

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ КЛИНА НА ДЕФОРМОВНІСТЬ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕСІ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЇ ПРОКАТКИ

*Розглянуто процес накопичення деформацій в заготовці при поперечно-клиновій прокатці та вплив геометрії інструмента на величину використаного ресурсу пластичності.*

*Визначено, що найнебезпечнішими, з погляду руйнування, є осьова зона прокочуваної заготовки та верхня частина поверхні контакту клина і заготовки.*

### Вступ

Останнім часом значну частину циліндричних ступінчастих заготовок в крупносерійному і масовому виробництві виготовляють способом поперечно-клинової прокатки. Переваги цього способу полягають у високій продуктивності, відносній простоті устаткування, високій геометричній точності одержуваних заготовок.

Основною причиною браку заготовок, отриманих способом поперечно-клинової прокатки є поява макротріщин на осі заготовки. Наявність такої макротріщини в готовій деталі істотно знижує її надійність і скорочує довговічність. Тому актуальною є задача прогнозування на стадії проектування технологічного процесу ймовірності виникнення макротріщин та оцінки впливу параметрів процесу поперечно-клинової прокатки на якість готових виробів.

Процес поперечно-клинової прокатки супроводжується складним навантаженням здеформованих заготовок. Цим обумовлюється складність постановки і розв'язання крайової задачі теорії пластичності для такого процесу. Слід зазначити, що розв'язок крайової задачі сумісно з умовою деформовності дозволить установити вплив основних параметрів процесу на інтенсивність накопичення та заліковування пошкоджень.

Виконані дослідження [1, 2] підтвердили, що з несприятливим поєднанням таких основних параметрів процесу поперечно-клинової прокатки, як кути нахилу бічної грані клина і його загострення, ступеня обтиску й температури в суцільній заготовці може з'явитися макротріщина на її осі. Таке руйнування називають «розкриття порожнини» або «Ефект Маннесмана». Поряд з цим спостерігається пошкодження контактної поверхні заготовки й клина.

В даній роботі виконані дослідження процесу пластичного деформування, який відбувається під час поперечно-клинової прокатки, та оцінено вплив основних параметрів процесу на величину використаного ресурсу пластичності в небезпечних зонах.

### Визначення закону впливу геометрії інструмента на показник напруженого стану

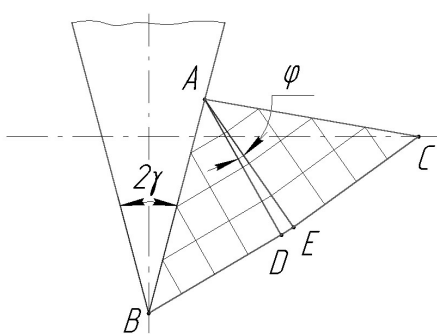


Рис. 1. Поле ліній ковзання

Для розв'язання даної задачі розглянуто процес втискування клина в заготовку. Тертя на поверхні контакту не враховується. Під час втискування клина матеріал заготовки видавлюється по обидві його сторони. Поле ліній ковзання, згідно з [3], має вигляд, показаний на рис. 1.

В даній статті розглядається процес поперечно-клинової прокатки, який використовується для виготовлення заготовки шестірні насоса НШ32В на ВАТ «Вінницький завод тракторних агрегатів» (ВАТ «ВЗТА»). При цьому кут клина становить  $2\gamma = 100^\circ$ .

Припускаємо, що вздовж  $AB$  контактний тиск постійний. Позначимо глибину втискання клина  $OB$  через  $h$ , довжину  $AC$  — через  $l$  ( $AC = AB$ , виходячи з рівності трикутників  $ABD$  і  $ACE$ ). Довжина  $l$  і тиск  $p$  невідомі. Області рівномірного напруженого стану сполучені центрованим полем  $ADE$  з кутом  $\varphi$  [4].

В трикутнику  $ABD$   $\theta = \frac{\pi}{4} - \gamma$ , а середній тиск позначимо через  $\sigma'$ . Параметр  $\beta$  — постійний в даній області і становить

$$\beta' = \frac{\sigma'}{2\kappa} - \frac{\pi}{4} + \gamma. \tag{1}$$

В трикутнику  $ACE$   $\theta = \frac{\pi}{4} - \gamma + \varphi$ ,

$$\sigma = -\kappa, \tag{2}$$

а параметр  $\beta$  постійний

$$\beta'' = -\frac{1}{2} - \frac{\pi}{4} + \gamma - \varphi. \tag{3}$$

Оскільки у всій пластичній області  $\beta = \text{const}$ , то  $\beta' = \beta''$ , звідки отримаємо

$$\sigma' = -\kappa(1 + 2\varphi). \tag{4}$$

Лінія  $AC$  утворює кут  $(\gamma - \varphi)$  з горизонтальною віссю, тому з рис. 1 знаходимо

$$l \cos \gamma - h = l \sin(\gamma - \varphi). \tag{5}$$

Враховуючи нестисливість середовища отримуємо

$$h^2 \operatorname{tg} \gamma = (l \cos \gamma - h) [l \cos(\gamma - \varphi) + (l \cos \gamma - h) \operatorname{tg} \gamma]. \tag{6}$$

Виключаємо з рівняння (5) і (6)  $l/h$  і після спрощень отримаємо

$$2\gamma = \varphi + \arccos \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \tag{7}$$

з (7) визначаємо  $\varphi$ .

