

УДК 621.7

Калюжний О. В.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОТВОРІВ У ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВКАХ ХОЛОДНИМ ВИДАВЛЮВАННЯМ ДВОМА КОНІЧНИМИ ПУАНСОНАМИ

При отриманні отворів в листових заготовках або профілях операцією пробивання 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), що працюють в умовах циклічного навантаження. В окремих типах з'єднань, для збільшення надійності і довговічності їх, виконують додаткове 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 в профілі пробиванням або обробкою різанням попередньо утворюють отвір, а потім виконують дорнування з різним натягом. Другим розповсюдженим способом зміцнення є холодне видавлювання концентричних канавок навколо отворів. Сутність вищевказаних способів зображена на рис. 1. На рис. 1, а 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, утворення завусня на нижньому торці заготовки та витрати металу на утворення отворів. Другий спосіб зміцнення металу навколо отворів – це формування концентричних канавок холодним видавлюванням (рис. 1, б). В профілі або листовій заготовці 2 попередньо виконують отвір, в який встановлюють оправку 3. Далі за допомогою пуансонів 1 і 4 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 інтенсивного по висоті пропрацювання структури металу пластичною деформацією в товстолстових 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.

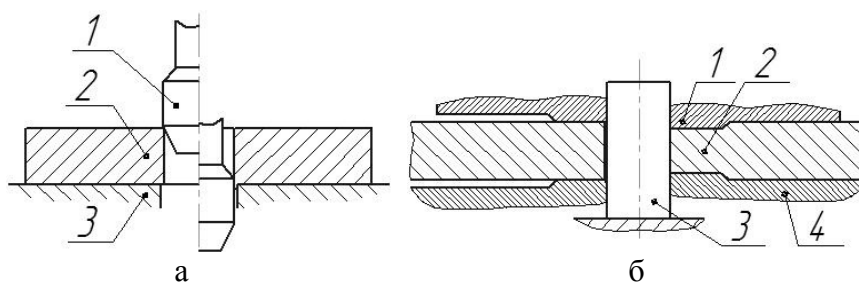


Рис. 1. Схема способів зміцнення металу навколо отворів:

а – процес дорнування отворів; б – процес видавлювання концентричних канавок

Сутність способу інтенсивного зміцнення (рис. 2), на відміну від вищенаведених, полягає в тому, що попередній отвір в листовій заготовці виконується не обробкою різанням, а формується двома пуансонами шляхом холодного видавлювання з перемичкою. Видавлювання отвору двома пуансонами (рис. 2, а) приводить до утворення виступів на нижній і верхній поверхнях заготовки. При цьому осередок деформації і зміцнення металу розповсюджується

в заготовці на діаметр, який значно перевищує діаметр отвору. На другій операції (рис. 2, б) в заготовці 1, що розміщена на матриці 2, пуансоном 3 виконується пробивання перемички. Третя операція (рис. 2, в) включає осаджування виступів в заготовці 1, яка розташована 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 утворення попередніх отворів у профілях або листових заготовках завдяки використанню операції видавлювання.

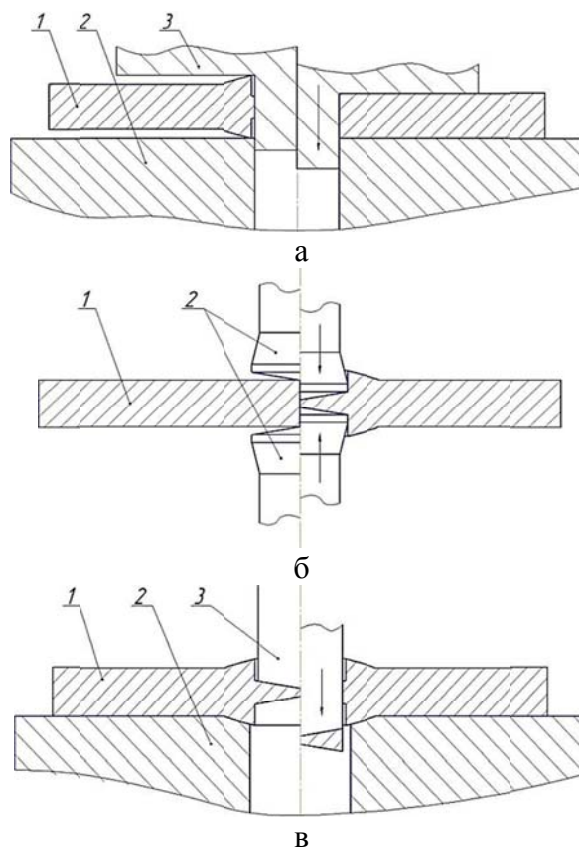


Рис. 2. Послідовність операцій способу інтенсивного зміцнення металу навколо отворів:
а – видавлювання отвору з утворенням перемички і виступів; б – пробивання перемички;
в – осаджування виступів

