

621.7.043

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

©Скоркін А. О., Кондратюк О. Л.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Скоркін Антон Олегович: ORCID: 0000-0003-3032-83414; mot@uira.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри металоріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Кондратюк Олег Леонідович: ORCID:0000-0002-3263-0483; mot@uira.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри металоріжучого 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 інструменту 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 закінчені 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 зміцнення 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. Передбачення властивостей виробів отриманого осаду, а також проект і реалізація процесу проводиться в більшості випадків емпіричним способом. Аналітичні моделі доступні, але не здатні повністю охопити всі явища.

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

Скоркин А. О., Кондратюк О. Л. «Прогнозирование устойчивости заготовки благодаря механизму осаждения заготовки между плоских шероховатых 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 свободнойковки.

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.

1. 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 операцій. 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

Технологія машинобудування

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 збільшуються розміри поперечного перерізу заготовки за рахунок зменшення її висоти (рис. 1). При осаді заготовку встановлюють вертикально, і деформування відбувається уздовж осі заготовки.

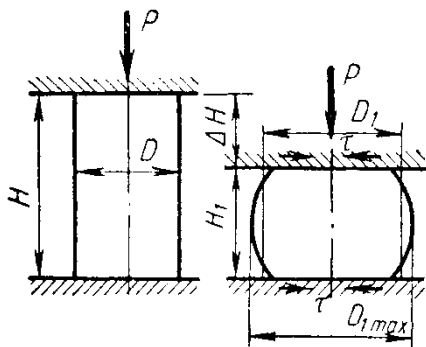


Рис. 1 –Схема осадки

Осадку застосовують в наступних випадках:

- для отримання поковок з великими поперечними розмірами з заготовок меншого поперечного перерізу (поковки фланців, шестерень, дисків);
- як попередню операцію перед прошивкою для вирівнювання торців і збільшення діаметра при виготовленні порожнистих поковок, наприклад, поковок типу барабанів, муфт;
- як попередню операція 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 ін .;
- для підвищення механічних характеристик в тангенціальному і радіальному напрямках в поковках типу шестерні та ін .;
- разом з протяжкою для рівномірного розподілу і здрібнення карбідів в сталях карбідного класу (швидкорізальні, високо хромисті), що підвищує зносостійкість [4].

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

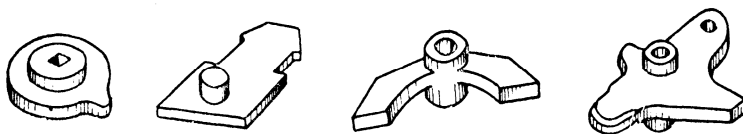


Рис. 2 – Деталі з односторонніми та двосторонніми виступами, виготовлені холодним об'ємним штампуванням

3. Постановка проблеми

Напружений стан металу при осіданні циліндричних заготовок на плоских плитах 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 заготовки S/H (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 лінійного 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).

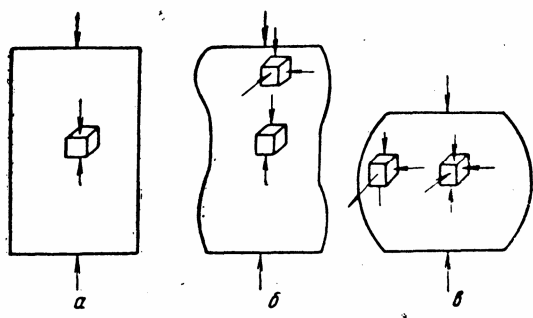


Рис. 3 – Схеми напружень при осіданні циліндричних заготовок:
а – рівномірний осад; б – нерівномірне осідання при $\frac{H_0}{D_0} = 2$; в – те ж при $\frac{H_0}{D_0} = 1$

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 різним співвідношенням $\frac{H}{D}$, а саме:

1. Високі заготовки при $\frac{H}{D} > 1,5-2$. Відмінною особливістю процесу опаді таких циліндрів є подвійне бочко утворення при відсутності змащення.

2. Заготовки помірної висоти при $0,3-0,4 < \frac{H}{D} < 1,5-2$. Для цих заготовок характерно одинарне б бочко утворення. При осаді на сухих шорстких плитах майже вся контактна поверхня являє собою зону прилипання.

3. Низькі заготовки при $\frac{H}{D} < 0,3-0,4$. При осаді на сухих шорстких плитах в цьому випадку також має місце одинарне 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 плитами, що дозволяє прогнозувати стійкість заготовки.

