

**МАШИНОЗНАВСТВО.
ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ**

УДК 621.73.016

А.Г. Абисв, інж.
С.П. Гожій, к.т.н., доц.
Л.Т. Кривда, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України „КПІ”

**НОРМАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ НА КОНТАКТІ ПРИ ШТАМПУВАННІ
ОБКочУВАННЯМ**

Стаття присвячена аналізу розподілу питомих зусиль на контактні при штампуванні обкочуванням циліндричних заготовок.

Задачу розв'язано шляхом сумісного розглядання умов рівноваги та пластичності. Визначено умови на контурі контактної зони. Враховано крайові ефекти на вільній границі локалізованого осередку та в районі центральної западини.

У висновках порівнюються результати цієї роботи з аналогічними публікаціями та результатами експериментів.

1. Обґрунтування задачі

Закономірність розподілу питомих зусиль на контактні є вихідним питанням до визначення інтегральних параметрів процесу штампування обкочуванням. За об'ємною епорою контактних напружень розраховується не тільки осьове зусилля, а і координати точки прикладання рівнодіючої розподіленого технологічного навантаження, крутного моменту на осциляторі тощо. Величина та зона розміщення максимального контактного тиску, характер переміщення цієї зони в процесі деформування визначають стійкість інструментального оснащення.

У праці [1] цю задачу розв'язано шляхом сумісного аналізу рівняння рівноваги і наближеної умови пластичності. Одержано формули для визначення контактних нормальних напружень. Контактна поверхня розбивалась тільки на дві зони – проковзування та гальмування. Дуга дотику умовно замінювалась хордою, що її стягує.

Розрахункові епюри, побудовані за виразами, наведеними в [1], дещо відрізняються від дослідних кривих. Так, на вільній границі контактної поверхні контактні нормальні напруження змінюються, в той час як вони повинні залишатися постійними і дорівнювати фактичному опору деформації σ_y . Нормальні напруження в радіальному напрямку до центра заготовки не спадають до 0, як про це свідчать результати експериментальних досліджень [2], [3], [4]. Розрахункові значення максимальних контактних напружень дещо завищені відносно експериментальних даних.

Очевидно неточність результатів аналітичних досліджень є наслідком таких факторів: не враховано крайові ефекти біля вільної границі локалізованого осередку пластичної деформації; не враховано наявність контакту активного інструмента з заготовкою у зоні центральної стягнутості; передбачено наявність розриву дотичних напружень на контактні при зміні їх знаку. Метою цієї роботи є врахування перелічених факторів.

2. Аналіз розподілу тиску на контактній поверхні

На рис. 1 показано схему витікання металу з локалізованого осередку пластичної деформації залежно від інверсного відносного контакту λ .

За $\lambda < 4,5$ метал витікає у радіальному напрямку. Формоутворення відбувається за рахунок бокового випинання, показаного на рис. 1 пунктиром. Зі збільшенням λ пляма звужується. Радіальний плин стримується зсувними зусиллями вздовж контуру локалізованого осередку та силами контактної тертя. Починаючи з моменту $\lambda = 4,5$, енергетично можливим стає вигин позаконтактної частини заготовки навколо жорсткого шарніра $A_1B_1A_2B_2$, а із зростанням λ жорсткі зони повертаються навколо миттєвого центра швидкостей C . Напрямок плину металу змінюється від радіального до переважного тангенціального.

Коли λ стає більшим за 12,6, позаконтактні, прилеглі до контактної контуру, зони змикаються. Вигин затухає, та виконуються енергетичні умови для пластичного випинання біля приконтактної контуру (рис. 1). Геометрична зміна форми заготовки припиняється.

Утворення внаслідок випинання пластичної хвилі призводить до швидкого вичерпання запасу пластичності. Це виявляється в утворенні на поверхні обкочування луски, що відділяється. Отже, з точки зору технологічної доцільності можна вважати за оптимальний процес деформування обкочуванням при максимальному значенні показника $\lambda \approx 12,6$, при якому матеріал пливе в радіальному напрямку.