З точки зору реалізації способу на практиці найбільш складною операцією є видавлювання отвору двома пуансонами. При цьому виникають значні питомі зусилля на пуансонах, що приводить до зменшення їх стійкості. Тому необхідно знати аналітичні залежності для інженерних розрахунків зусилля видавлювання і питомих зусиль на пуансонах для вибору марки матеріалу та прогнозування їх довговічності.

Метою роботи є отримання методом спільного рішення диференціальних рівнянь рівноваги з наближеною умовою пластичності аналітичних залежностей для визначення питомого і зусилля формоутворення отворів холодним видавлюванням двома конічними пуансонами та перевірка результатів рішення за допомогою чисельного експерименту методом скінченних елементів.

Теоретичний аналіз виконано з використанням методу спільного вирішення диференціальних рівнянь рівноваги з наближеною умовою пластичності (інженерний метод). Метал вважався ізотропним, жорстко-пластичним зі зміцненням. Розрахункова схема зображена на рис. 3 (в силу симетрії наведено її половину). Заготовка 1 товщиною s деформується пуансонами 2 і 3 радіусами R_n , які мають конічні робочі торці з кутом $\alpha / 2$, з утворенням перемички висотою h . Беремо додаткову вісь z' . В zdeформованій заготовці виділимо осередок

деформації під кутом α , який розподіляємо на два об'єми. Перший об'єм обмежений радіусами R_g і R_n . На елементарний об'єм діють стискаючі напруження $\sigma_{\rho 1}, \sigma_{\varphi 1}$ і $\sigma_{\theta 1}$. На поверхнях між 1 і 3 об'ємами виникають дотичні напруження зсуву, якими при рішенні нехтуємо. В другому об'ємі, що розташований під пуансонами і обмежений радіусами R і R_g , виникають стискаючі напруження $\sigma_{\rho 2}, \sigma_{\varphi 2}$ і $\sigma_{\theta 2}$, причому напруження $\sigma_{\varphi 2}$ є максимальними по абсолютній величині. В другому об'ємі діють дотичні напруження $\tau_{\rho\varphi 2}$, які на контактуючих поверхнях визначаються через нормальні напруження: $\tau_k = \mu\sigma_{\varphi 2}$. Тут μ – коефіцієнт тертя. Метал в 3 і 4 об'ємах не деформується.

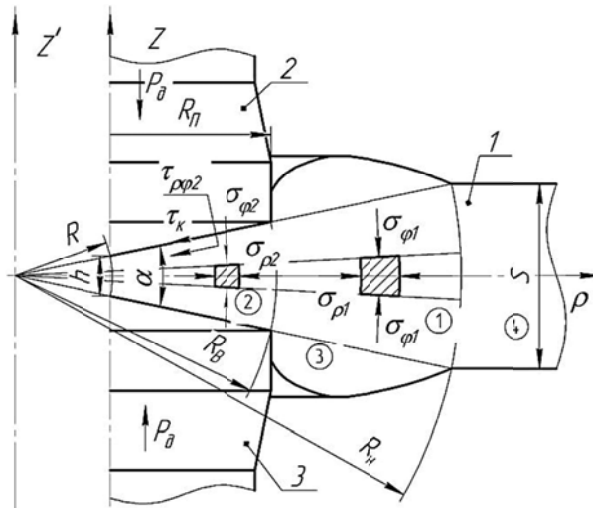


Рис. 3. Розрахункова схема формоутворення отвору холодним видавлюванням: 1 – заготовка; 2 і 3 – пуансони

Для аналізу напруженого стану в двох об'ємах використовуємо сферичні координати ρ, φ і θ , в яких перше рівняння рівноваги має вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho} \left[2\sigma_{\rho} - (\sigma_{\varphi} + \sigma_{\theta}) + \tau_{\rho\varphi} \cdot \text{ctg}\varphi \right] = 0. \tag{1}$$