5. Виклад основного матеріалу

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

Технологія машинобудування

безлічі неперервних функцій, 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 істотно залежить точність наближеного рішення. Таким чином, безперервна в межах досліджуваної області невідома величина (наприклад, переміщення, швидкість переміщення, напруга, температура і т.д.) представляється через кінцеве число її дискретних значень у вузлах елементів [3].

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

$$J = N_D + N_M + N_B \quad (1)$$

де N_D – робота або потужність внутрішніх сил;

N_M – робота або потужність, що розвивається масовими силами,

N_B – робота або потужність зовнішніх сил.

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

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

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

Спосіб отримання дозвільних рівнянь для КЕ, заснований на оптимізації функціоналу (1), є загально визнаним при теоретичному вирішенні завдань ОМТ, оскільки варіаційні принципи мають наочний 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 змінні величини виражена потужність (потенційна енергія) деформації [2].

Принцип мінімуму повної потужності (повної енергії) або принцип можливих змін деформованого стану розглядає потужність (потенційну енергію) тіла, що деформується як функціонал довільної 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 напруги, що задовольняє рівнянням рівноваги всередині тіла і на його поверхні, і, який приймає мінімальне значення для системи напруги, фактично реалізованої в деформованому тілі.

У варіаційному принципі Рейсснера або принципі можливих змін напруженого і деформованого станів, потужність (енергія) розглядається як функціонал швидкостей і напруги, і змінні цієї й іншої групи варіюються незалежно один від одного.

Кожному з перерахованих варіаційних принципів відповідає певна форма МКЕ. Принципом мінімуму повної потужності (повної енергії) відповідає кінематичний метод, принципу мінімуму додаткової роботи - метод напруги, а варіаційному принципу Рейсснера - змішаний метод.

При навантаженні тіла потенційна 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 – поверхневі сили,
 u – переміщення,
 S – площа поверхні тіла.

В результаті зміни потенційної енергії зовнішніх сил тіло деформується і накопичує потенційну енергію деформації Q .

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

де σ – напруги,
 e – деформації,
 V – об'єм тіла.

Сума енергії деформації та потенціалу зовнішніх сил дорівнює повній потенційній енергії:

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

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

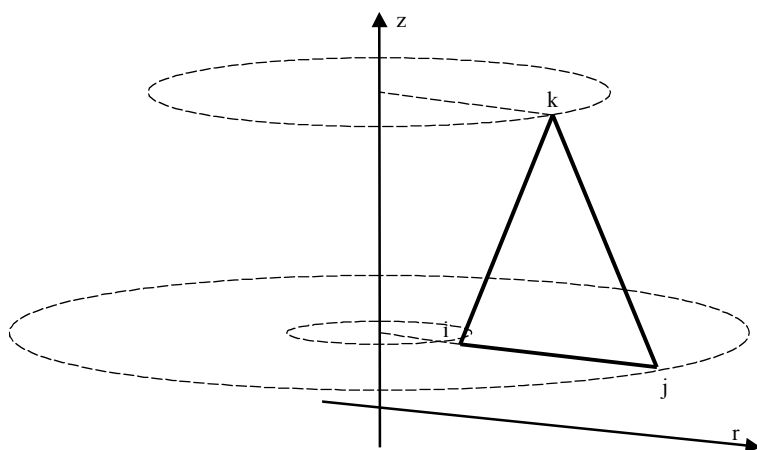


Рис. 2 – Кінцевий елемент в завданні асиметричної деформації

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

$$\tilde{u} = \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ir} \\ \tilde{u}_{iz} \\ \tilde{u}_{jr} \\ \tilde{u}_{jz} \\ \tilde{u}_{kr} \\ \tilde{u}_{kz} \end{Bmatrix}$$

Технологія машинобудування

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 \tilde{u} і u пов'язані між собою матрицею апроксимуючих функцій N :

$$u = N \cdot \tilde{u}.$$

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

$$\begin{aligned} u_r(r, z) &= \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z \\ u_z(r, z) &= \alpha_4 + \alpha_5 r + \alpha_6 z \end{aligned}$$

Напружений стан металу при осіданні циліндричних заготовок на плоских плитах визначається, перш за все, умовами зовнішнього тертя, фактором форми заготовки H/D (відношення висоти до діаметру) і фактором тонкостінної заготовки S/H (відношення товщини до висоти). При відсутності сил зовнішнього тертя або їх дуже малих значеннях величина напруженого стану металу однорідна, і після обтиску форма заготовки геометрично подібна первісній формі. При наявності тертя, напруги в різних частинах заготовки неоднакові і сильно залежать від форми заготовки.

