

Вінницький національний технічний університет

Сухоруков Сергій Іванович

УДК 621.771.014:621.771.016

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛОСКОЇ
ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЇ ПРОКАТКИ СТУПІНЧАСТИХ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сивак Іван Онуфрійович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри технології та автоматизації
машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сатонін Олександр Володимирович,
Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ),
професор кафедри автоматизованих металургійних машин та
обладнання

кандидат технічних наук
Гожій Сергій Петрович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсо-
зберігаючих процесів

Захист відбудеться " 30 " 04 2010 р. о 15³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.03 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210, ГУК.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95).

Автореферат розісланий " 25 " 03 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.В. Дерібо

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом в Україні та в інших країнах особлива увага приділяється якості і технологічній спадковості готових виробів, які отримують обробкою металів тиском. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є удосконалення процесів пластичного формозмінення заготовок при високих температурах в умовах об'ємного напруженого стану, що дозволить на стадії проектування технологічних процесів обґрунтовано призначати їх параметри, з метою максимального використання резервів пластичності металу заготовки. Повною мірою це відноситься до розробки та удосконалення процесів плоскої поперечно-клинової прокатки (ППКП).

Для удосконалення технології ППКП ступінчастих циліндричних заготовок необхідний подальший розвиток теоретичних методів досліджень процесу та уточнення на цій основі розрахунку його параметрів. Наявні методи розрахунку геометрії контактних поверхонь, зусилля прокатки, формозмінення та інших параметрів є наближеними, що не дає можливості визначити дійсні значення параметрів напружено-деформованого стану. Один із напрямків удосконалення технології ППКП полягає у виявленні впливу температури та напружено-деформованого стану і законів його зміни на величину використаного ресурсу пластичності та обумовлену ним технологічну спадковість виробів.

Основна проблема, яка характерна для процесу ППКП ступінчастих заготовок, пов'язана з появою браку, обумовленого макротріщинами на осі заготовки, а в окремих випадках і утворенням шийки в процесі пластичного формозмінення.

Виходячи з цього, задача удосконалення процесу плоскої поперечно-клинової прокатки шляхом розробки методів оцінки впливу параметрів процесу на ступінь використаного ресурсу пластичності ψ матеріалу заготовки та впливу ψ на якість та технологічну спадковість готових виробів є актуальною як в науковому, так і в практичному аспекті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконані у відповідності з науковим напрямом однієї з провідних наукових шкіл Вінницького національного технічного університету "Розвиток феноменологічних теорій руйнування матеріалів при великих пластичних деформаціях та застосування їх для розробки маловідходних технологій обробки металів тиском". Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачених планами Міністерством освіти і науки України (номер державної реєстрації тем 0102U002270, 0105U002422), автор брав участь у виконанні тем як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якості ступінчастих циліндричних заготовок на основі розвитку методів розрахунку напружено-деформованого стану і розробки рекомендацій по удосконаленню технології плоскої поперечно-клинової прокатки.

Для досягнення вказаної мети в роботі були поставлені і вирішені такі завдання:

- уточнити та розширити можливості методики розрахунку напружено-деформованого стану металу заготовки для найбільш повного врахування впливу технологічних параметрів процесу плоскої поперечно-клинової прокатки на якість отриманої заготовки;
- розробити математичні моделі для виявлення небезпечної, з точки зору руйнування, зони заготовки та розробити методи розрахунку шляхів деформування частинок цієї зони;
- провести експериментальну перевірку результатів математичного моделювання та уточнити вихідні дані для його числової реалізації;
- розробити методи оцінки впливу основних параметрів процесу плоскої поперечно-клинової прокатки на величину використаного ресурсу пластичності з врахуванням об'ємності схеми напруженого стану;
- розробити практичні рекомендації по удосконаленню існуючої технології за рахунок вибору раціональних конструктивних параметрів інструмента та технологічних параметрів процесу.

Об'єкт дослідження – процес пластичного деформування при плоскій поперечно-клиновій прокатці.

Предмет дослідження – закономірності пластичного деформування та зміни величини використаного ресурсу пластичності матеріалу ступінчастих циліндричних заготовок при плоскій поперечно-клиновій прокатці.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження пластичності металів базуються на законах і методах механіки суцільного середовища, математичної та прикладної теорії пластичності, прикладної теорії деформуємості. Для дослідження процесів пластичної деформації використані числові та експериментально-розрахункові методи з використанням ЕОМ.

Експериментальні дослідження виконувались як в лабораторних, так і у виробничних умовах з використанням лабораторного і заводського обладнання. Обробка експериментальних даних проводилась методами математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримано числову математичну модель напружено-деформованого стану ступінчатої циліндричної заготовки в процесі ППКП, яка дозволяє встановити вплив параметрів процесу на граничне формозмінення та технологічну спадковість.

2. Вперше отримано регресійну залежність величини використаного ресурсу пластичності від параметрів інструмента та температурного режиму прокатки, що дало можливість прогнозувати якість заготовки.

3. На основі відомих критеріїв деформуємості запропоновано критерії, які дозволяють оцінити вплив температури на величину використаного ресурсу пластичності при ППКП.