Вважаємо, що при формуванні отвору двома пуансонами з конічними робочими торцями кут φ настільки малий, що $\text{ctg}\varphi \approx 1/\varphi$. Розподіл дотичних напружень $\tau_{\rho\varphi}$ приймаємо у вигляді: $\tau_{\rho\varphi} = \tau_k (2\varphi/\alpha)$, а також робимо допущення, що в 1 і 2 об'ємах напруження $\sigma_{\varphi} \approx \sigma_{\theta}$. Тоді рівняння (1), якщо підставити вираз для $\tau_{\rho\varphi}$, буде в звичайних похідних і може бути використаним для знаходження напружень на контактуючих поверхнях:

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \frac{4\tau_k}{\alpha\rho} + \frac{2(\sigma_{\rho} - \sigma_{\varphi})}{\rho} = 0. \tag{2}$$

Починаємо з аналізу першого об'єму. Дотичними напруженнями в ньому, як було вказано, нехтуємо. Тоді рівняння рівноваги (2) має вигляд:

$$\frac{d\sigma_{\rho 1}}{d\rho} + \frac{2(\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\varphi 1})}{\rho} = 0. \tag{3}$$

Записуємо наближену умову пластичності (з урахуванням, що $|\sigma_{\rho 1}| > |\sigma_{\varphi 1}|$):

$$\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\varphi 1} = -\sigma_s. \quad (4)$$

Підставляємо вираз (4) в рівняння (3) і після інтегрування отримуємо:

$$\sigma_{\rho 1} = 2\sigma_s \ln \rho + C \quad (5)$$

Довільну постійну C знаходимо з граничної умови, що при $\rho = R_H$ напруження $\sigma_{\rho 1} = 0$. Тоді кінцевий вираз для $\sigma_{\rho 1}$ має вигляд:

$$\sigma_{\rho 1} = -2\sigma_s \ln \frac{R_H}{\rho}. \quad (6)$$

Знайдемо напруження $\sigma_{\rho 1}$ буде на внутрішній поверхні 1 об'єму при $\rho = R_g$, яке буде максимальним по абсолютній величині:

$$\sigma_{\rho 1}^{\max} = -2\sigma_s \ln \frac{R_H}{R_g}. \quad (7)$$

Переходимо до аналізу 2 об'єму. Використовуємо рівняння рівноваги (2). Приймаємо, що на контактуючій поверхні між заготовкою і пуансоном $\tau_k = \mu\sigma_{\varphi 2}$. Тоді:

$$\frac{d\sigma_{\rho 2}}{d\rho} + \frac{4\mu\sigma_{\varphi 2}}{\rho\alpha} + \frac{2(\sigma_{\rho 2} - \sigma_{\varphi 2})}{\rho} = 0. \quad (8)$$

Наближена умова пластичності для 2 об'єму (з урахуванням, що $|\sigma_{\varphi 2}| > |\sigma_{\theta 2}|$):

$$\sigma_{\rho 2} - \sigma_{\varphi 2} = \sigma_s. \quad (9)$$

Підставляємо вираз (9) в рівняння (8) і напруження $\sigma_{\varphi 2}$ виразимо через $\sigma_{\rho 2}$:

$$\frac{d\sigma_{\rho 2}}{d\rho} + \frac{4\mu(\sigma_{\rho 2} - \sigma_s)}{\rho\alpha} + \frac{2\sigma_s}{\rho} = 0. \quad (10)$$

Розділяємо змінні в формулі (10):

$$\frac{d\sigma_{\rho 2}}{\frac{4\mu}{\alpha}\sigma_{\rho 2} + \sigma_s \left(2 - \frac{4\mu}{\alpha}\right)} = -\frac{d\rho}{\rho}. \quad (11)$$

Після інтегрування рівняння (11) отримуємо:

$$\frac{4\mu}{\alpha} \ln \left[\frac{4\mu}{\alpha} \sigma_{\rho 2} + \sigma_s \left(2 - \frac{4\mu}{\alpha}\right) \right] = -\ln \rho + C. \quad (12)$$

