворів, який включає операції формування отвору холодним видавлюванням, пробивання перемички та осаджування. 2. Методом скінчених елементів проведений розрахунковий аналіз операцій зміцнення з урахування технологічної спадковості після кожної операції для листової заготовки з алюмінію. 3. Встановлені параметри, які необхідні для виконання операцій інтенсивного зміцнення металів навколо отворів: визначені силові режими, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті, величини інтенсивності деформацій і інтенсивності напружень,

кінцеві форми напівфабрикатів і виробу. 4. Запропонована конструкція штампу для реалізації способу на практиці. 5. Подальші дослідження способу інтенсивного зміцнення необхідно проводити для профілів різноманітної конфігурації із кольорових і чорних металів.

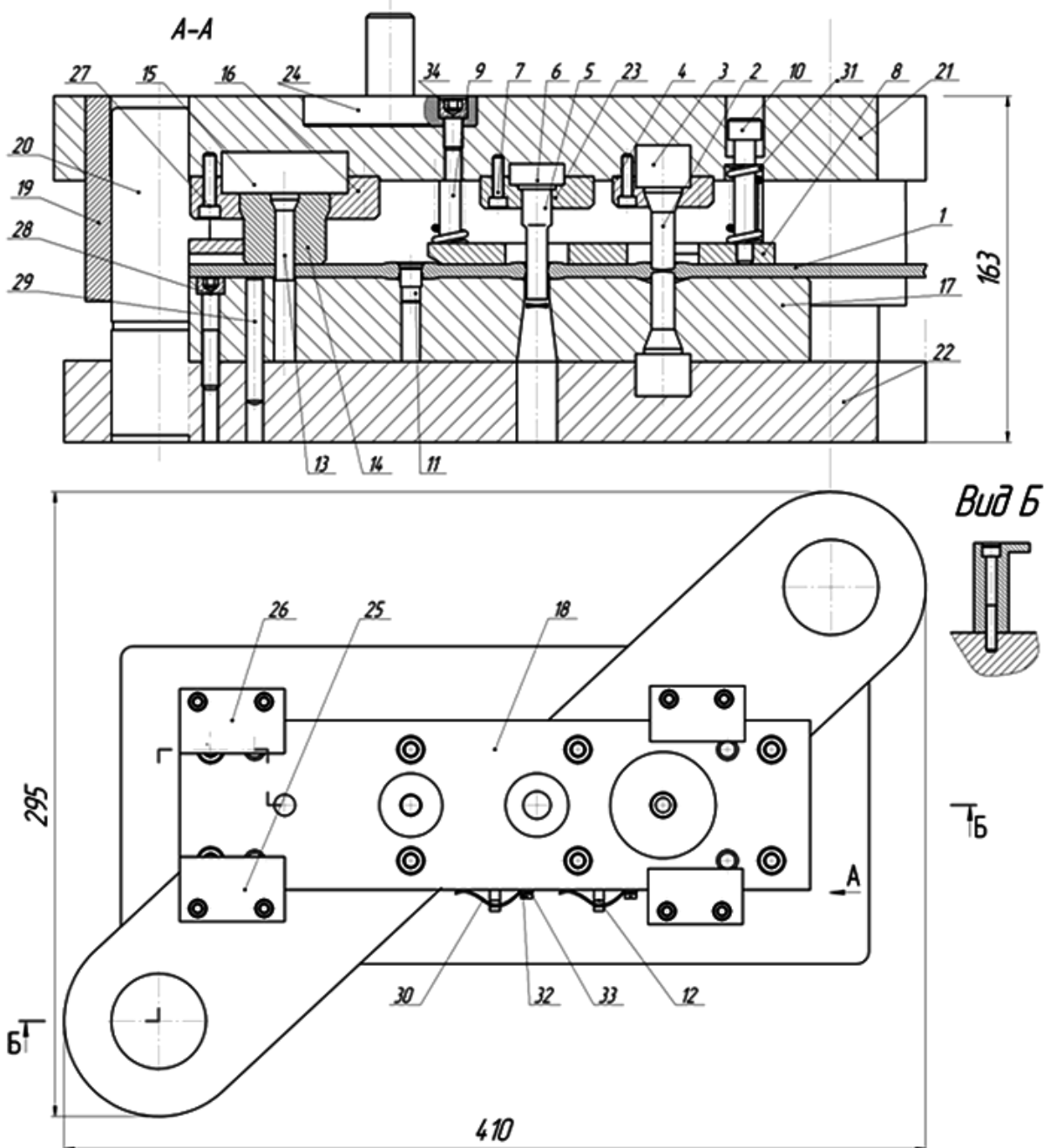


Рис. 21. Конструкція штампу для виконання операцій по інтенсивному зміцненні металу навколо отворів у алюмінієвому профілі

**Анотація.** Приведений спосіб інтенсивного зміцнення металу навколо отворів в листових заготовках. Спосіб включає операції формоутворення отворів холодним видавлюванням з утворенням виступів на поверхнях заготовки, пробивки перемички та осаджування виступів на поверхні заготовки із формуванням розмірів кінцевого отвору. Методом скінченних елементів проведений аналіз операцій інтенсивного зміцнення металу навколо отвору в листовій заготовці із алюмінію. Встановлені силові режими деформування, розподіл питомих зусиль на інструменті, розміри напівфабрикатів і кінцеві розміри виробу. З урахуванням накопичених деформацій і напружень по операціях, виявлені розміри осередку деформації в заготовці, величину зміцнення металу в порівнянні із початковим станом.