4. Встановлено вплив геометрії західної частини та довжини калібрувальної ділянки інструмента при ППКП зі ступенем обтиснення $\delta=1,8\div 2,0$ на ймовірність появи макротріщини в осьовій зоні заготовки.

Практичне значення одержаних результатів.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень запропоновані заходи, щодо усунення браку ступінчастих циліндричних заготовок, пов'язаного з появою макротріщини в осьовій зоні заготовки.

1. Розроблено методики оцінки деформуємості заготовок при пластичному деформуванні при високих температурах в процесі ППКП для ступеня обтиснення $\delta=1,8\div 2,0$ з використанням запропонованих критеріїв деформуємості.

2. Розроблено комплекс програмних засобів для розрахунку траєкторії навантаження довільної точки в просторі трьох безрозмірних показників напружено-деформованого стану, що дозволило оцінити вплив параметрів процесу на граничне формозмінення.

3. Запропоновано нову схему дослідного зразка заготовки для досліджень кінематики течії металу заготовки при ППКП.

4. Запропоновано інженерну методику вибору основних параметрів процесу ППКП, які дозволяють забезпечити необхідний рівень величини використаного ресурсу пластичності в небезпечній зоні заготовки.

5. Розроблено методику та програмні засоби автоматизованого розрахунку конструктивних параметрів інструмента та технологічних режимів для виготовлення циліндричних ступінчастих заготовок методом плоскої поперечно-клинової прокатки.

Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних продуктів, а також у вигляді конкретних технологічних рекомендацій прийнято до впровадження на ВАТ „ВАЗ” (м. Вінниця).

Окремі результати дисертації впроваджені у навчальному процесі на кафедрі „Технології та автоматизації машинобудування” ВНТУ в рамках викладання дисципліни „Проектування та виробництво заготовок деталей машин”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень отримані автором самостійно.

В роботах, що опубліковані у співавторстві, автору належать: розрахунок НДС та

методики оцінки деформуєності заготовок [1,4,5,7,12-14]; розробка алгоритму та програмного забезпечення для аналізу отриманих експериментальних даних [2]; розроблено алгоритм роботи системи обробки даних та виконано його комп'ютерну реалізацію [6]; удосконалено геометрію інструменту для виготовлення заготовок методом ППКП [9]; виконана оцінка параметрів поля напружень за допомогою метода скінчених елементів [10]; розроблено алгоритм визначення розмірів площі контакту інструмента та заготовки [16].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях, серед них:

Міжнародна науково-технічна конференція „Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии” м. Краматорськ, 2002 р.; *Congres International de Stiinta si Ingineria Materialelor* (м. Ясси, Румунія, 2002 р.); Міжнародна науково-технічна конференція „Новые достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением” м. Краматорськ, 2003 р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением” (м. Тула, Росія, 2004, 2009 р.р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Новые методы и средства исследования процессов и машин обработки давлением» м. Краматорськ, 2005 р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением” (м. Санкт-Петербург, Росія, 2005 р.); Міжнародна науково-технічна конференція „Современные методы моделирования процессов обработки металлов давлением” м. Краматорськ, 2006 р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Информационные технологии в обработке давлением” м. Краматорськ, 2008 р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування” м. Луцьк, 2009 р., а також науково-технічні конференції ВНТУ (2002 - 2009 р.р.) та наукові семінари кафедри ТАМ ВНТУ.

Публікації. Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 16 наукових роботах, з них 8 статей у фахових наукових виданнях з переліку ВАК України. По результатам роботи отримано патент України.

Обсяг і структура дисертаційної роботи. Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 162 найменування, 4 додатків на 25 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 189 сторінок (з них 148 сторінок основної частини, 53 рисунки, 8 таблиць).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та задачі дослідження, дана характеристика об'єкта, предмета і методів дослідження. Викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, апробацію результатів та структуру дисертації, відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуто сучасний стан процесу ППКП, наведено результати аналізу літературних джерел та сформульовані задачі дослідження.

Розглянуті відомі методи аналізу напружено-деформованого стану при поперечно-клиновій прокатці та можливість їх застосування для розв'язання поставлених задач.

Проведено аналіз критеріїв деформуєності Г.Д. Деля, В.А. Огороднікова та В.М. Михалевича з точки зору можливості їх використання для оцінювання граничного формозмінення в процесах плоскої поперечно-клинової прокатки.

Перевірено необхідність врахування зміни опору деформації σ_x та міждеформаційних пауз при високих температурах (900 – 1100°C). Розглянуто методики Андреюка Л.В., Бровмана М.Я. та Сатоніна А.В.

Встановлено, що відомі методи теоретичних та експериментальних досліджень процесу плоскої поперечно-клинової прокатки недостатні для чіткого визначення параметрів на-

пружено-деформованого стану для ступеня обтиснення $\delta=1,8\dots 2,0$, який є характерним для виготовлення ступінчастих циліндричних заготовок.

