

621.7.043

**ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ЗАГОТОВКИ ЗАВДЯКИ МЕХАНІЗМУ
ОСАДЖУВАННЯ ЗАГОТОВКИ МІЖ ПЛОСКИМИ ШОРСТКИМИ ПЛІТКАМИ**

©Скоріш А. О., Кондратюк О. Л.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

Скоріш Антон Олегович: ORCID: 0000-0003-3022-83414; to@ipira.ua; кандидат технічних наук, доцент кафедри металургійного обладнання і транспортних систем, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Кондратюк Олег Леонідович: ORCID:0000-0002-3263-0483; lo@ipira.ua; кандидат технічних наук, доцент кафедри металургійного обладнання і транспортних систем, Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Обробка металу тиском (ОМТ) є основою багатьох прогресивних ресурсозберігаючих технологій. Для реалізації більшості технологічних процесів ОМТ необхідно реалізувати тиск інструментом або будь-якого середовища на частину заготовки або декількох певним чином розташованих заготовок.

Холодне об'ємне штампування (ХОШ) широко використовується в штампованому виробництві. Застосування ХОШ спільно з іншими штампувальними операціями дозволяє отримати закриті деталі, які не потребують або майже не потребують подальшої механічної обробки. Штамповані деталі відрізняються підвищеною точністю та чистотою поверхні, чіткими контурами, а також підвищеною міцністю та жорсткістю в результаті зміщення при холодній деформації. Осадка є однією з найбільш часто використовуваних операцій вільного кування.

Цей процес відноситься до числа недостатньо вивчених. Недолік фундаментального знання про процес може стати причиною тривалої розробки процесу, і буде ускладнювати нововведення операцій. Перебачення властивостей виробів отриманого осадку, а також проєкт і реалізація процесу проводиться в більшості випадків емпіричним способом. Аналітичні моделі доступні, але не здатні повністю охопити всі аспекти.

Ключові слова: обробка металу тиском; кінцеві заготовки; міцність; механічна обробка; метод кінцевих елементів.

Скоріш А. О., Кондратюк О. Л. «Прогнозирование устойчивости заготовки благодаря механизму осаждения заготовки между плоских переработанных плит».

Обработка металла давлением (ОМД) является основой многих прогрессивных ресурсосберегающих технологий. Для реализации большинства технологических процессов ОМД необходимо реализовать давление инструмента или какой-либо среды на часть заготовки или нескольких определенным образом расположенных заготовок.

Холодная объемная штамповка (ХОШ) широко используется в штамповочном производстве. Применение ХОШ совместно с другими штамповочными операциями позволяет получить законченные детали, не требующие или почти не требующие

дальнейшей механической обработки. Штампованные детали отличаются повышенной точностью и чистотой поверхности, четким контуром, а также повышенной прочностью и жесткостью в результате упрочнения при холодной деформации. Осадка является одной из наиболее часто используемых операций свободной ковки.

Этот процесс относится к числу недостаточно изученных. Недостаток фундаментального знания о процессе может стать причиной длительной разработки процесса, и будет затруднять нововведение операции. Прогнозирование свойств изделий полученных осадкой, а также проект и реализация процесса производится в большинстве случаев эмпирическим способом. Аналитические модели доступны, но не способны полностью охватить все явления.

Ключевые слова: обработка металла давлением, кольца заготовки, прочность, механическая обработка, метод конечных элементов.

Skorkin A., Kondratyuk O. "Forecasting the stability of the billet due to the mechanism of deposition of the billet between flat rough surfaces".

Metal pressure treatment (MPT) is the basis of many progressive resource-saving technologies. To realize the majority of MPT technological processes, it is necessary to realize the pressure of the tool or some medium on a part of the workpiece or in several specifically arranged blanks.

Cold forging (CF) is widely used in stamping production. Application of CF together with other stamping operations allows to obtain finished details that do not require or almost do not require further machining. Stamped parts are distinguished by increased accuracy and surface cleanliness, a clear contour, and also increased strength and stiffness as a result of hardening during cold deformation. Draft is one of the most commonly used free forging operations.