Оскільки кут  $2\gamma > 90^\circ$ , то перед клином утворюється загальмована зона, яка представляє собою жорсткий клин з кутом  $2\gamma = 90^\circ$  [5], тому в подальших розрахунках будемо приймати дане значення кута клина.

Якщо  $2\gamma = 90^\circ$ , то  $\varphi = 31,3669^\circ$ .

Показане на рис. 1 поле ліній ковзання відповідає процесу втискання симетричного твердого клина з кутом  $2\gamma$  в напівнескінченне жорстко-пластичне середовище. Така модель справедлива для

початкового етапу процесу впровадження  $h/a < 8,4$  [3].

Із зростанням глибини втискання  $h$  слід враховувати, що в процесах поперечно-клинової прокатки розміри заготовки обмежені і в неї одночасно втискаються два однакові клини з протилежних сторін. Тому, починаючи з глибини втискання  $h/a > 8,4$ , нами запропоновано поле ліній ковзання, показане на рис. 2.

Параметр  $\alpha$  — постійний в даній області  $BGQ$  і рівний

$$\alpha' = \frac{\sigma}{2\kappa} + \theta = \frac{\sigma}{2\kappa} - \frac{\pi}{4}, \tag{8}$$

де  $\theta = \frac{\pi}{4}$ .

В трикутнику  $ADB$  параметр  $\alpha$  постійний

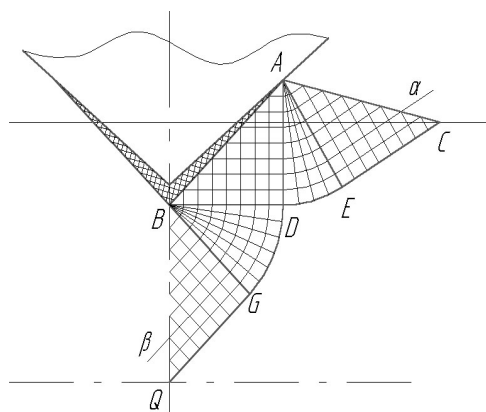


Рис. 2. Поле ліній ковзання у разі втискання клина в заготовку кінцевих розмірів

$$\alpha'' = \frac{\sigma}{2\kappa} + \theta = \frac{-\kappa(1+2\varphi)}{2\kappa} + \frac{\pi}{4} - \gamma = -\frac{1}{2} - \varphi + \frac{\pi}{4} - \gamma. \tag{9}$$

Оскільки у всій пластичній області  $\alpha = \text{const}$ , отже  $\alpha' = \alpha''$ , звідки визначаємо  $\sigma$  в трикутнику  $BGQ$ :

$$\sigma = 2\kappa \left( -\frac{1}{2} - \varphi - \gamma + \frac{\pi}{2} \right). \tag{10}$$

Тиск  $p$  є одним з головних напружень, він дорівнює

$$p = \sigma' - \kappa = -\kappa(1+2\varphi) - \kappa = -\kappa(1+2\varphi+1) = -2\kappa(1+\varphi).$$

Показник напруженого стану

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\sigma}{\kappa}. \tag{11}$$

В області  $ACE$   $\eta = \sqrt{3}$ . В області  $ABD$   $\eta = -\sqrt{3}(1+2\varphi)$ . В області  $BGQ$   $\eta = 2\sqrt{3} \left( -\frac{1}{2} - \varphi - \gamma + \frac{\pi}{2} \right)$ .

Визначаємо швидкості кутових деформацій в області  $ABD$  за формулою

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\Delta V_x}{\Delta y} + \frac{\Delta V_y}{\Delta x}. \tag{12}$$

Тобто, визначається сума відношень проєкцій швидкості руху частинки матеріалу заготовки до елементарного переміщення.

Скористаємося рівняннями для швидкостей вздовж ліній ковзання:

$$\begin{aligned} du - v d\theta &= 0; \\ dv + u d\theta &= 0, \end{aligned} \tag{13}$$

де  $\theta$  — кут повороту лінії ковзання на нескінченно малому відрізку.

Оскільки в пластичній області  $ABDEC$   $\theta = \text{const}$ , тому  $v = 0$ , а  $u = u(\beta)$  в трикутниках рівномірного напруженого стану і  $u = c + \psi(\rho)$  в центрованому полі. Тоді

$$u = \sqrt{2} V \sin \gamma,$$

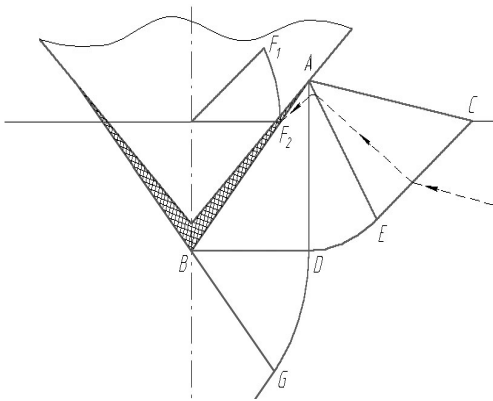


Рис. 3. Одиниця діаграма швидкостей

де  $V$  – швидкість втискання клина.