Проведено аналіз методів моделювання взаємодії заготовки з інструментом. На основі проведеного аналізу сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі проведено вибір та дано обґрунтування напрямку та методам дослідження. Найбільш ефективним напрямком удосконалення технології плоскої поперечно-клинової прокатки є вибір раціональних параметрів геометрії інструменту та температурного режиму процесу. Враховуючи складний характер пластичної течії металу поставлене завдання розв'язувалось з використанням різних методів: метода ліній ковзання, інженерного метода, метода скінчених елементів. Оцінку достовірності розроблених математичних моделей здійснено визначенням напружено-деформованого стану методом твердості та величини використаного ресурсу пластичності методом планування експерименту.

У третьому розділі проведено аналіз кінематики течії металу і напружено-деформованого стану в процесі ППКП. Процес умовно поділили на три етапи: 1) вдавлювання клина в заготовку; 2) клин вдавнено на повну глибину, відбувається розширення створеної канавки; 3) калібрування заготовки.

Розрахунок напружено-деформованого стану для першого етапу проводили за допомогою методу ліній ковзання.

На другому етапі розглядали процес ППКП, як осесиметричну задачу.

На основі умови рівноваги елементарного об'єму заготовки отримали наступне диференціальне рівняння

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + 2 \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho \operatorname{tg} \theta} = 0, \quad (1)$$

де σ_ρ , σ_θ , $\tau_{\rho\theta}$ – компоненти тензора напружень, ρ – радіус, θ – кут.

Умову пластичності Треска-Сен-Венана з урахуванням зміцнення запишемо у вигляді

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = A e_u^n, \quad (2)$$

де A , n – коефіцієнти апроксимації, які залежать від матеріалу заготовки, e_u – ступінь деформації.

За методикою Л.В. Андрюка була побудована крива течії для сталі 18ХГТ при температурі 950°C, яку апроксимували залежністю $\sigma_u = 1,695 e_u^{0,1913}$, а залежність e_u від ρ при $\alpha = 0$ апроксимували залежністю $e_u = 0,446 e^{-4,8\rho}$. З урахуванням граничних умов (при $\rho = r$; $\sigma_\rho = 0$) та $\tau_{\rho\theta} = -\mu \sigma_\theta$ в зоні контакту заготовки з інструментом розв'язок рівняння (1) має вид:

$$\sigma_\rho = -A'(2+m) \cdot \rho^m \cdot \int_0^\rho \frac{e^{-k\rho}}{\rho^{m+1}} d\rho + A'(2+m) \cdot r^m \cdot \int_0^r \frac{e^{-k\rho}}{\rho^{m+1}} d\rho, \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -A' \cdot e^{-k\rho} - A'(2+m) \cdot \rho^m \cdot \int_0^\rho \frac{e^{-k\rho}}{\rho^{m+1}} d\rho + A'(2+m) \cdot r^m \cdot \int_0^r \frac{e^{-k\rho}}{\rho^{m+1}} d\rho, \quad (4)$$

$$\tau_{\rho\theta} = A' \cdot \mu \cdot e^{-k\rho} + A'(2+m) \cdot \mu \cdot \rho^m \cdot \int_0^\rho \frac{e^{-k\rho}}{\rho^{m+1}} d\rho - A'(2+m) \cdot \mu \cdot r^m \cdot \int_0^r \frac{e^{-k\rho}}{\rho^{m+1}} d\rho, \quad (5)$$

де $m = \frac{2\mu}{\operatorname{tg} \alpha / 2}$ – приведений коефіцієнт тертя, μ – коефіцієнт тертя, α – кут нахилу клина,

$k = 4,8$ – коефіцієнт апроксимації, r – радіус границі пластичної зони.

Для побудови діаграми пластичності використовували апроксимацію В. А. Огороднікова $e_p(\eta) = e_p(0)\exp(-\lambda\eta)$, ($\lambda = \ln \frac{e_p(0)}{e_p(1)}$). На основі отриманої діаграми пластичності

$e_p(\eta)$ за методикою І.О. Сивака будували поверхню граничних деформацій $e_p(\eta, \mu_\sigma)$, яка описує залежність граничної деформації e_p від схеми напруженого стану для сталі 18ХГТ при температурі 1000 °С. Отриману поверхню граничних деформацій апроксимували залежністю

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,82 \exp(0,44\mu_\sigma - 0,54\eta), \quad (6)$$

де η - показник напруженого стану, μ_σ - параметр Надаї-Лоде.

Для оцінки величини використаного ресурсу пластичності ψ сталі 18ХГТ в інтервалі температур 900 °С – 1100 °С для випадку, коли знак кривизни траєкторії навантаження $e_u(\eta, \mu_\sigma)$ в просторі e_u, η, μ_σ не змінюється, запропоновано критерій деформуємості

$$\psi = \int_0^{e_u} \frac{\exp[-\gamma(T - 1000)]}{0,82 \exp[0,44\mu_\sigma - 0,54\eta]} de_u, \quad (7)$$

а для випадку, коли знак кривизни траєкторії навантаження $e_u(\eta, \mu_\sigma)$ в просторі e_u, η, μ_σ змінюється, критерій деформуємості приймає вигляд

$$\psi = \int_0^{e_u} n \frac{e_u^{n-1} \exp[-\gamma(T - 1000)]}{(0,82 \exp[0,44\mu_\sigma - 0,54\eta])^n} de_u, \quad (8)$$

де $n = 1 + a \frac{d\eta}{de_u} - b \frac{d\mu_\sigma}{de_u}$, a, b – емпіричні коефіцієнти, які для сталі 18ХГТ приймали рівними $a = 0,04, b = 0,025$.