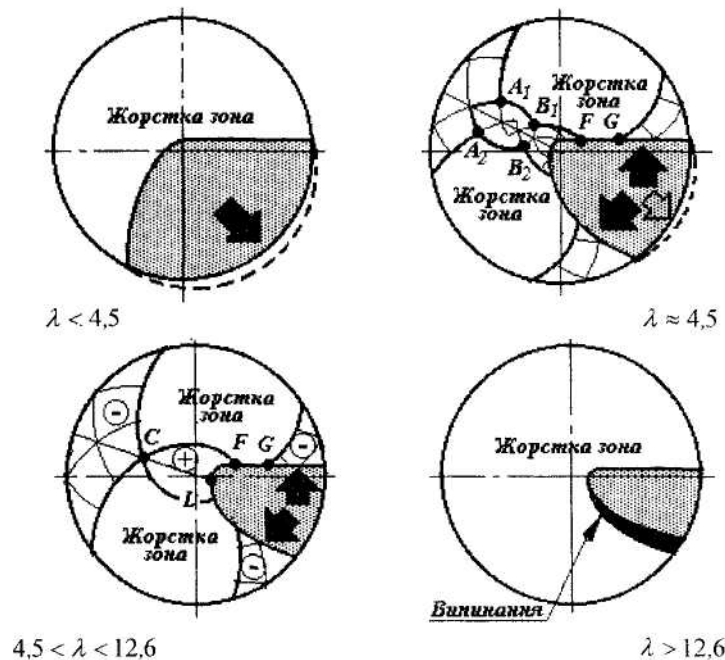


Рис. 1. Схеми витікання металу з локалізованого осередку

За пластичного плину вздовж координати φ циліндричної системи ρ, φ, Z (Z – вісь заготовки) головні нормальні напруження P і σ_φ є максимальним та мінімальним відповідно, а напруження σ_ρ буде середнім. Тоді наближене рівняння пластичності запишеться у вигляді:

$$P - \sigma_\varphi = \beta \cdot \sigma_f, \tag{1}$$

де β – коефіцієнт Лодє, а σ_f дорівнює інтенсивності напружень σ_f за відповідної температури, швидкості та ступеня деформації.

Сумісне розв'язання (1) з умовою рівноваги, наведеною в [5], приводить до рівняння в диференціалах за координатою φ :

$$\frac{dP}{\beta \cdot \sigma_f \pm \frac{2 \cdot \tau}{\text{tg} \gamma \cdot \sin \varphi}} = \frac{dh}{h}, \tag{2}$$

де h – товщина заготовки в точці (ρ, φ) , а γ – кут прецесії активного інструмента.

Залежно від характеру зміни дотичних напружень $|\tau| = \mu \cdot P$; $|\tau| = 0.5 \cdot \sigma_f$ та $|\tau| = \frac{\beta \cdot \sigma_f \cdot \rho \cdot (\varphi - \varphi^*)}{2 \cdot H}$ контактну поверхню розбиваємо на три можливі зони – проковзування, гальмування і прилипання відповідно. Тут H – товщина заготовки в точці (ρ, φ^*) , що відповідає $\tau = 0$.

Інтегруючи (2), одержуємо формули для $P_{(\rho, \varphi)}$ в зонах: випередження – $P_{(\rho, \varphi)}^{om}$, відставання – $P_{(\rho, \varphi)}^{om}$, гальмування з боку випередження – $P_{(\rho, \varphi)}^{mon}$, гальмування з боку відставання – $P_{(\rho, \varphi)}^{mon}$, прилипання з боку випередження – $P_{(\rho, \varphi)}^{prom}$ та прилипання з боку відставання $P_{(\rho, \varphi)}^{prom}$.

$$P_{(\rho, \varphi)}^{om} = \beta \cdot \sigma_f \cdot \frac{\delta_{01}}{\delta} \cdot \left[\frac{h^\delta}{h_{01}^{\delta_{01}}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta_{01}} + \frac{k(\rho)}{\beta} \right) - \frac{1}{\delta_{01}} \right]. \tag{3}$$

$$P_{(\rho,\varphi)}^{om} = \beta \cdot \sigma_f \cdot \frac{\delta_{02}}{\delta} \cdot \left[\frac{h^\delta}{h_{02}^{\delta_{02}}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta_{02}} + \frac{k(\rho)}{\beta} \right) - \frac{1}{\delta_{02}} \right]. \quad (4)$$

$$P_{(\rho,\varphi)}^{mon} = \beta \cdot \sigma_f \cdot \left[\left(1 + \frac{\delta}{2 \cdot \mu \cdot \beta} \right) \cdot \ln|h| - \left(1 + \frac{\delta_{k1}}{2 \cdot \mu \cdot \beta} \right) \cdot \ln|h_{k1}| \right]. \quad (5)$$