This process belongs to the number of insufficiently studied. Lack of fundamental knowledge about the process can cause a lengthy process development, and will make it difficult to innovate the operation. The prediction of the properties of products received by the draft, as well as the design and implementation of the process, is carried out in most cases in an empirical way. Analytical models are available, but not fully capable of covering all phenomena.

Key words: metal working with pressure, workpiece rings, strength machining, finite element method.

I. Вступ

Аналіз процесу кільцевих зразків плоско-паралельними плитами представляє великий теоретичний і практичний інтерес. Цей процес відноситься до числа недостатньо вивчених. Недолік фундаментального знання про процес може стати причиною тривалої розробки процесу, і буде ускладнювати нововведення операції. Прогнозування властивостей виробів отриманих осадкою, а також проект і реалізація процесу проводиться в більшості випадках емпіричним способом. Аналітичні моделі доступні, але не здатні повністю охопити всі явища. Чисельне моделювання - можливий ключ, щоб отримати більшу кількість знань про процес. Стійкість кільцевих заготовок не може бути точно передбачена емпіричними

моделями, тому що цей фактор, головним чином, визначено пластичним руйнуванням. З виробничої точки зору - це найбільш важливий параметр.

У даній роботі розглядається реальна картина перебігу матеріалу, з використанням методу скінченних елементів. Також найбільша увага приділяється напружено-деформованому стану заготовки.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Осадкою називається основна ковальська операція, при якій збігаються розміри поперечного перерізу заготовки за рахунок зменшення її висоти (рис. 1). При осадці заготовку встановлюють вертикально, і деформування відбувається уздовж осі заготовки.

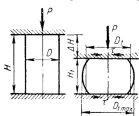


Рис. 1 – Схема осадки

Осадку застосовують в наступних випадках:

- для отримання поволок з великими поперечними розмірами з заготовок меншого поперечного перерізу (поволоки фланців, шестерень, дисків);
- як попередню операцію перед прошивкою для вирівнювання торців і збільшення діаметра при виготовленні порожнистих поволок, наприклад, поволок типу барабана, муфт;
- як попередню операцію перед протяганням для найбільшого руйнування литих дендритних структур і зменшення нерівномірності властивостей в поперечному і поздовжньому напрямках;
- разом з протяжкою для деталей типу шестерень, дисків, і в ін.;
- для підвищення механічних характеристик в тангенціальному і радіальному напрямках в поволоках типу шестерні та ін.;
- разом з протяжкою для рівномірного розподілу і здрибнення карбідів в сталях карбідного класу (швидкорізальні, високохромисті), що підвищує зносостійкість [4].

Осадку є найбільш простою і великою поширеною операцією об'ємного штампування. У поєднанні з подальшими операціями обрізки і зачистки осадку застосовується для виготовлення різних деталей з односторонніми і двосторонніми виступами (рисунком 2) [1, 5].



Рис. 2 – Деталі з односторонніми та двосторонніми виступами, виготовлені холодною об'ємною штампуванням

3. Постановка проблеми

Напружений стан металу при осадці циліндричних заготовок на плоских плитках визначається, перш за все, умовами зовнішнього тертя і фактором

форми заготовки $\frac{H}{D}$ або $\frac{D}{H}$ (відношення висоти до діаметру) і фактором тонкостінних заготовок SH (відношення товщини до висоти), які в сукупності визначають граничні умови.

При відсутності сил зовнішнього тертя або при дуже малій величині напруженого стану металу при осіданні характеризується схемою лівійного стиснення (рис. 3 а) або близькою до нього і не залежить від фактора форми заготовки.

При наявності зовнішнього тертя схема напружень в різних ділянках обсягу поковки неоднакова. При цьому вона сильно змінюється від форми заготовки (рис. 3 б, в).