В запропонованих критеріях використано підходи В.Л. Колмогорова (7) та В.А. Огороднікова (8) і В.М. Міхалевича (7), (8). При цьому в критеріях (7) і (8) залежність пластичності від схеми напруженого стану задана поверхнею граничних деформацій та врахована залежність ресурсу пластичності від температури.

В загальному випадку коефіцієнт γ залежить від температури і схеми напруженого стану, тобто $\gamma = \gamma(\eta, \mu_\sigma, T)$. В даній роботі для вибраного інтервалу температур 950 ... 1050 °С приймали значення γ сталим ($\gamma = 0,0025 \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

У четвертому розділі представлено експериментальні та теоретичні дослідження НДС та ресурсу пластичності при ППКП.

Для експериментального дослідження кінематики формозміни при плоскій поперечно-клиновій прокатці було проведено прокочування заготовок зі сталі 18ХГТ на стані поперечно-клинової прокатки АКС 352833С з використанням попередньо підготовленої заготовки, яка складалась з двох циліндричних частин. Для розрахунку компонент тензора швидкостей деформацій на зовнішній поверхні внутрішнього циліндру була нанесена сітка. В результаті вимірювань переміщень вузлів координатної сітки в процесі пластичної деформації одержали в вузлах координатної сітки експериментальні залежності ейлеревих (поточних) z, r координат від лагранжевих (початкових) z_0, r_0 . Для побудови апроксимацій $z(z_0, r_0), r(z_0, r_0)$ експериментально одержаних результатів вимірювань координат точок ділильної сітки використовували згладжуючі кубічні сплайни

$$S_i(x) = \sum_{j=0}^3 a_j^i (x - x_i)^j, \quad x \in [x_i, x_{i+1}], \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (9)$$

Роль критерію якості апроксимації в цьому випадку відіграє функціонал

$$I(f) = \int_{x_l}^{x_n} |S(x)|^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} (f_i - S(x_i))^2, \quad (10)$$

де f_i – значення згладжуючої функції у вузлі, $\rho_i \geq 0$ – вагові коефіцієнти, x_l, x_n – межі області визначення функції $f(x)$.

Було розроблено програмний модуль, в який включено процедуру обчислення значень сплайн-функції та її першої і другої похідних у довільній точці зони визначення, а також процедуру побудови графіка сплайну.

Для визначення інтенсивності напружень в заготовках, отриманих при поперечно-клиновій прокатці, було проведено дослідження розподілу твердості по меридіональному перерізу заготовки, з використанням тарувального графіка в координатах інтенсивність напружень – твердість – ступінь деформації $\sigma_u - HV - e_u$.

Оскільки досліджуваний процес ППКП, проходить при високих температурах (900–1100 °С), то виміряти твердість заготовок в процесі деформування практично неможливо. Тому тарувальний графік (рис. 1) для сталі 18ХГТ побудовано за методикою Г.Д. Деля та результатами досліджень, які отримав І.С. Праведников.

Рис. 1. Тарувальний графік $\sigma_u - HV - e_u$ для сталі 18ХГТ:

1 – експериментальна крива при $T = 20$ °С; 2 – крива при $T = 950$ °С

На рис. 2, 3 приведено отриманий розподіл ступеня деформації та інтенсивності напружень по меридіональному перерізу заготовки.

Дослідження заготовок, отриманих ППКП, методом твердості дало можливість порівняти розподіл інтенсивності напружень, отриманий експериментально та за допомогою методу скінчених елементів. При цьому розходження одержаних результатів не перевищувало 12%.

Рис. 2. Розподіл ступеня деформації по меридіональному перерізу заготовки

Рис. 3. Розподіл інтенсивності напружень по меридіональному перерізу заготовки (МПа)

Для дослідження впливу параметрів процесу формозмінення заготовки на величину використаного ресурсу пластичності проводили фізичний експеримент за планом повного багатofакторного експерименту, де досліджуваними факторами були: кут нахилу бічної грані α , кут загострення β та температура заготовки на початку деформації T , а параметром оптимізації був використаний ресурс пластичності в небезпечній точці (точка 1, рис. 4), яка знаходиться на перетині осі з поперечною площиною симетрії заготовки.

Враховуючи те, що прокатка заготовки методом ППКП не дає можливості визначити використаний ресурс пластичності безпосередньо, використовували методику, запропоновану С.М. Красневським. З попередньо прокатої заготовки з небезпечної, з точки зору руйнування, зони вирізали циліндричний зразок. Після цього отриманий зразок осаджували до руйнування. Використаний ресурс пластичності після поперечно-клинової прокатки визначали за формулою

$$\psi = 1 - \frac{e_p^{ПКП}(-1;1)}{e_p(-1;1)}, \quad (11)$$

де $e_p^{ПКП}(-1;1)$ – гранична деформація при осадці циліндричного зразка вирізаного з прокатої заготовки; $e_p(-1;1)$ – гранична деформація при осаджуванні недеформованого циліндричного зразка.

