



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. М. Михалевич, В. О. Красвський**

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
МЕХАНІКИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ  
ХОЛОДНОМУ ТОРЦЕВОМУ РОЗКОЧУВАННІ  
ТА РОТАЦІЙНІЙ ВИТЯЖЦІ**

**Монографія**

УНІВЕРСУМ-Вінниця  
2008

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/445>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.77  
М 69

*Рецензенти:*

**В. А. Огородніков**, доктор технічних наук, професор

**О. І. Тришевський**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 29.11.2007 р.)

**Михалевич В. М., Краєвський В. О.**

М 69 Математичне моделювання механіки формоутворення при холодному торцевому розкочуванні та ротаційній витяжці: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 188 с.

ISBN 978-966-641-238-9

В монографії представлені матеріали досліджень та результати практичних розробок з питань розширення технологічних можливостей методів обробки металів тиском із локальним прикладенням деформуючого зусилля, таких як холодне торцеве розкочування та ротаційна витяжка. На основі математичного моделювання запропоновано розрахунковий апарат з визначення механіки формоутворення (кінематики течії металу, накопичення пошкоджень та напружено-деформованого стану заготовок), який дозволить на стадії проектування визначати параметри відповідних технологічних процесів для забезпечення необхідних умов деформування. Запропоновано методики визначення енергосилових параметрів для проектування обладнання. У роботі отримала подальший розвиток тензорна теорія накопичення пошкоджень.

**УДК 621.77**

**ISBN 978-966-641-238-9**

© В. Михалевич, В. Краєвський, 2008

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/445>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

# ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ ІЗ ЛОКАЛЬНИМ ПРИКЛАДЕННЯМ ДЕФОРМУЮЧОГО ЗУСИЛЛЯ</b> .....	8
<b>1.1. Загальна характеристика методів</b> .....	8
<b>1.2. Ротаційна витяжка циліндричних та конічних оболонок</b> .....	10
1.2.1. Визначення енергосилових параметрів обладнання ротаційної витяжки.....	13
<b>1.3. Холодне торцеве розкочування</b> .....	15
1.3.1. Обладнання для холодного торцевого розкочування ...	18
1.3.2. Залежність інтенсивності і напрямку течії матеріалу заготовки під час формоутворення холодним торцевим розкочуванням від технологічних параметрів процесу .....	20
<b>РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛІВ</b> .....	25
<b>2.1. Оцінка пластичності матеріалів під час стаціонарного деформування</b> .....	2
<b>2.2. Критерії руйнування при складному холодному деформуванні</b> .....	26
<b>2.3. Порівняльний аналіз скалярних та тензорних моделей накопичення пошкоджень на прикладі двохетапного холодного деформування</b> .....	34
<b>2.4. Розробка тензорної моделі накопичення пошкоджень із врахуванням пам'яті напрямів</b> .....	38
2.4.1. Побудова структури вихідних співвідношень стосовно двохетапного деформування .....	38
2.4.2. Здобуття критеріальних співвідношень, що впливають із тензорної моделі накопичення пошкоджень із врахуванням “пам'яті напрямів” стосовно двохетапного деформування .....	41

2.4.3. Узагальнення тензорної моделі накопичення пошкоджень із врахуванням „пам'яті напрямів” для випадку багатоетапного деформування.....	51
2.4.4. Перевірка адекватності тензорної моделі накопичення пошкоджень із врахуванням „пам'яті напрямів” експериментальним даним.....	53
<b>2. . Метод визначення параметрів тензорних моделей накопичення пошкоджень.....</b>	<b>6</b>
2.5.1. Розробка методу визначення параметрів тензорних моделей накопичення пошкоджень.....	56
2.5.2. Перевірка адекватності запропонованого методу визначення параметрів моделей накопичення пошкоджень наявним експериментальним даним немонотонного деформування .....	64
<b>РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ТОРЦЕВОГО РОЗКОЧУВАННЯ ТА РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1. Розробка математичної моделі формоутворення при холодному торцевому розкочуванні циліндричним валком.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2. Розробка математичної моделі формоутворення при холодному торцевому розкочуванні конічним валком .....</b>	<b>71</b>
<b>3.3. Визначення площі контакту інструменту із заготовкою при холодному торцевому розкочуванні конічним валком із врахуванням утворення пластичної хвилі .....</b>	<b>8</b>
<b>3.4. Згинання смуги змінного перерізу.....</b>	<b>89</b>
3.4.1. Напружено-деформований стан заготовки під час згинання широкої смуги із врахування зміцнення .....	89
3.4.2. Згинання смуги матрицею і пуансоном, які мають радіуси заокруглень, що сумірні із відстанню між ними.....	98
3.4.3. Визначення вигнутої осі смуги на початку процесу згинання.....	108
3.4.4. Визначення вигнутої осі смуги у кінці процесу згинання.....	110
3.4.5. Врахування товщини заготовки при згинанні смуги матрицею і пуансоном, які мають радіуси заокруглень, що сумірні із відстанню між ними .....	112

3.6.6. Визначення осьового та поперечного зусилля при згинанні смуги .....	121
--	-----

## **РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ТОРЦЕВОГО РОЗКОЧУВАННЯ ТА РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ..... 123**

### **4.1. Розробка та дослідження процесу ротаційної витяжки циліндричних та конусних оболонок ..... 123**

4.1.1. Рекомендації щодо вибору схеми та інструменту для ротаційної витяжки .....