При осаді без змащення, формозміна металу стає більш складною. Вона змінюється в залежності від форми заготовки і, перш за все в залежності від відносин S/H і H/D .

Осадка тонкостінних заготовок ($S/H < 0.5$) супроводжується утворенням подвійної бочки, а при дуже тонкій стінці ($S/H < 0.3$) з'являється поздовжній вигін стінки в сторону зовнішньої поверхні (рис. 3. а).

При осаді заготовок з товстою стінкою ($S/H > 0.5$) відбувається утворення одинарної бочки, як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях заготовки (рис. 3.б).

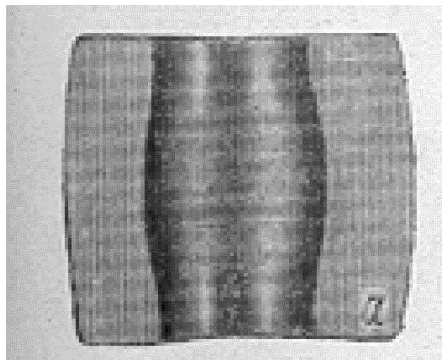


Рис. 3.а – Формозміна тонкостінної кільцевої заготовки

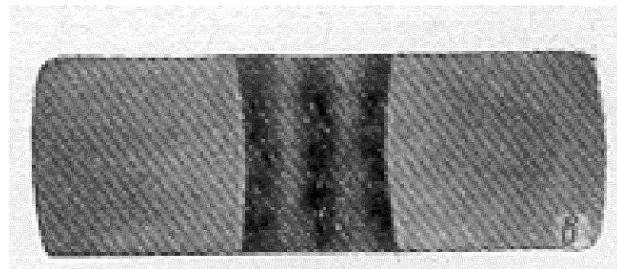


Рис. 3.б – Формозміна товстостінної кільцевої заготовки

Для моделювання поведінки кільцевих 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 розбивається 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 перебігу матеріалу в процесі деформування (рис. 4.).

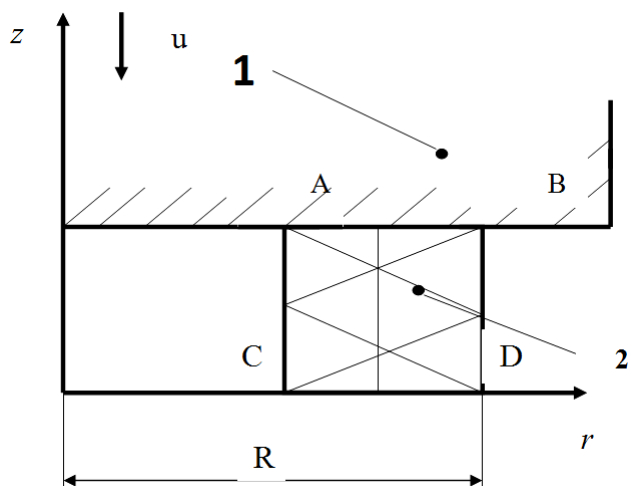


Рис. 3 – Розрахункова схема процесу опаді асиметричної заготовки: 1 - плита, 2 - заготовка, u - напрямок переміщення, R - радіус заготовки

При розрахунку були сформовані і прийняті наступні граничні умови:

1. Відрізок AB відноситься як до інструменту, так і до заготовки, перетин границі інструменту заборонено в силу його непроникності.

2. Вузли розташовані на осі CD можуть переміщатися лише уздовж неї.

3. Вузли на відрізках AC і BD можуть переміщатися, як в уздовж осі z , так і вздовж осі r .

Матеріал упругопластичний, який підпорядковується узагальненому закону Гука. Навантаження задається переміщенням робочої поверхні пуансона. Завдання вирішується в збільшеннях сил, переміщень, напруг і деформацій, що дозволяє розглядати значні деформації за допомогою упругопластичної теорії.

Висновки

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

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

Список використаних джерел:

1. Киллов А. С. Обработка металлов давлением в промышленности / А. С. Киллов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 266 с.
2. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgiya, 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. Rudnev et al. – N. Y. : Marcel Dekker. 2003. – 797 p.
5. Пластическое формоизменение металлов / Г. Я. Гун, П. И. Полухин, В. П. Полухин и др. – М. : Metallurgiya, 1968. – 416 с.

References

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

Стаття надійшла до редакції 16 травня 2017 р.