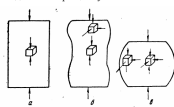


Рис. 3 – Схеми напружень при осіданні циліндричних заготовок:
а – рівномірний осад; б – нерівномірне осідання при $\frac{H_0}{D_0} = 2$; в – те ж при $\frac{H_0}{D_0} = 1$

Схема об'ємного стиснення з'являється в результаті дії сил зовнішнього тертя. Однак при осіданні високих заготовок дія сил зовнішнього тертя відносно до принципу Сен-Венана загасає в міру віддалення від контактних поверхонь. Це пояснює той факт, що при осіданні високих заготовок в середині висоти заготовки є схема лівійного напруженого стану. При осіді низьких заготовок майже весь обсяг поковки знаходиться під дією всебічного нерівномірного стиснення. При цьому, чим менше висота заготовки по відношенню до діаметру, тим рівніше виражена схема об'ємного стиснення і тим більше абсолютна величина середнього гідростатичного тиску.

Зміна граничних умов, що супроводжується зміною напруженого і деформованого стану, підтверджує доцільність розділового аналізу деформації циліндричних заготовок з рівним співвідношенням $\frac{H}{D}$ а саме:

1. Високі заготовки при $\frac{H}{D} > 1,5-2$. Відмінною особливістю процесу осідки таких циліндрів є подвійне бочко утворення при відсутності змещення.
2. Заготовки помірної висоти при $0,3-0,4 < \frac{H}{D} < 1,5-2$. Для цих заготовок характерно однарне бочко утворення. При осіді на сухих шорстких плитках майже вся контактна поверхня являє собою зону прилипання.
3. Низькі заготовки при $\frac{H}{D} < 0,3-0,4$. При осіді на сухих шорстких плитках в цьому випадку також має місце однарне бочко утворення. Однак на значній частині контактної поверхні розвивається ковзання, а у дуже тонких циліндрів ковзання практично охоплює всю контактну поверхню.

4. Метою роботи є опис механізму осаджування заготовки між плоскими шорсткими плитками, що дозволяє прогнозувати стійкість заготовки.

5. Вислад основного матеріалу

Основа ідея МКЕ (метод кінцевих елементів) ґрунтується на заміні деякої безперервної величини в межах розглянутої області дискретної моделі, яка будується на

беліні неперервних функції, визначених на кінцевому числі під областей, які називаються кінцевими елементами (КЕ). Невідома шукана величина в межах кожного КЕ апроксимується, як правило, поліноміальною функцією заданого виду з урахуванням вимоги безперервності на границях суміжних КЕ. При цьому вибір форми кінцевого елемента та виду виразу, апроксимуючого дійсний закон зміни досліджуваної величини в межах КЕ, є одним з найбільш відповідальних моментів в загальній процедурі МКЕ, від якого ктотно залежить точність наближеного рішення. Таким чином, безперервна в межах досліджуваної області невідома величина (наприклад, переміщення, швидкість переміщення, напрута, температура і т.д.) представляється через кінцеве число й дискретних значень у вузлах елементів [3].

Побудова рівнянь МКЕ для вирішення завдань механіки деформованих середовищ базується на відповідних варіаційних принципах і випливає з оптимізації деякої інтегральної величини (функціоналу), пов'язаної з роботою або потужністю напрути і зовнішнього прикладеного навантаження при дотриманні заданих граничних умов. У загальному вигляді такий функціонал з урахуванням дій масових і поверхневих сил можна представити виразом:

$$J = N_d + N_M + N_g \quad (1)$$

де N_d – робота або потужність внутрішніх сил,

N_M – робота або потужність, пов'язана з масовими силами,

N_g – робота або потужність зовнішніх сил.

Подальша процедура МКЕ передбачає подання виразу (1) у вигляді функціоналу значень невідомих тіл в вузлах КЕ і побудова роздільної системи рівнянь шляхом мінімізації J:

$$\frac{\delta J}{\delta(\text{змінні в вузлах})} = 0. \quad (2)$$

Однак, зазначений спосіб отримання довірливих рівнянь для КЕ за допомогою функціоналу (1) не є єдино можливим. В даний час рівняння для елементів отримують шляхом мінімізації функціонала, пов'язаного з даним диференціальним рівнянням відповідної задачі математичної фізики. Відома також кінцево-елементні рішення, засновані на методі Галляоріна. В останньому випадку відпадає необхідність в варіаційній формулюванні завдання.