$$P_{(\rho,\varphi)}^{mom} = \beta \cdot \sigma_f \cdot \left[\left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot \mu \cdot \beta} \right) \cdot \ln|h| - \left(1 - \frac{\delta_{k2}}{2 \cdot \mu \cdot \beta} \right) \cdot \ln|h_{k2}| \right]. \quad (6)$$

$$P_{(\rho,\varphi)}^{mpom} = P_{k(\rho,\varphi)}^{mon} + \beta \cdot \sigma_f \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\delta \cdot \rho \cdot (\varphi - \varphi^*)}{2 \cdot \mu \cdot H} \right] \cdot \ln|h| - \left[1 + \frac{\delta_{k3}}{2 \cdot \mu} \right] \cdot \ln|h_{k3}| \right\}. \quad (7)$$

$$P_{(\rho,\varphi)}^{mpom} = P_{k(\rho,\varphi)}^{mom} + \beta \cdot \sigma_f \cdot \left\{ \left[1 - \frac{\delta \cdot \rho \cdot (\varphi - \varphi^*)}{2 \cdot \mu \cdot H} \right] \cdot \ln|h| - \left[1 - \frac{\delta_{k4}}{2 \cdot \mu} \right] \cdot \ln|h_{k4}| \right\}. \quad (8)$$

В цих виразах прийняті наступні позначення: $\delta_i = \frac{2 \cdot \mu}{\text{tg} \gamma \cdot \sin \varphi_i}$; $k_{(\rho)} = \frac{\sigma_0}{\sigma_f}$ – відносне напруження від впливу позаконтактної зони на контурі контактної плями. Індекси $0i$ вказують на початкове значення величини, що індексується, а індекси ki – на кінцеве в зоні, що передувала.

3. Тангенціальні напруження на границі контуру

На локалізованій осередок збоку недеформованих зон вздовж границі контуру діють нормальні тангенціальні напруження $\sigma_0(\rho)$. Для їх визначення слід розглянути умови на контурі, що мають місце при згинанні позаконтактної ділянки заготовки.

Умови рівноваги виділених жорстких зон (рис. 1, випадок $4,5 < \lambda < 12,6$) при пластичному згинанні виконуються лише за умови наявності пластичних зон, прилеглих до приконтактного осередку. Якщо деформацію розглядати як плоску, то зоною залежності точки G є кругова дуга радіусом R . Тоді рішення в цій зоні, згідно з задачею про початкові значення, відомі [6]. Оскільки кругова границя вільна від зовнішнього навантаження за умовою задачі, то поле сковзання зображається логарифмічними спіралями, а тангенціальні напруження визначаються формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_o(\rho) &= \sigma_f \cdot \left(\ln \frac{\rho}{R} - 1 \right), \\ (R - \rho_G) &\leq \rho \leq R. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В точці G (при $\rho = \rho_G$) вони досягають максимального значення:

$$\sigma_o(\rho_G) = \sigma_f \cdot \left(\ln \frac{R - \rho_G}{R} - 1 \right). \quad (10)$$

Іншою характерною точкою епюри граничних напружень є точка F . Оскільки F знаходиться біля вершини плями, то можна прийняти FL за кругову дугу, не навантажену з боку локалізованого осередку. За цієї умови кругова дуга FL приймається за зону залежності точки C . Тоді, з урахуванням впливу розтягнутої зони, σ_φ в точці F (на всій дузі FL) дорівнює 0.

У жорстко-пластичній інтерпретації задачі встановити характер розподілу тангенціальних напружень на проміжку FG (або LG) неможливо. До того ж за значень показника λ , близьких до оптимального, поля сковзання майже зникаються, тобто точка G зливається з точкою F і

напруження зазнають розриву. Умовно будемо вважати розподіл напружень на цьому проміжку лінійним. Тоді на проміжку $\rho_L < \rho < \rho_G$

$$\sigma_o(\rho) = \sigma_f \cdot \left(\ln \frac{\rho_G}{R} - 1 \right) \cdot \frac{\rho - \rho_L}{\rho_G - \rho_L}. \quad (11)$$

В роботі [7] показано, що ρ_L та ρ_G лінійно залежать від радіуса заготовки R і нелінійно від показника λ . За оптимальних умов обкочування, тобто якщо $\lambda = 12 \dots 12,6$, згадані радіуси можна записати через R : $\rho_L = 0,057 \cdot R$ та $\rho_G = 0,44 \cdot R$. З урахуванням цих обставин (11) набуває вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_o(\rho) &= -4,7 \cdot \sigma_f \cdot \left(\frac{\rho}{R} - 0,057 \right), \\ 0,057 \cdot R &\leq \rho < 0,44 \cdot R. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Таким чином, рівняння (9) та (11) повністю визначають умови на контурі контактної зони.

