

ОЦІНКА ДЕФОРМУЄМОСТІ ЗАГОТОВОК ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВІЙ ПРОКАТЦІ

В роботі приведені результати досліджень деформуємості заготовок із сталі 18ХГТ при поперечно-клиновій прокатці. Побудовано поверхню граничних деформацій та шляхи навантаження в просторі e_p , η , μ_σ . Показано, що використаний ресурс пластичності має найбільше значення на осі заготовки.

Поперечно-клинова прокатка (ПКП) – високопродуктивна технологія обробки металів тиском. Основними перевагами цього процесу є зменшення витрат матеріалу та підвищення точності отриманих заготовок. Але даний процес має і недоліки, а саме: накопичення макротріщин під впливом циклічного навантаження і скручування заготовки за рахунок різниці швидкості інструмента та швидкості матеріалу заготовки в зоні контакту.

На даний час відомі результати досліджень процесу формозмінення при ПКП в двовимірній постановці задачі по визначенню НДС. Ці розв'язки не враховують вплив температури та зміщення металу в процесі деформації в осьовому напрямку.

Для визначення використаного ресурсу пластичності при ПКП необхідно враховувати, що при гарячому деформуванні процес "заліковування" пошкоджень більш інтенсивний ніж при холодному деформуванні. Крім того, інтенсивність заліковування залежить від температури.

В більшості випадків пластичність металів з підвищенням температури деформації зростає. Однак, в окремих випадках, в певних температурних інтервалах, із збільшенням температури пластичність зменшується. Наприклад, для сталі 30ХГСА при зростанні температури від 700 °С до 1000 °С гранична деформація зсуву зменшується в 5,21 рази [1]. Для сталі 18ХГТ в інтервалі від 650 °С до 850 °С пластичність зменшується в 1,85 рази [2].

Крім того, пластичність металу залежить від схеми напруженого стану. В даний час досліджень залежності пластичності металів від схеми напруженого стану дуже мало. В роботі [1] побудовані діаграми пластичності для сталей 20, 45, ШХ15, 30 ХГСА, Х18Н10Т для температурного інтервалу 100 °С – 500 °С. Практично для всіх сталей пластичність в даному інтервалі температур зростає. Необхідно відмітити, що збільшення пластичності різне для різних схем напруженого стану. Наприклад, для сталі 30ХГСА при підвищенні температури від 100 °С – 500 °С пластичність при плоскому розтягу ($\eta = 2$) зростає в 1,9 рази, при розтягу ($\eta = 1$) – в 1,3 рази, а при крученні ($\eta = -1$) – в 1,15 рази.

Для опису залежності пластичності сталі 18ХГТ від схеми напруженого стану при гарячій деформації в інтервалі температур 900 °С – 1100 °С нами використані експериментальні результати приведені в роботі [2]. В даній роботі приведені значення граничних деформацій при розтягу ($e_p(1)$) в інтервалі температур від 900 °С до 1300 °С та при зсуві ($e_p(0)$) від 900 °С до 1000 °С. Ці результати використані нами для побудови діаграм пластичності. При цьому використана апроксимація В.А. Огороднікова [3]

$$e_p(\eta) = e_p(0) \exp(-\lambda \eta), \quad (1)$$

де $\lambda = \ln \frac{e_p(0)}{e_p(1)}$ – коефіцієнт чутливості металу до схеми напруженого стану; $e_p(1)$ – гранична деформація при розтягу; $e_p(0)$ – гранична деформація при зсуві.

По отриманій діаграмі пластичності $e_p(\eta)$ будували поверхню граничних деформацій $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ по методиці, приведеній в роботі [4,5]. В даній роботі для апроксимації поверхні граничних деформацій запропонована залежність

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = e_p(0,0) \exp(\lambda_1 \mu_\sigma - \lambda_2 \eta), \quad (2)$$

де $e_p(0,0)$ – гранична деформація при $\eta = 0$, $\mu_\sigma = 0$, μ_σ – параметр Надаї-Лоде, η – показник жорсткості напруженого стану, λ_1 , λ_2 – коефіцієнти апроксимації.