Довільну постійну C знаходимо з граничної умови, що на границі між 2 і 1 об'ємами, при $\rho = R_g$, радіальні напруження σ_{ρ} повинні бути однакові. Це означає, що $\sigma_{\rho 2} = \sigma_{\rho 1}^{\max}$ по рівнянню (7). Звідки довільна постійна C дорівнює:

$$C = \frac{4\mu}{\alpha} \ln \left[-\frac{8\mu}{\alpha} \sigma_s \ln \frac{R_H}{R_g} + \sigma_s \left(2 - \frac{4\mu}{\alpha}\right) \right] + \ln R_g. \quad (13)$$

З урахуванням (13), після перетворень кінцевий вираз для напруження $\sigma_{\rho 2}$ має вигляд:

$$\sigma_{\rho 2} = -\sigma_s \left[\left(2 \ln \frac{R_H}{R_g} - \frac{\alpha}{2\mu} + 1 \right) \left(\frac{R_g}{\rho} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} + \frac{\alpha}{2\mu} - 1 \right]. \quad (14)$$

З умови пластичності (9) знаходимо напруження $\sigma_{\varphi 2}$:

$$\sigma_{\varphi 2} = -\sigma_s \left[\left(2 \ln \frac{R_H}{R_g} - \frac{\alpha}{2\mu} + 1 \right) \left(\frac{R_g}{\rho} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} + \frac{\alpha}{2\mu} \right]. \quad (15)$$

Напруження $\sigma_{\varphi 2}$ змінюється по радіусу ρ . Для спрощення подальшого рішення при знаходженні зусилля видавлювання визначимо середнє значення вказаного напруження $\sigma_{\varphi 2}^{cp}$:

$$\sigma_{\varphi 2}^{cp} = \frac{\sigma_{\varphi 2, \text{при } \rho=R} + \sigma_{\varphi 2, \text{при } \rho=R_g}}{2}.$$

З урахуванням рівняння (15), отримуємо:

$$\sigma_{\varphi 2}^{cp} = -\sigma_s \left\{ \left(\ln \frac{R_H}{R_g} - \frac{\alpha}{4\mu} + \frac{1}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_g}{R} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\}. \quad (16)$$

Зусилля видавлювання, згідно прийнятої схеми, дорівнює:

$$P_g = \left| \sigma_{\varphi 2}^{cp} \right| \cdot F_k / \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (17)$$

де $F_k = \pi \cdot R_n^2 / \cos \frac{\alpha}{2}$ – площа поверхні конічного торця пуансону.

Після підстановки в (17) вираз для $\sigma_{\varphi 2}^{cp}$, отримуємо:

$$P_g = 3,14 \sigma_s R_n^2 \left\{ \left(\ln \frac{R_H}{R_g} - \frac{\alpha}{4\mu} + \frac{1}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_g}{R} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\} / \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (18)$$

Формулу (18) можна спростити, якщо записати:

$$\left(\frac{R_g}{R} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} = \exp [(\alpha / 4\mu) \ln (R_g / R)] \approx 1 - (\alpha / 4\mu) \ln (R_g / R).$$

Тоді вираз для зусилля має вигляд:

$$P_g = 3,14 \sigma_s R_n^2 \left[\left(\ln \frac{R_H}{R_g} - \frac{\alpha}{4\mu} + \frac{1}{2} \right) \left(2 - \frac{\alpha}{4\mu} \ln \frac{R_g}{R} \right) + \frac{\alpha}{2\mu} \right] / \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (19)$$

Радіуси R_g , R_H , R можна виразити через розміри вихідної та здеформованої заготовки і пуансону (див. рис. 1):

$$R = \frac{h}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{h}{\alpha}; R_g = R + \frac{R_n}{\cos \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{h}{\alpha} + R_n; R_u = \frac{s}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{s}{\alpha}.$$

При отриманні виразів для напружень і зусилля не враховано зміцнення металу при видавлюванні. Для врахування зміцнення використаємо відому апроксимацію істинних напружень:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_g}{1 - \psi_{ш}} \left(\frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi}{1 - \psi_{ш}}}, \quad (20)$$

де σ_g – межа міцності;

ψ – відносне потоншення при випробуванні на розтяг;

$\psi_{ш}$ – відносне потоншення, яке відповідає моменту утворення шийки на зразку.