4. Питомі зусилля біля вільної границі контуру

Коректність визначення контактної тиску за виразами (3)–(8) порушується з просуванням до вільної границі локальної контактної плями, обмеженої радіусом заготовки R . Тангенціальний плин металу поступово переходить виключно в радіальну.

Для того, щоб описати фізичну модель процесу для цієї зони контакту, припустимо деякої ідеалізації.

Посилаючись на [5], замінимо реальну контактну пляму рівновеликим сектором AOB з центральним кутом $\zeta = 2 \cdot \pi / \lambda$, як це показано на рис. 2, а.

Замінимо умовно дугу AB хордою, що її стягує. Нехай площина, сліди якої AO_1 та BO_1 – бісектриси кутів O_1AB та O_1BA , є площиною розділу плинку. Утворений трикутник AO_1B , як і сектор AOB , за період одного циклу обкочування не змінює своєї форми. Тоді в межах цього трикутника $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, отже $\sigma_x = \sigma_y$. В площинах, паралельних xy , дотичні напруження відсутні, тобто $\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$, і діють лише дотичні напруження $\tau_{xz} = \tau_{zx} = \tau$. За таких умов задача зводиться до випадку осадження смуги кінцевої довжини [8]. Введемо позначення $\sigma_z = P$. Тоді спрощене рівняння рівноваги записується у вигляді:

$$\frac{dP}{dx} + \frac{2 \cdot \tau}{h} = 0.$$

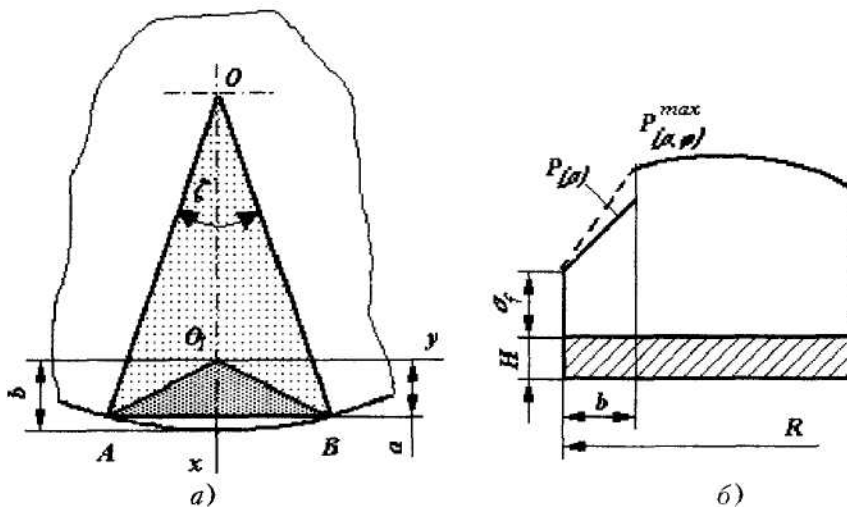


Рис. 2. До визначення крайових умов

Скористаємося висновками автора про незначний вплив на усереднене питоме зусилля законів розподілу сил тертя на контактні. Прийнемо дотичні напруження максимальними. Після інтегрування попереднього виразу знаходимо:

$$P_{(x)} = \beta \cdot \sigma_f \cdot \left(1 + \frac{a-x}{H}\right),$$

де a визначається за формулою

$$a = R \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{2}{\lambda}\right) = R \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}}{1 + \operatorname{tg} \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}}.$$

Замінімо тангенси відповідними малими кутами. Тоді

$$a = R \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{2 \cdot \lambda - \pi}{2 \cdot \lambda + \pi}.$$

Нормальні контактні напруження у виділеному трикутнику лінійно зростають (рис. 2, б) від σ_f до максимального значення $P(a)$, причому

$$P_{(a)} = \beta \cdot \sigma_f \cdot \left(1 + \frac{R}{H} \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{2 \cdot \lambda - \pi}{2 \cdot \lambda + \pi}\right)$$