В результаті проведених експериментів було отримано рівняння регресійної залеж-

ності використаного ресурсу пластичності (ψ) від кута нахилу бічної грані α (X_1), кута заготівки β (X_2) та температури T (X_3)

$$\psi = 0,82625 - 0,03375X_1 - 0,08875X_2 + 0,05125X_3 + 0,05125X_1X_2 + 0,02125X_1X_3 + 0,01625X_2X_3 - 0,01375X_1X_2X_3.$$

Дослідження за методом планування експерименту були проведені для оцінювання достовірності отриманих методик визначення впливу параметрів процесу поперечно-клинової прокатки на використаний ресурс пластичності за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ).

Встановлено, що отримана залежність задовільно описує вплив кутів α та β на використаний ресурс пластичності при коефіцієнті обтиснення $\delta = 1,8 \dots 2,0$. Тому, в подальшому, для отримання повної інформації про напружено-деформований стан та закони його зміни в довільній точці заготовки використано МСЕ. У якості програми-розв'язувача для МСЕ було використано програмний модуль Ls-Dyna 971, за допомогою якого виконано моделювання процесу плоскої поперечно-клинової прокатки.

Результати розрахунків напружено-деформованого стану використовували для отримання законів зміни показників напруженого стану та накопиченої деформації в довільній точці заготовки та визначення, на цій основі, використаного ресурсу пластичності. В результаті аналізу отриманих результатів встановлено, що найбільш небезпечною є точка 1 (див. рис. 4).

Рис. 4. Поперечний переріз заготовки

На рис. 5 приведені закони зміни η , μ_σ , e_u для цієї точки при куті $\beta = 9,5^\circ$ і кутах нахилу бічної грані $\alpha = 35^\circ; 40^\circ; 45^\circ$. На рис. 6 приведена поверхня граничних деформацій для сталі 18ХГТ при температурі $T=1000^\circ\text{C}$ та траєкторії навантаження точки 1, при куті $\beta = 9,5^\circ$ і кутах $\alpha = 35^\circ; 40^\circ; 45^\circ$, в координатах ступінь деформації, показники напруженого стану η і μ_σ . Для отриманих траєкторій досліджуваної точки (рис. б) виконували розрахунки використаного ресурсу пластичності ψ . Найбільше значення ψ приймає при куті $\beta = 9,5^\circ$ та $\alpha \geq 45^\circ$.

Рис. 5. Зміна показників напружено-деформованого стану в небезпечній точці при поперечно-клинової прокатці при $\beta = 9,5^\circ$ і кутах нахилу бічної грані $\alpha = 35^\circ; 40^\circ; 45^\circ$: а – η , б – μ_σ , в – e_u

Рис. 6. Поверхня граничних деформацій та траєкторії навантаження для точки 1

(кут $\beta = 9,5^\circ$ і кути нахилу бічної грані 1 – $\alpha = 35^\circ$; 2 – $\alpha = 40^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$)

Аналогічні розрахунки ψ виконані з іншими співвідношеннями кутів α і β . Із аналізу отриманих результатів випливає, що для забезпечення необхідної якості заготовки при ступені обтиснення $\delta = 1,8 \div 2,0$ значення кута α бажано вибирати з діапазону $35^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$, а значення кута β – з діапазону $8^\circ \leq \beta \leq 11^\circ$.

У п'ятому розділі розроблена система автоматизованого проектування (САПР) інструменту для ППКП, на основі якої проводиться розрахунок напружено-деформованого стану з використанням метода скінчених елементів та наступне визначення використаного ресурсу пластичності для будь-якої точки небезпечного перерізу. На рис. 7 показані результати розрахунку ступеня деформації e_u та показника напруженого стану η в перерізі, який показано на рис. 4, для трьох етапів ППКП заготовки шестерень НШ32В-3-07.

Рис. 7. Розподіл характеристик НДС по перерізу заготовки: а - ступеня деформації e_u , б - показника напруженого стану η

Отримана система дозволяє за короткий проміжок часу спроектувати необхідне оснащення без проведення натурних експериментальних досліджень, з врахуванням рекомендо-

ваних значень кута α в діапазоні $35^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$, кута β в діапазоні $8^\circ \leq \beta \leq 11^\circ$ при ступені обтиснення $\delta = 1,8 \div 2,0$.

Початковими даними для розрахунку НДС та використаного ресурсу пластичності за допомогою САПР є креслення деталі, матеріал заготовки, крива течії та поверхня граничних деформацій матеріалу заготовки, швидкість руху інструменту, температура заготовки, температура інструмента.

Аналіз отриманих результатів показав, що в області осі заготовки переважають напруження розтягу, тобто має місце несприятлива схема напружено-деформованого стану. Така схема напруженого стану створює умови, які сприяють утворенню макротріщини. Ймовірність появи тріщини зростає при використанні значень кутів α та β , що знаходяться за межами рекомендованих інтервалів.