Для визначення коефіцієнтів λ_1 і λ_2 використані експериментальні залежності λ_1 і λ_2 від λ приведені в роботі [4]. Для сталі 18ХГТ при температурі 950 °С отримали наступні значення

$$\lambda_1 = 0,44; \lambda_2 = 0,54.$$

В результаті для сталі 18ХГТ залежність граничної деформації e_p від схеми напруженого стану при температурі 950 °С задавали поверхнею граничних деформацій

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,82 \exp(0,44\mu_\sigma - 0,54\eta) \quad (3)$$

Для оцінки величини використаного ресурсу пластичності ψ сталі 18ХГТ в інтервалі температур 950 °С – 1050 °С нами запропоновано критерій деформуємості

$$\psi = \int_0^{e_u} \frac{\exp[-\beta(T - 950)]}{0,82 \exp[0,44\mu_\sigma - 0,54\eta]} de_u, \quad (4)$$

який задовільно описує процес накопичення пошкоджень при умові, що знак кривизни траєкторії навантаження в просторі e_p , η , μ_σ не міняється. Якщо знак кривизни траєкторії навантаження у вибраних координатах змінюється, то для оцінки величини використаного ресурсу пластичності необхідно використовувати критерій

$$\psi = \int_0^{e_u} n \frac{e_u^{n-1} \exp[-\beta(T - 950)]}{(0,82 \exp[0,44\mu_\sigma - 0,54\eta])^n} de_u, \quad (5)$$

де T – температура в градусах Цельсія,

$$n = 1 + a \frac{d\eta}{de_u} - b \frac{d\mu_\sigma}{de_u},$$

a , b – емпіричні коефіцієнти, які для сталі 18ХГТ при температурі 1000 °С приймали рівним: $a = 0,04$; $b = 0,028$.

В загальному випадку коефіцієнт β залежить від температури і схеми напруженого стану, тобто $\beta = \beta(\eta, \mu_\sigma, T)$. В даній роботі для вибраного інтервалу температур 950 ... 1050 °С приймали значення β сталим і рівним $\beta = 0,0025 \text{ гр}^{-1}$. В роботі [6] запропонована анізотропна модель процесу накопичення пошкоджень в металі при гарячій деформації, де також відмічається, що показник "n", подібний β , є константа, як залежить від температури і схеми напруженого стану.

Враховуючи складність розв'язку краєвої задачі теорії пластичності для процесу поперечно-клинової прокатки для розрахунку напружено-деформованого стану нами використано метод скінчених елементів.

Для розв'язку даної задачі використовували програму LS-DYNA 971, яка створена фірмою Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Дана програма дозволяє моделювати напружено-деформований стан під час пластичного формозмінення матеріалів, взаємодію контактних поверхонь інструмента та заготовки з врахуванням тертя [7].

Введення початкових даних виконується з командного файлу, тому час на підготовку та редагування даних мінімальний. Для візуалізації та наступного аналізу результатів математичного експерименту використовували постпроцесор LS-PREPOST Ver.3.0, що входить до складу пакету LS-DYNA 971 [7].

Нами було розроблено математичну модель процесу ПКП, яка дозволяє при розрахунках напружень враховувати вплив немонотонності.

Модель, яка використовувалась при моделюванні, складається з циліндричної заготовки та двох рівновіддалених від заготовки інструментів.

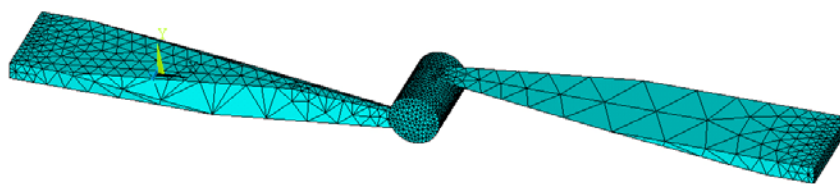


Рис. 1. Скінчено-елементна модель процесу поперечно-клинової прокатки

Для розрахунку використовували 8-вузлові скінченні елементи. При цьому, для зменшення часу розрахунку, інструмент був виконаний у вигляді абсолютно твердого тіла. На нього накладені такі граничні умови: він переміщується тільки по напрямку вісі x з постійною швидкістю; всі інші

переміщення заборонені. Контакт між заготовкою та інструментом задавався автоматично за допомогою контактної алгоритму типу “поверхня-поверхня”.

В результаті розрахунків отримали значення головних напружень та деформацій в небезпечній, з точки зору руйнування, точці на вісі заготовки. Для оцінки впливу напружено-деформованого стану на пластичність заготовки використовували інваріантні характеристики [4]:

– параметр Надаї-Лоде

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1; \quad (6)$$

– показник напруженого стану:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u} \quad (7)$$

де $I_1(T_\sigma)$ – перший інваріант тензора напружень; $I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень; $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – середнє напруження; σ_u – інтенсивність напружень.