Повертаючись до попередньої (циліндричної) системи координат, поточний радіус, який визначає положення точки a , дорівнює

$$\rho_{(a)} \approx R \cdot \left(1 - \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}\right). \quad (13)$$

Максимальний контактний тиск, обчислений за виразами для перетинів віддалених від краю контактної плями, може відрізнятись від знайденого з (13). Тому наближене стикування розв'язків може бути забезпечене заміною відрізка $P_{(\rho)}$ відрізком, що показаний на рис. 2, б пунктиром.

В такому випадку обчислюється за формулами для перетинів віддалених від краю контактної плями аж до $\rho = \rho_{(a)}$. Визначається $P_{[\rho_{(a)}]}^{\max}$, а далі $P_{(\rho, \varphi)}$ обчислюється за тими ж формулами, але обмежується значенням:

$$P_{(\rho)} = \left(P_{[\rho_{(a)}]}^{\max} - \sigma_f\right) \cdot \frac{R - \rho}{R - \rho_{(a)}} + \sigma_f. \quad (14)$$

5. Питомі зусилля в районі центральної западини

Відповідно до сформульованої фізичної моделі процесу вигину заготовки за межами локалізованого контактного осередку у її центральній зоні має бути поле розтягування (рис. 1, випадок $4.5 < \lambda < 12.6$). В результаті в межах цього поля має утворюватися западина. З розвитком деформації вона повинна поглиблюватися аж до місцевого руйнування.

На рис. 3 показано свинцевий взірець, осаджений обкочуванням до ступеня деформації $\varepsilon > 75\%$.

Характерний отвір в центральній зоні заготовки за походженням безумовно є результатом дії напружень розтягування, що якраз достеменно і свідчить про їх наявність. За умов оптимального режиму обкочування зовнішній радіус западини $r \approx 0,27 \cdot R$. Це співвідношення впливає з аналітичних досліджень і підтверджується експериментально.

Внаслідок утворення западини виникають умови для порушення взаємного контакту активного інструмента з заготовкою. Саме з цієї нагоди автори [5] в аналітичних дослідженнях обмежуються вимірюванням контактної плями в радіальному напрямку на проміжку $r \leq \rho \leq R$. Оскільки цикловий обтиск сумірний з глибиною западини, то насправді контактна пляма виходить за межі її зовнішнього радіуса r в бік центра заготовки.

В межах проміжку $r \leq \rho \leq R$ границі плями за координатою φ визначаються з трансцендентного рівняння проекції контуру контактної плями на площину торця заготовки [9], яке можна переписати у такому вигляді:

$$\frac{\rho}{\Pi} \cdot \cos \varphi + \varphi - \sqrt{\frac{\rho}{\Pi} - 1} - \arcsin \frac{\Pi}{\rho} = 0, \quad (15)$$

де $\Pi = \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \lambda^2}$ – параметр обробки обкочуванням, який за оптимальних ($\lambda \approx 12,6$) умов процесу [10] набуває значення $\Pi \approx 0,01 \cdot R$. Одержані в результаті розрахунку значення φ_1 та φ_2 є на заданому ρ кутовими координатами заднього та переднього фронтів контуру контакту відповідно.

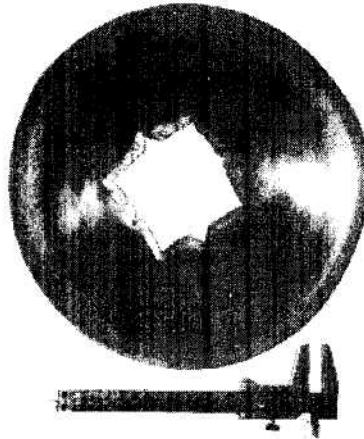


Рис. 3. Характер руйнування при штампуванні обкочуванням

З фізичної інтерпретації задачі про виникнення і розвиток центрального потоншення впливає, що при жорстко-пластичній моделі на деякому радіусі $\rho = m$ деформації ε_ρ та ε_φ пов'язані залежністю:

$$\varepsilon_{\rho(\rho=m)} = \varepsilon_{\varphi(\rho=m)} = 0,5 \cdot \varepsilon_z,$$