Розподіл показника напруженого стану η по перерізу заготовки та його зміна в процесі прокатки визначає області можливого утворення макротріщини. На осі заготовки в процесі прокатки $\eta > 0$ майже на всіх стадіях прокатки. На початку стадії вдавлювання показник η різко зростає до $\eta = 0,7 \div 1,0$, потім зменшується до значення $\eta = -0,5 \div -0,7$, а на стадії розширення створеної канавки знову збільшується до $\eta = 0,1 \div 0,3$. Стадія калібрування характеризується практично постійним значенням показника $\eta \approx 0,6 \div 0,8$. Аналіз розподілу показника напруженого стану показав, що зі збільшенням відстані досліджуваної точки від осі заготовки значення η зменшується, а доля стискаючих напружень збільшується, що сприяє зменшенню ймовірності зародження мікротріщин. На величину та закон розподілу параметра Надаї-Лоде значення кутів α і β на етапах вдавлювання клину та розширенні створеної канавки суттєвого впливу не мають.

Із аналізу закономірностей зміни показників η і μ_σ випливає, що на етапі калібрування використаний ресурс пластичності також зростає, хоча і не так інтенсивно, як на етапах вдавлювання клина в заготовку та розширення канавки, що утворилась. Тому зменшення довжини калібрувальної ділянки позитивно відобразиться на якості отриманої заготовки. Установлено, що за умови зменшення довжини калібрувальної ділянки інструмента на 20% при ступені обтиснення $\delta = 1,8 \div 2,0$ використаний ресурс пластичності зменшується на $0,1 \div 0,15$.

На основі виконаних досліджень запропонована конструкція інструмента, яка забезпечує зміну сил тертя на різних ділянках площини контакту інструмента та заготовки і дозволяє отримати більш рівномірний розподіл напружень та деформацій по об'єму заготовки. Для цього на деформуючих гранях інструмента нанесені ребра технологічної насічки, кут нахилу яких до повздовжньої осі інструмента змінюється в напрямку його кінцевої частини від 90° на початку робочої частини інструмента до $25 - 45^\circ$ в кінці робочої частини інструмента.

При використанні запропонованого інструмента з'являється можливість регулювання величини радіуса r_k кола кочення шляхом зміни сил тертя, що в свою чергу дозволяє змінювати розміри зони відставання, розташованої нижче кола кочення та зони випередження. На ділянці відставання діють напруження розтягу, а на ділянці випередження – стиску. Регулювання розподілу напружень на ділянці контакту за рахунок зміни кута насічки дає можливість змінювати знак кривизни траєкторії навантаження небезпечної точки, що дозволяє зменшити величину використаного ресурсу пластичності в цій точці.

Висновки

У дисертаційній роботі отримано новий розв'язок актуальної науково-технічної задачі: удосконалення технології плоскої поперечно-клинової прокатки ступінчастих циліндри-

чних заготовок на основі теоретичного та експериментального дослідження процесу формозмінення при плоскій поперечно-клиновій прокатці та його комп'ютерного моделювання.

Основні наукові положення та практичні результати, отримані в роботі, такі:

1. Розширено та уточнено методики розрахунку напружено-деформованого стану при плоскій поперечно-клиновій прокатці для етапів вдавлювання і розширення створеної канавки. Отримані результати можуть бути використані для попереднього вибору діапазону значень геометричних параметрів інструмента.
2. Набули подальшого розвитку математичні моделі процесу плоскої поперечно-клинової прокатки. Для визначення характеристик напружено-деформованого стану металу заготовки в будь-який момент часу та побудови траєкторії навантаження в координатах $e_u - \eta - \mu_\sigma$ для довільної точки області пластичних деформацій використано метод скінчених елементів.
3. В межах відомих критеріїв деформуємості побудовано критерії, застосування яких дало можливість оцінити вплив температури на ступінь використаного ресурсу пластичності при плоскій поперечно-клиновій прокатці в інтервалі температур 900 °C - 1100 °C.
4. Запропоновано нову схему дослідного зразка заготовки, що дозволило експериментально встановити кінематичні характеристики течії металу в залежності від радіуса заготовки.
5. Побудовано ізосклери в меридіональному перерізі заготовки при температурі 950 °C, шляхом використання тарувальних графіків $\sigma_u - HV - e_u$, що дозволило побудувати ізолінії σ_u , які практично співпали з ізолініями σ_u , отриманими методом скінчених елементів. При цьому найбільше розходження отриманих значень σ_u не перевищувало 12%.
6. Розроблено методику оцінки впливу геометричних параметрів інструмента та температурного режиму процесу прокатки на величину використаного ресурсу пластичності ψ в довільній точці заготовки, що дало можливість визначити найбільш небезпечну, з точки зору руйнування, точку та значення основних параметрів, при яких буде забезпечено необхідний рівень ψ в даній точці. Показано, що на етапі вдавлювання клина в заготовку в небезпечній зоні заготовки має місце зміна схеми напруженого стану в сторону пом'якшення. При подальшому формозміненні інтенсивність накопичення пошкоджень зростає, що обумовлено зростанням жорсткості схеми напруженого стану. Встановлено, що за умови зменшенні довжини калібрувальної ділянки інструмента на 20% при ступені обтиснення $\delta = 1,8 \div 2,0$ використаний ресурс пластичності зменшується на 0,10 ÷ 0,15.
7. На основі запропонованих в роботі методів оцінки деформуємості заготовок при плоскій поперечно-клиновій прокатці розроблено програмне забезпечення для системи автоматизованого проектування інструмента. При цьому показано, що для забезпечення необхідної якості заготовки при ступені обтиснення $\delta = 1,8 \div 2,0$ кут α приймає значення $35^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$, а кут β знаходиться в діапазоні $8^\circ \leq \beta \leq 11^\circ$. В цілому, вибір температурного режиму та використання інструмента з запропонованою геометрією та технологічною насичкою дозволило зменшити використаний ресурс пластичності на величину 0,2 ÷ 0,3.
8. Отримані в роботі результати у вигляді програмних продуктів та технологічних рекомендацій з проектування інструмента для ППКП прийняті до впровадження на ОАО „ВАЗ” (м. Вінниця).
9. Результати роботи впроваджені у навчальному процесі на кафедрі „Технології та автоматизації машинобудування” ВНТУ в рамках викладання дисципліни „Проектування та виробництво заготовок деталей машин”.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Сухоруков С. І. Вплив геометрії клина на деформуємість заготовки при поперечно-клиновій прокатці / С. І. Сухоруков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №2. – С. 81-85.
2. Сухоруков С. І. Апроксимація експериментальних даних кубічними сплайн-функціями / К. І. Коцюбівська, В. І. Клочко, С. І. Сухоруков, А. В. Чубатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. - №3 (66). – С. 21-30.
3. Сухоруков С. І. Визначення напружень в заготовці при поперечно-клиновій прокатці / С. І. Сухоруков // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2008. – №1. – С. 12-15.
4. Сухоруков С. И. Оценка деформируемости пористых заготовок на неустановившейся стадии выдавливания / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, Е. И. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 188-192.
5. Сухоруков С. И. Влияние неравномерности напряженного состояния на пластичность / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, Е. И. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тем. зб. наук. праць. – Краматорськ-Слов'янськ: ДДМА, 2003. – С. 221-225.
6. Сухоруков С. И. Применение кубических сплайн-функций для аппроксимации экспериментальных данных / Е. И. Коцюбивская, И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, А. Я. Мысловский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 124-128.
7. Сухоруков С. И. Деформируемость заготовок при поперечно-клиновой прокатке/ И. О. Сивак, С. И. Сухоруков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С. 365-368.
8. Сухоруков С. И. Оценка использованного ресурса пластичности при поперечно-клиновой прокатке / С. И. Сухоруков // Обработка металлов давлением. – Краматорск, 2008. – №1. – С. 39-44.
9. Сухоруков С. І. Оцінка деформуємісті заготовок при поперечно-клиновій прокатці / С. І. Сухоруков, К. І. Коцюбівська, І. О. Сивак // Наукові нотатки. – Луцьк, 2009. – № 25. – С. 272-275.
10. Сухоруков С. И. Моделирование высадки торцевой раскаткой наружных буртов на трубных заготовках / В. А. Матвийчук, Л. И. Алиева, С. И. Сухоруков // Обработка металлов давлением. – Краматорск, 2009. – №2. – С. 46-51.
11. Пат. № 42217 Україна, МПК В21Н 1/00. Інструмент для поперечно-клинової прокатки/ Сухоруков С.І., Сивак І.О. №200900899; Заявл. 06.02.2009; Опубл. 25.06.09, Бюл. № 12. – 3 с.
12. Сухоруков С. И. Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, Е. И. Сивак // Известия ТулГУ. Серия: Механика твердого деформируемого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ, Вып. 2, 2004. – С. 114-121.
13. Сухоруков С. И. Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, Е. И. Сивак // Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением : II Международная научно-техническая конференция, 11 – 14 окт. 2004 г.: тезисы докл. – Тула: ТулГУ, 2004. – С. 97-98.
14. Sukhorukov S. I. Simulation process of friction of rough surfaces / I. O. Sivak, V. V. Savulyak, S. I. Sukhorukov, K. I. Sivak // Bulletin of the polytechnic institute of Iassy, 18 – 20.IV.2002. – Romania, – Tomul XLVII(LI), Fasc. 1-2. – 2002. – P. 191-194.
15. Сухоруков С. И. Влияние геометрии клина на пластичность металлов при поперечно-клиновой прокатке / В. А. Огородников, И. О. Сивак, С. И. Сухоруков // Приоритеты

развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров : 49-я Международная научно-техническая конференция, 23-24 марта 2005 г.: тезисы докл. – МГТУ „МАМИ”. – М. – 2005. – С. 86.

16. Сухоруков С. И. Уточнение размеров очага контакта при поперечно-клиновой прокатке / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : Международная научно-техническая конф., 11 – 14 окт. 2005 г.: материалы конф. – Санкт-Петербург. – 2005. – С. 232-235.

АНОТАЦІЯ

Сухоруков С.І. Удосконалення технології плоскої поперечно-клинової прокатки ступінчастих циліндричних заготовок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця. – 2010.

Дисертацію присвячено науковій задачі дослідження особливостей формоутворення при плоскій поперечно-клинової прокатці і розробці рекомендацій з вибору раціональних технологічних параметрів процесу.