Визначимо середнє значення істинного напруження σ_s^{cp} . В якості деформації ψ^{cp} в першому об'ємі при видавлюванні беремо відношення різниці висот вихідної заготовки s і середнього значення висоти здеформованої заготовки s^{cp} під пуансоном до висоти вихідної заготовки. По схемі (див. рис. 1) отримуємо:

$$s^{cp} = h + \frac{2R_n}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \approx h + \frac{R_n \alpha}{2}. \quad (21)$$

Тоді:

$$\psi^{cp} = \frac{s - s^{cp}}{s} = \frac{s - h - 0,5R_n \alpha}{s}.$$

Тоді формула для визначення середнього значення істинного напруження σ_s^{cp} , має вигляд:

$$\sigma_s^{cp} = \frac{\sigma_g}{1 - \psi_{ш}} \left(\frac{s - h - 0,5R_n \alpha}{s \psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}}. \quad (22)$$

Для перевірки результатів рішення інженерним методом (ІМ) проведений чисельний експеримент з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Розрахункова схема для моделювання МСЕ процесу формоутворення отвору видавлюванням двома пуансонами приведена на рис. 4. Задача вісесиметрична, зображено половину вихідної заготовки 1 з алюмінію (умовна межа течії $\sigma_{0,2} = 40$ МПа) 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 пуансоном (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 висі складала 0,5 мм (товщини перемички). Розміри заготовки, яка отримана видавлюванням двома пуансонами, приведені на рис. 5. 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.

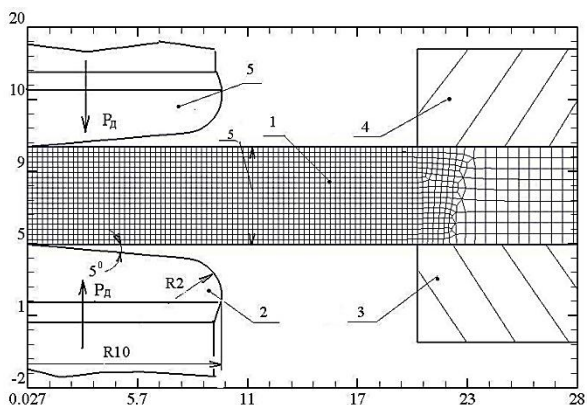


Рис. 4. Розрахункова схема процесу видавлювання (розміри в міліметрах)

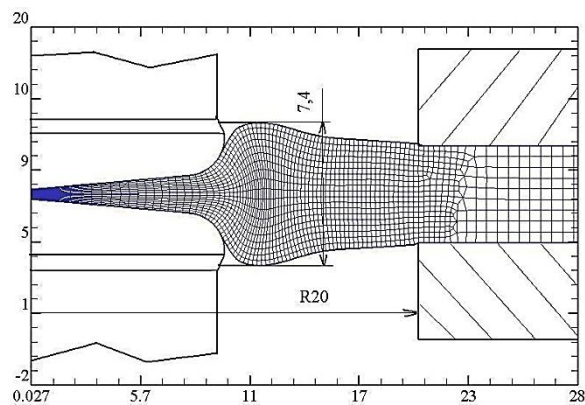


Рис. 5. Розміри здеформованої заготовки в міліметрах після видавлювання

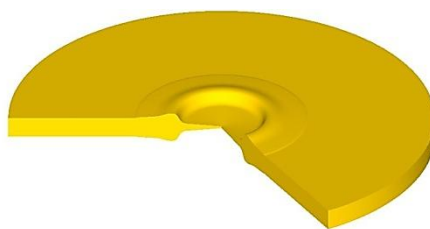


Рис. 6. Здеформована заготовка з перемичкою в розрізі після видавлювання

Розрахункова залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону представлена на рис. 7. Максимальне значення зусилля отримане в кінці процесу і складає 94 КН. На цьому рисунку також приведений графік, який побудований по даних формули (19). Інженерний метод дає завищені результати в порівнянні з даними МСЕ. Максимальна похибка досягає 11 %.