Тоді циклове тангенціальне переміщення при $\rho = m$ становить:

$$U_{\varphi(\rho=m)} = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot \varepsilon_{\varphi(\rho=m)} = \pi \cdot m \cdot \varepsilon_z.$$

Приймаючи розподіл подовження лінійним, знаходимо тангенціальне переміщення на радіусі $\rho = r$:

$$U_{\varphi(\rho=r)} = U_{\varphi(\rho=m)} \cdot \frac{2 \cdot r}{m+r} = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot \frac{r}{m+r} \cdot \varepsilon_z. \quad (16)$$

Дійсну тангенціальну деформацію при $\rho = r$ знайдемо з $2 \cdot \pi \cdot r \cdot \varepsilon_\varphi^* = U_{\varphi(\rho=r)}$, враховуючи (16):

$$\varepsilon_\varphi^* = \varepsilon_\rho^* = \varepsilon_z \cdot \frac{m}{m+r}. \quad (17)$$

Приймаємо, що контакт порушується при $\rho = r$. Тоді центральна зона, обмежена цим радіусом, зазнає лише розтягуючих напружень. Дійсна деформація центральної частини вздовж осі з урахуванням (17) знаходиться у вигляді:

$$\varepsilon_z^* = \varepsilon_\rho^* + \varepsilon_\varphi^* = \varepsilon_z \cdot 2 \cdot m \cdot (m+r)^{-1}.$$

Відповідно до результатів аналізу жорстко-пластичної моделі величина r змінюється мало і в орієнтовних розрахунках може бути прийнята $r \approx 0,3 \cdot R$. Значення m залежить від показника λ і за його оптимальних значень становить $m \approx 0,4 \cdot R$. Тоді з попереднього випливає:

$$\varepsilon_z^* = 1,14 \cdot \varepsilon_z.$$

Експериментально встановлено, що западина спостерігається лише з боку активного інструмента. Теоретично серединна площина має бути її площиною симетрії. Ця невідповідність пояснюється прогином заготовки, що не враховується теоретично. Отже, остаточно глибина западини заготовки з початковою товщиною H_0 знаходиться за формулою:

$$\delta = H_o \cdot (\varepsilon_z^* - \varepsilon_z) \approx H_o \cdot 0,14 \cdot \varepsilon_z. \quad (18)$$

Визначимо цикловий обтиск S , виходячи з того, що параметр обробки обкочуванням:

$$\Pi = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot \gamma} = \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot \lambda^2}.$$

Тоді

$$S = \frac{\pi^2 \cdot \gamma}{\lambda^2} \cdot R. \quad (19)$$

Бічна поверхня западини являє собою зрізаний конус з твірною у вигляді логарифмічної кривої. Якщо прийняти твірну за пряму, можна записати:

$$\frac{S}{\delta} = 1 - \frac{\rho^*}{r},$$

де ρ^* – радіус виходу западини на торець заготовки з урахуванням циклового обтиску. Скориставшись (18) і (19), з останнього маємо:

$$\rho^* = 0,3 \cdot R \cdot \left(1 - \frac{\pi^2 \cdot \gamma}{\lambda^2} \cdot \frac{1 - \varepsilon_z}{0,14 \cdot \varepsilon_z} \cdot \frac{R}{H} \right) \approx 0,3 \cdot R \cdot \left(1 - 0,025 \cdot \frac{1 - \varepsilon_z}{\varepsilon_z} \cdot \frac{R}{H} \right). \quad (20)$$

Границя контуру контакту в межах западини утворюється перетином поверхні западини з робочою поверхнею активного інструмента. З достатньою для практики точністю можна прийняти за проекцію цієї границі на площину торця заготовки дві прямі, що перетинаються при $\rho = \rho^*$ і проходять через точки (r, φ_1^*) та (r, φ_2^*) . Кутові координати цих точок визначаються з (15) підстановкою $\rho = r$.

Пряма, що проходить через точку (r, φ_2^*) майже співпадає з полярною віссю. Тоді рівняння другої прямої таке:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\rho^* \cdot \sin(\varphi_1^* + \alpha)}{\cos[\varphi - (\varphi_1^* + \alpha)]}, \\ r \cdot \sin \alpha &= \rho^* \cdot \sin(\varphi_1^* + \alpha), \\ \rho^* &\leq \rho \leq r. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Питомі зусилля на проміжку $\rho^* \leq \rho \leq r$ визначаються за виразами (3)–(8).