На основі методів прикладної теорії пластичності одержали подальший розвиток математичні моделі напружено-деформованого стану процесів поперечно-клинової прокатки. Комп'ютерне моделювання за допомогою методу скінчених елементів дало можливість виконати аналіз особливостей пластичної деформації при ППКП. Установлено залежність величини використаного ресурсу пластичності від геометричних параметрів інструменту та температурного режиму процесу прокатки.

Отримано рівняння регресії, яке описує залежність величини використаного ресурсу пластичності від температури процесу плоскої поперечно-клинової прокатки та робочих кутів інструменту.

Достовірність отриманих теоретичних рішень підтверджена результатами експериментальних досліджень.

Розроблені рекомендації та методики проектування інструменту для виготовлення ступінчастих циліндричних заготовок методом плоскої поперечно-клинової прокатки.

Ключові слова: напруження, деформації, пластичність, поперечно-клинова прокатка, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів.

АННОТАЦИЯ

Сухоруков С.И. Совершенствование технологии плоской поперечно-клиновой прокатки ступенчатых цилиндрических заготовок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Винницкий национальный технический университет, Винница. –2010.

Диссертационная работа посвящена научной задаче исследования особенностей формообразования при плоской поперечно-клиновой прокатке и разработке рекомендаций по выбору рациональных технологических параметров процесса.

Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния при плоской поперечно-клиновой прокатке для этапов внедрения и расширения созданной канавки, с использованием методов линий скольжения и решения осесимметричной задачи.

Анализ напряженно-деформированного состояния металла при плоской поперечно-клиновой прокатке выполнен методами трехмерного математического моделирования с ис-

пользованием метода конечных элементов, что позволило учесть влияние температуры и геометрических параметров инструмента.

Получено уравнение регрессии, которое описывает зависимость величины использованного ресурса пластичности в опасной точке заготовки от температуры процесса плоской поперечно-клиновой прокатки и рабочих углов инструмента. Сопоставление полученных результатов с результатами конечно-элементного моделирования показало, что величина использованного ресурса пластичности полученная этими методами отличается не более чем на 10%.

В рамках известных феноменологических критериев деформируемости предложены модели накопления повреждений при высоких температурах, получены оценки влияния параметров технологического процесса на величину использованного ресурса пластичности для стали 18ХГТ в процессе плоской поперечно-клиновой прокатки в интервале температур 900 °С – 1100 °С, что позволило определить рациональные параметры технологического процесса и усовершенствовать конструкцию инструмента.

Предложенные модели позволили оценить влияние основных параметров процесса ППКП на вид траекторий нагружения произвольной точки заготовки в трехмерном пространстве безразмерных показателей напряженно-деформированного состояния ϵ_u , μ_σ , η , что дало возможность учесть влияние истории нагружения на величину использованного ресурса пластичности при объёмной схеме напряженного состояния.

На основе результатов численной реализации полученных математических моделей и соответствующих им программных средств установлено влияние углов инструмента и температурного режима на напряженно-деформированное состояние и величину использованного ресурса пластичности при плоской поперечно-клиновой прокатке. Сформулированы и решены задачи по автоматизированному проектированию инструмента и выбору рациональных технологических режимов процесса.

Установлено, что при уменьшении длины калибрующего участка инструмента на 20% при степени обжатия $\delta = 1,8 \div 2,0$ использований ресурс пластичности уменьшается на $0,10 \div 0,15$. При этом показано, что для обеспечения необходимого качества заготовки при степени обжатия $\delta = 1,8 \div 2,0$ угол α необходимо выбирать в диапазоне значений $35^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$, а угол β – в диапазоне значений $8^\circ \leq \beta \leq 11^\circ$. В целом, выбор температурного режима и использование инструмента с предложенной геометрией и технологической насечкой позволило уменьшить использований ресурс пластичности на величину $0,2 \div 0,3$.

Достоверность полученных теоретических решений подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Результаты работы в виде программных средств, а также конструкторских и технологических рекомендаций приняты к внедрению на открытом акционерном обществе “Винницкий агрегатный завод”.

Ключевые слова: напряжения, деформации, пластичность, плоская поперечно-клиновая прокатка, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

ANNOTATION

Sukhorukov S.I. Improvement of technology of the flat cross-wedge rolling of step cylinder purveyances. – Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering's sciences after speciality 05.03.05 – Processes and machines of treatment pressure. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. – 2010.

Dissertation is devoted to the scientific study of the problem of forming a flat in cross-wedge rolling and develop recommendations for the rational process parameters.

On the basis of methods of the applied theory of plasticity the mathematical models of the tensely deformed state of processes of the cross-wedge rolling got subsequent development. A computer design by the method of complete elements enabled to execute the analysis of features of flowage at cross-wedge rolling. Dependence of size of the utilized resource of plasticity is set on the geometrical parameters of instrument and temperature condition of process of rolling.

This regression equation that describes the dependence of the size of the used resource of plasticity of the process temperature flat cross-wedge rolling tool and working angles.

The reliability of the theoretical solutions obtained confirmed the results of experimental studies.

Recommendations and design techniques instrument are developed for making of step cylindrical billets by flat cross-wedge rolling.

Keywords: stress, deformations, plasticity, cross-wedge rolling, the stress-strain state, the finite element method.

Підписано до друку 11.03.10 р. Формат 29.7×42¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2010-044
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: (0432) 59-81-59