*Ключові слова:* листова заготовка, інтенсивне зміцнення, видавлювання, пробивання, осаджування, моделювання, інтенсивність деформації і напружень

**Abstract.** *Object.* Intensive strengthening of metal around holes in sheet metal workpieces and profiles.

*Purpose.* Determination with the help of finite element method of parameters of intensive strengthening of metal around holes in sheet metal workpieces made from aluminum.

*Design/methodology/approach.* The production method of intensive work-hardening metal around the holes in sheet metal blanks was carried out. The production method consists of subsequent processes such as the forming holes with hub formation on stock piece surfaces by cold extrusion, the punching amount of adjacent blanks and the setting of the hub with forming finite hole dimensions. The analysis of the production method of intensive work-hardening of metal around holes in aluminum sheet metal is carried out with using the finite element method. The forces of deforming, distribution of load per unit surface on the deforming tools, the size of semi-finished and final product dimensions were determined. Given the accumulated strain and stress in processes identified the share of the deforming zone in the stock under deformation, the values of hardening of the metal as compared to baseline

*Findings.*

Power of extrusion of holes with forming of ledges on workpiece's surface, power of punching of bridge and power of sediment of ledges during holes forming were determined. Dimensions of deformation zone and value of strengthened metal were determined.

*Originality/value.*

The strengthening of metal distributes in workpiece on diameter, which in 3 time bigger than diameter of hole.

*Keywords:* sheet blank, intense hardening, squeezing, punching, sediment modeling, the intensity of deformation and stress.

1. *Проскураков Ю.Г.* Объемное дорнование отверстий/ Проскураков Ю.Г. – М: Машиностроение, 1984. – 320 с.
2. *Розенберг А. М.* Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания/ Розенберг А.М., Розенберг О.А. – К: Наукова думка, 1990. – 223 с.
3. *Калюжний О.В.* Спосіб інтенсивного деформаційного зміцнення металів навколо отворів// О.В. Калюжний, М.І. Бобир, В.Лі Калюжний та ін. Патент України на корисну модель №74665 МПК В24В 39/02, заявка u201203638 від 26.03.2012, опубл.25.04.2012, бюл. №21/2012..
4. *Калюжний В.Л.* Розрахунковий аналіз ресурсозберігаючої технології інтенсивного зміцнення металу навколо отворів у профілях і листових заготовках/ Калюжний В.Л., Вихованець І.В., Ніколенко М. С. та ін.// Вісник НТУ «ХПІ» 45'2011, Харків. С. 124-131.
5. *Калюжний О.В.* Визначення зусилля деформування при формоутворенні отворів у товстолистових заготовках конічними пуансонами/ О.В. Калюжний, І.П. Куліков, О.В. Мельник// Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції Прогресивна техніка і технологія», 2012, м. Севастополь, Україна, 2012. – С. 64-66.

## REFERENCES

1. *Proskurjakov Ju.G.* Objomnoe dornovanie otverstij. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 320 p.
2. *Rozenberg A.M., Rozenberg O.A.* Mehanika plasticheskogo deformirovanija v processah rezanija i deformirujuwego protjagivaniija Kyiv: Naukova dumka, 1990. 223 p.
3. *Kaljuzhnyj O.V., M.I. Bobyr, V.L. Kaljuzhnyj.* Sposib intensywnogo deformaciyynogo zmecnennja metaliv navkolo otvoriv. in. Patent Ukrainy No 74665 MPK 21D 26.05, zajavka u201112215 vid 18.10.2011, opubl. 25.04.2012, bjul. No 21.2012.
4. *Kaljuzhnyj V.L., Vihovanec I.V., Nikolenko M. S. ta in.* Rozrahunkovij analiz resursozberigajuchoj tehnologii intensywnogo zmecnennja metalu navkolo otvoriv u profiljah i listovih zagotovkah. Visnik NTU «HPI» 45'2011, Harkiv. P. 124-131.
5. *Kaljuzhnyj O.V. . I.P. Kulikov, O.V. Melnik.* Vyznachennja zusyllja deformuvannja pry formoutvorenni otvoriv u товстолыстовыh zagotovkah konichnymy пуансонamy. Tezy dopovidey XIII Mignarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii «Progresivnaja tehnika i tehnologija», 2012, g. Sevastopol. P. 64-66.