6. Обговорення результатів

Результати розрахунків, виконаних за методикою цієї роботи, порівнювались з [1] та опублікованими результатами експериментів. Встановлено, що розрахункові епюри розподілу контактних напружень як в тангенціальному, так і в радіальному напрямках наближаються до експериментальних.

Врахування крайових особливостей дещо відчувається на таких інтегральних параметрах, як осьове зусилля та момент на осциляторі. Зниження їх значень в межах 9...11 % пов'язане зі зниженням усередненого контактного тиску та радіальним зміщенням (до центра) точки прикладання рівнодіючої контактних напружень.

Результати розрахунків тангенціального розподілу контактних питомих зусиль в межах $\rho_{(a)} \leq \rho \leq r$ майже співпадають з наведеними в [1], але максимальні значення приблизно на $0,5 \cdot \sigma_f$ нижчі. Цю обставину можна вважати важливою, оскільки саме від максимальних контактних напружень залежить стійкість інструмента.

Врахування зони контакту в районі западини має лише якісний ефект. Контактні напруження дійсно падають до 0 на деякому радіусі від осі заготовки, як про це свідчать експерименти [2]–[4]. Що стосується кількісного впливу на інтегральні параметри процесу обкочування, то він неістотний. Це пов'язано, перш за все, з малою площею контактної плями в межах западини, а також зі стрімким зниженням питомих зусиль на цій ділянці.

Слід звернути увагу на роль підпирюючих напружень з боку зон, що межують з контактною. Зі зростанням тангенціальних напружень на границі контуру зони проковзування

звужуються або навіть зникають. З цього можна зробити корисні висновки: по-перше, напружений стан в локалізованому осередку характеризується всебічним стисненням, що є бажаним; по-друге – технологічне змащення не призводить до зниження інтегральних параметрів процесу обкочування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Кривда Л.Т.* Теорія і практика штампування обкочуванням. – К.: Аванпост, 1998. – 179 с.
2. *Агеев Н.П., Ревизцев А.Н.* Контактные напряжения при осадке обкатыванием цилиндрических заготовок на сферодвижном прессователе // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 3. – С. 62–65.
3. *Xinghua Pei, Zhou Deceng, Wang Zhongren.* Some basic problems of the rotary forging and its application / Proc. 2-nd Int. Conf. Rotary Metalwork Process., Stratford-Upon-Avon: Kempstone, 1982. – P. 81–90.
4. *Агеев Н.П., Пехота А.Д.* Контактные давления при штамповке обкатыванием // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. – № 3. – С. 4–6.
5. *Кривда Л.Т., Гожий С.П., Абыев А.Г.* Контактные напряжения при штамповке обкатыванием // Вестник НТУУ “КПИ” / Машиностроение. – № 33. – 1998. – С. 317–326.
6. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
7. *Кривда Л.Т., Гожий С.П.* Построение модели пластических течений при осадке обкатыванием цилиндрических заготовок // Прогресивна техніка і технологія машинобуд., приладобуд. і зварювальн. в-ва: Праці Міжнародної науково-технічної конференції. – Т. 11. – Київ, 1998. – С. 328–332
8. *Сторожев М.В, Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением: Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
9. *Кривда Л.Т.* Геометрия контакта при осадке цилиндрических деталей с обкатыванием // Вестн. Киев. политехн. ин-та / Машиностроение. – 1981. – № 18. – С. 12–15.
10. *Кривда Л.Т., Абыев А.Г.* Оптимальные режимы штамповки обкатыванием осесимметричных деталей // Прогресивна техніка і технологія машинобуд., приладобуд. і зварювальн. в-ва: Праці Міжнародної науково-технічної конференції. – Т. 11. – Київ, 1998. – С. 360–365.

АБИЄВ Адалат Гусейн-Огли – інженер, стажист кафедри обробки металів тиском ММІ Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– штампування обкочуванням.

Адреса: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ “КПІ”, ММІ.

Тел.: 441-19-19.

ГОЖІЙ Сергій Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ММІ.

Наукові інтереси:

– наукові основи, машини та технологія штампування обкочуванням.

Адреса: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ “КПІ”, ММІ.

Тел.: 241-76-83.

КРИВДА Леонід Трохимович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри обробки металів тиском ММІ Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– локальні методи деформування.

Адреса: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ “КПІ”, ММІ.

Тел. 441-19-19.