Швидкість довільної частинки направлена по траєкторії її руху (рис. 3). В області  $ACE$  умовна частинка металу рухається з постійною швидкістю в напрямку фокусу  $F1$ , в секторі  $ADE$  швидкість точки і напрям її руху змінюються, оскільки фокус переміщується по дузі від точки  $F1$  до  $F2$ , в області  $ABD$  швидкість точки знову стає постійною і направлена до фокусу  $F2$ . Для розрахунку швидкості розглядаємо область поблизу точки  $A$ .

Проектуючи швидкість  $u$  на траєкторію руху частинки, визначаємо швидкості кутових деформацій біля точки  $A$ .

Накопичену пластичну деформацію знаходимо за формулою

$$e_u = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^t \dot{\gamma}_{xy} d\tau. \tag{14}$$

Під час визначення використаного ресурсу пластичності на першому етапі процесу поперечно-клинової прокатки враховували, що для прийнятої моделі пластична область змінюється так, що її конфігурація весь час зберігає геометричну подібність своєму початковому положенню. Тому процес

навантаження можна розглядати як простий, для якого значення  $\eta$  і  $\mu_\sigma$  залишаються постійними протягом всього процесу формозмінення і залежать тільки від кута  $2\gamma$  клину. Як впливає з аналізу напружено-деформованого стану, небезпечними, з точки зору руйнування, є точки  $A$  і  $Q$  (рис. 2). В цих точках  $\mu_\sigma = 0$  і значення  $\eta$  мають найбільші значення. Розрахунок проводився для найбільшої глибини втискання клина  $h = 14,5$  мм. Оскільки в даному випадку  $\mu_\sigma = 0$  протягом всього процесу формозмінення, то для оцінки використаного ресурсу пластичності на даному етапі поперечно-клинової прокатки використовували граничну криву  $e_p(\eta, 0)$  для сталі 18ХГТ з температурою  $1100$  °С, яка є результатом перетину поверхні граничних деформацій  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  [5] з площиною  $\mu_\sigma = 0$ . Використаний ресурс пластичності розглядали за критерієм

$$\psi = \int_0^t \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}. \quad (15)$$

В результаті для небезпечних точок  $A$  і  $Q$ , з глибинами проникнення клина рівними технологічним, отримані такі значення використаного ресурсу пластичності  $\psi_A = 0,91$ ,  $\psi_Q = 0,99$ . Тобто, з прийнятими параметрами процесу поперечно-клинової прокатки ймовірність виникнення тріщин на осі заготовки досить висока, що й підтверджується наявністю браку прокатаних заготовок.

### Висновки

Розглянуто процес накопичення деформацій в процесі поперечно-клинової прокатки. Встановлено, що у разі втискання клина найнебезпечнішими, з погляду руйнування, є осьова зона прокочуваної заготовки і верхня частина поверхні контакту клина і заготовки. З використовуваними на ВАТ «ВЗТА» параметрами процесу поперечно-клинової прокатки в цих зонах ймовірність руйнування може бути дуже високою, оскільки  $\psi \approx 1$ . В осьовій зоні має місце всебічний нерівномірний розтяг, який накладається на деформацію чистого зсуву ( $\mu_\sigma = 0$ ), а в зоні контакту — розтяг з крученням. Причому частка напружень розтягу збільшується зі зростанням глибини втискання клина  $h$ .

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сегал В. М. Разрушение в осевой зоне заготовок при пластическом формоизменении металлов // *Машиноведение*. — 1980, — № 2, — С. 108—113.
2. Красневский С. М., Макушок Е. М., Щукин В. Я. Разрушение металлов при пластической деформации. — Мн.: Наука и техника, 1983. — 173 с.
3. Hill R. The mathematical theory of plasticity. — Oxford: At the clarendon press, 1950. — 408 p.
4. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. — М.: Наука, 1969. — 420 с.
5. Потапкин В. Ф. Решение некоторых задач локальной пластической деформации // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Зб. наук. пр. — Краматорськ — Слов'янськ: ДДМА, 2003. — С. 6—16.
6. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. — К.: Вища школа, 1983. — 175 с.
7. Сивак И. О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Зб. наук. пр. — Краматорськ — Слов'янськ: ДДМА. — 2001. — С. 168—171.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування

Надійшла до редакції 28.10.04  
Рекомендована до друку 8.02.05

**Сухоруков Сергій Іванович** — аспірант кафедри технології та автоматизації машинобудування.  
Вінницький національний технічний університет