Моделюванням МСЕ також встановлений напружено-деформований стан по всьому об'єму здеформованої заготовки. Це дозволило виявити розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях між заготовкою і деформуючим інструментом, що дозволяє встановити максимальні значення питомих на деформуючому інструменті. Розподіл нормальних напружень на поверхні заготовки, що контактує з торцем пуансону для максимального значення зусилля видавлювання представлена на рис. 8. На ньому також приведені дані, що отримані по формулі (15) для напруження $\sigma_{\varphi 2}$. Вказане напруження є нормальним на торці пуансону. Найбільші по абсолютній величині значення питомих зусиль виникають на вісі пуансону з поступовим зменшенням на конічній поверхні до радіуса заокруглення торця. Дані по ІМ відрізняються, однак середнє значення, яке отримане по виразу (16) практично співпадає, що достатньо для розрахунку зусилля видавлювання.

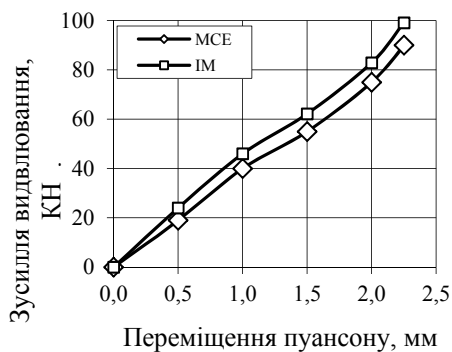


Рис. 7. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

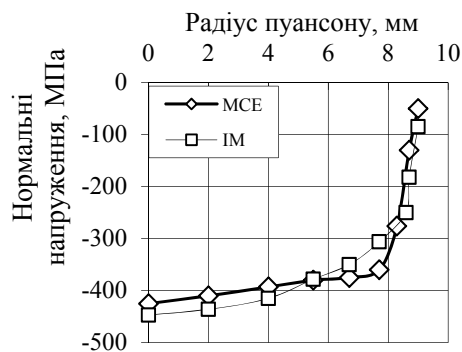


Рис. 8. Розподіл нормальних напружень на торці пуансону

По вказаному розподілу можливо прогнозувати стійкість пуансонів при формоутворенні отворів видавлюванням.

По результатах МСЕ можливо прогнозувати зміцнення здеформованого металу після видавлювання. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією оцінювали по розподілу інтенсивності деформацій ε_i . На рис. 9 показаний розподіл ε_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 σ_i (рис. 10). Межа текучості σ_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.

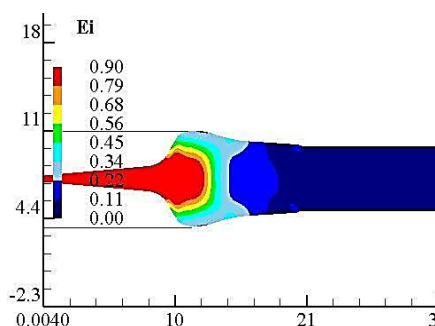


Рис. 9. Розподіл інтенсивності деформацій ε_i (розміри по осям в міліметрах)

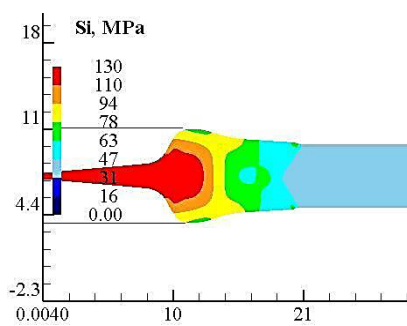


Рис. 10. Розподіл інтенсивності напружень σ_i (розміри по осям в міліметрах)

ВИСНОВКИ

Описаний спосіб отримання отворів в листових заготовках і профілях шляхом видавлювання двома конічними пуансонами. Спосіб дозволяє провести інтенсивне зміцнення металу навколо отворів, також зменшуються витрати металу утворення попередніх отворів у профілях або листових заготовках завдяки використанню операції видавлювання.

Інженерним методом встановлені аналітичні залежності для визначення напружень та зусилля видавлювання отворів.

Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз процесу отримання отворів в листових заготовках та профілях. Отримано розподіл напружено-деформованого стану по об'єму деталі. Проведено порівняння результатів розрахунків, проведених двома методами, що дозволяє використовувати отримані залежності для проектування процесу отримання отворів в листових заготовках та профілях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Проскураков Ю. Г. Объемное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскураков. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с.
2. Розенберг А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – К. : Наукова думка, 1990. – 223 с.
3. 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». – Харків, 2011. – № 45. – С. 124–131.

Калюжний О. В. – ст. викл. НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: av-k@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 11.10.2012 р.