Спосіб отримання довірливих рівнянь для КЕ, заснований на оптимізації функціоналу (1), є загальноприйнятним при теоретичному вирішенні завдань ОМТ, оскільки варіаційні принципи мають науочний фізичний зміст і досить суворе математичне обґрунтування.

По відношенню до функціоналу (1) відомі три види варіаційних принципів теорії пластичності в залежності від того, через які зміни величини виражена потужність (потенційна енергія) деформації [2].

Принцип мінімуму повної потужності (повної енергії) або принцип можливих зміни деформованого стану розглядає потужність (потенційну енергію) тіла, що деформується як функціонал довірливої системи швидкостей (переміщень), що задовольняє кінематичним граничним умовам, і який приймає мінімальне значення для системи швидкостей (переміщень) фактично реалізованої в деформованому тілі.

Принцип мінімуму додаткової роботи Кастільяно або принцип можливих змін напруженого стану розглядає додаткову роботу як функціонал довільної системи напрути, що задовольняє рівнянням рівноваги всередині тіла і на його поверхні і, який приймає мінімальні значення для системи напрути, фактично реалізованої в деформованому тілі.

У варіаційному принципі Рейсснера або принципі можливих змін напруженого і деформованого станів, потенціальність (енергія) розглядається як функціонал швидкостей і напрути, і зміни тієї й іншої групи варіюються незалежно один від одного.

Компону з перерахованих варіаційних принципів відома форма МКЕ. Принципом мінімуму повної потенціальної (повної енергії) відома: класичний метод, принцип мінімуму додаткової роботи - метод напрути, а варіаційному принципу Рейсснера - змішаний метод.

При навантаженні тіла потенціальна енергія зовнішніх сил змінюється. При цьому зовнішні сили здійснюють роботу. Потенціал зовнішніх сил W чисельно дорівнює роботі цих сил:

$$W = \int_S P \delta u dS, \quad (3)$$

де P – поперечні сили,
 u – переміщення,
 S – площа поверхні тіла.

В результаті зміни потенціальної енергії зовнішніх сил тіло деформується і накопичує потенціальну енергію деформації Q :

$$Q = \int_V \sigma \epsilon dV, \quad (4)$$

де σ – напрути,
 ϵ – деформації,
 V – об'єм тіла.

Сума енергій деформації та потенціалу зовнішніх сил дорівнює повній потенціальній енергії:

$$P = Q + W. \quad (5)$$

Найпростішим елементом, що застосовується для вирішення асиметричної задачі механіки деформованого твердого тіла, є тороїдальний елемент з трьома вузлами, розташованими в вершинах трикутного сечення:

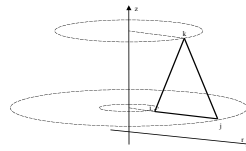


Рис. 2 – Кліцевий елемент в задаванні асиметричної деформації

Вектор переміщень вузлових точок кліцевого елемента має вигляд в разі асиметричної деформації відповідно:

$$\vec{u} = \begin{Bmatrix} \vec{u}_i \\ \vec{u}_j \\ \vec{u}_k \end{Bmatrix}$$

Довільна точка елемента отримує переміщення u_r і u_z в напрямку осей r і z . Тому матриця u має вигляд:

$$u = \begin{bmatrix} u_r \\ u_z \end{bmatrix}$$

Вузлові переміщення \bar{u} і \bar{u} пов'язані між собою матрицею апроксимуючих функцій N :
 $u = N \cdot \bar{u}$.