Результати розрахунків напружено-деформованого стану використовували для побудови траєкторій навантаження для точки 1, яка знаходиться в точці перетину вісі заготовки з її вертикальною площиною симетрії, та для точок 2 і 3, які розміщені на відстані $\Delta r_2 = 8$ мм, $\Delta r_3 = 4$ мм від вісі заготовки і відстанях $\Delta x_2 = 3$ мм, $\Delta x_3 = 6$ мм від вертикальної площини симетрії (траєкторії 2 і 3 на рис. 2). На рис. 2 також приведена поверхня граничних деформацій (3) для сталі 18ХГТ при температурі $T = 950$ °С.

Використаний ресурс пластичності ψ_i в точках 1, 2 і 3 розраховували за критерієм (5).

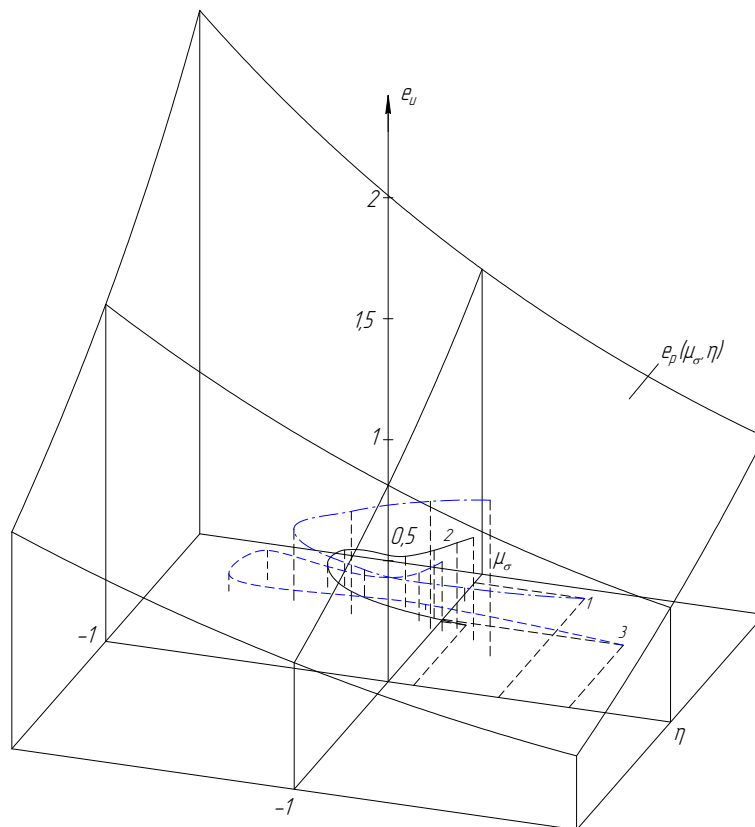


Рис. 2. Поверхня граничних деформацій

Із отриманих результатів випливає, що найбільш небезпечною в заготовці з точки зору руйнування, є точка 1, для якої при прийнятих параметрах процесу поперечно-клинової прокатки використаний ресурс пластичності дорівнює $\psi_1 = 0,76$. В точках 2 і 3 значення $\psi_2 = 0,52$, $\psi_3 = 0,41$ значно менші від ψ_1 .

Тобто, можна зробити висновок, що розміри осередку деформації, в якому густина пошкоджень найбільша, відносно невеликі. Отримані результати бажано враховувати при розрахунках на міцність деталі, яка буде виготовлена із даної заготовки.

Висновки

Виконані дослідження показують, що при поперечно-клиновій прокатці самою небезпечною, з точки зору руйнування, є точка 1, яка розташована в точці перетину вісі заготовки з її вертикальною площиною симетрії. З отриманих результатів витікає, що при впровадженні клина, на проміжку до розповсюдження деформації до вісі заготовки, схема напруженого стану в цій точці не є небезпечною. В подальшому в осьовій зоні має місце всесторонній нерівномірний розтяг, який накладається на деформацію чистого зсуву і траєкторія навантаження точки 1 зміщується в більш жорстку область, що призводить до швидкого збільшення використаного ресурсу пластичності.

1. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1970. – 229с.
2. Целиков А. И. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
4. Сивак И. О. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Зб. наук. праць – Краматорськ, 2007. – С. 73 – 76.
5. Сивак И. О. Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / И. О/ Сивак, Е. И. Сивак, С. И. Сухоруков // Известия Тульского государственного университета. Серия: Механика твердого деформируемого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ. Вып. 2, 2004. – С. 114 – 121.
6. Михалевич В.М. Модель предельных деформаций при горячем деформировании / В. М. Михалевич // Металлы. – №5. – 1991. – С. 89 – 95.
7. LS-DYNA Keyword User's Manual version 970. – Livermore Software Technology Corporation. – 2006. – 1564 p.