Найбільш поширений спосіб отримання наближених рішень на основі використання варіаційного рівняння за методом Рунда - Рунда. Він полягає в тому, що функції переміщень задаються у вигляді інтерполяційного полінома. Якщо обмежитися поліномом першого ступеня, то ці функції будуть мати вигляд:

$$u_r(r,z) = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z$$

$$u_z(r,z) = \alpha_4 + \alpha_5 r + \alpha_6 z$$

Напружений стан металу при осадці циліндричних заготовок на плоских плитках визначається, перш за все, умовами зовнішнього тертя, фактором форми заготовки HD (відношення висоти до діаметру) і фактором товщині заготовки SH (відношення товщини до висоти). При відсутності сил зовнішнього тертя або їх дуже малих значеннях величина напруженого стану металу однорідна, і після обробки форма заготовки геометрично подібна первинній формі. При наявності тертя, напрути в різних частинах заготовки неоднакові і сильно залежать від форми заготовки.

При осадці без змащення, формоміна металу стає більш складною. Вона змінюється в залежності від форми заготовки і, перш за все, в залежності від відношення SH і HD.

Осадка тонкостінних заготовок (SH < 0.5) супроводжується утворенням подвійної бочки, а при дуже тонкій стінці (SH < 0.3) з'являється подвійний вигин стінки в сторону зовнішньої поверхні (рис. 3.4).

При осадці заготовок з товстою стінкою (SH > 0.5) відбувається утворення однієї бочки, як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях заготовки (рис. 3.6).

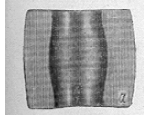


Рис. 3.4 – Формоміна тонкостінної кінцевої заготовки

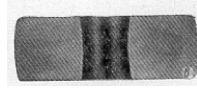


Рис. 3.6 – Формоміна товстостінної кінцевої заготовки

Для моделювання поведінки кінцевих заготовок була розроблена кінцево-елементна математична модель.

Для дослідження процесу опаді використовується модель, що представляє собою 1 чверть перетину асиметричної заготовки. При використанні МКЕ дана модель робиться на ряд пов'язаних між собою структурних елементів, що представляють, в цілому, звичайну елементну сітку.

При вирішенні завдання на систему потрібно накласти ряд обмежень (граничних умов), які адекватно відображають картину перебування матеріалу в процесі деформування (рис. 4).



Рис. 3 – Розрахункова схема процесу опаді асиметричної заготовки: 1 - плита, 2 - заготовка, u - напрямове переміщення, R - радіус заготовки

Гука. Навантаження задається переміщенням робочої поверхні півванса. Завдання вирішується в збільшених силах, переміщеннях, напруженостях, що дозволяє розглядати значні деформації за допомогою упругопластичної теорії.

Висновки

Опадіння є ефективним методом обробки металів тиском, що дозволяє значно економити матеріал. Основним дефектом опадіння кільцевих заготовок є втрата стійкості, внаслідок тонкостінних заготовок.

Аналіз показує, що окружні і осеві напруження протягом процесу можуть бути як розтягуючими, так і стискаючими. Радіальні і осьові напруження тільки стискають.

Список використаних джерел:

1. Кілява А. С. Обработка металлов давлением в промышленности / А. С. Кілява. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 266 с.
2. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 689 с.
3. Tschatsch H. Metal Forming Practice: Processes – Machines – Tools / H. Tschatsch, A. Koth. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. – 415 p., doi:10.1007/3-540-33217-0
4. Handbook of induction heating / V. I. Radnev et al. – N. Y.: Marcel Dekker, 2003. – 797 p.
5. Пластическое формование металлов / Г. Я. Гуш, П. И. Полушин, В. П. Полушин и др. – М.: Металлургия, 1968. – 416 с.

References

1. Kilyava A. 2003. *Obработка metallov davleniyem v promyshlennosti*. OGU Orenburg.
2. Kolmogorov V. 1986. *Mekhanika obrabotki metallov davleniyem*. Metallurgy, Moscow.
3. Tschatsch H & Koth, A. 2006. *Metal Forming Practice: Processes – Machines – Tools*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/3-540-33217-0
4. Radnev, V. 2003. *Handbook of induction heating*. Marcel Dekker, New York.
5. Gush, G., Polukhin, P. & Polukhin, V. 1968. *Plasticheskoye formirovaniye metallov*. Metallurgiya, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 16 травня 2017 р.