123

4.2.2. Визначення енергосилових параметрів обладнання ... 124

4.2.3. Розрахунок геометричних параметрів заготовки ..... 129

4.2.5. Визначення технологічних можливостей процесу формування зовнішніх буртів..... 131

4.2.6. Розробка спеціалізованої оснастки для ротаційної витяжки та впровадження у виробництво ..... 134

### **4.3. Розробка та дослідження процесу переформування квадратних заготовок у круглі..... 144**

4.3.1. Вибір технологічної схеми процесу переформування 144

4.3.2. Дослідження напружено-деформованого стану заготовки під час процесу переформування..... 148

4.2.3. Оцінка енергосилових параметрів обладнання. .... 150

### **4.3. Розробка методики визначення граничних розмірів заготовок для комбінованого процесу переформування квадрата у круг із наступним формуванням ротаційною витяжкою ..... 1 1**

**ПІСЛЯМОВА..... 1 4**

**ЛІТЕРАТУРА..... 1**

**ДОДАТКИ.....166**

## ВСТУП

Актуальною задачею металообробної промисловості є скорочення відходів та втрат металопродукції за рахунок заміни технологічних процесів, що основані на різанні металів, економічними методами формоутворення деталей. Найбільш ефективно ця задача вирішується шляхом використання процесів холодної пластичної деформації, які дозволяють максимально наблизити форму заготовки до форми готового виробу, а в ряді випадків виключити необхідність подальшої обробки. Використовуючи метод холодного деформування замість обробки різанням, можна в 2...3 рази підвищити коефіцієнт використання металу. При цьому забезпечується висока якість поверхні заготовок, покращуються фізико-механічні характеристики матеріалу, підвищується продуктивність праці та створюються умови для повної автоматизації виробництва.

Основна складність при розробці процесів холодного об'ємного штампування полягає в тому, що в холодному стані метали чинять великий опір деформуванню і в більшості випадків мають недостатньо високу пластичність. Отже, для отримання виробів потрібне обладнання великої потужності. Крім того, через високі контактні напруження не завжди достатньою є стійкість інструмента, обмежуються технологічні можливості отримання складнопрофільних виробів. Через невисоку пластичність матеріалів, що оброблюються, існує велика небезпека їх руйнування у процесі деформування.

Значно розширити можливості холодного деформування, а, отже, збільшити його частку серед процесів обробки металів тиском, можна шляхом розробки і використання процесів деформування із локальним осередком деформування. Локалізація осередку деформації дозволяє на порядок знизити зусилля деформування та потужність обладнання, збільшує стійкість інструмента.

Саме до процесів обробки металів тиском із локальним прикладенням деформуючого зусилля відносяться холодне торцеве розкочування та ротаційна витяжка. До переваг цих процесів слід віднести екологічну чистоту, безшумність, низьку вартість та універсальність обладнання, високу якість готових виробів, можливість отримання деталей, штампування яких звичайними методами ускладнене чи неможливе. Це дозволяє віднести холодне торцеве розкочування та ротаційну витяжку до найперспективніших напрямків в обробці металів тиском.

Використання холодного торцевого розкочування та ротаційної витяжки тим не менше не усуває проблеми руйнування матеріалу, втрати стійкості заготовок. У монографії:

- визначаються технологічні можливості процесів холодного торцевого розкочування і ротаційної витяжки;

- розроблено розрахунковий апарату з визначення механіки формоутворення (кінематики течії металу, накопичення пошкоджень та напружено-деформованого стану заготовок), який дозволить на стадії проектування визначати параметри технологічного процесу для забезпечення необхідних умов деформування;

- містяться розробки високоефективних технологічних процесів отримання конкретних виробів.



# РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ ІЗ ЛОКАЛЬНИМ ПРИКЛАДЕННЯМ ДЕФОРМУЮЧОГО ЗУСИЛЛЯ

## 1.1. Загальна характеристика методів

Локальний метод обробки металів тиском – це процес, у якому заготовка, чи її частина, деформується шляхом послідовного переміщення малого осередку деформації вздовж неї. Локалізація може бути виражена ще більше за рахунок нагріву вузького осередку деформації і миттєвого охолодження деформованих ділянок.

Особливості локальних методів:

- наявність позаконтактних зон наближає схему навантаження в локалізованому пластичному осередку до всебічного стиску, що забезпечує стійкість технологічного процесу;
- з тієї ж причини створюються умови для підвищення допустимого ступеня деформації, що сприяє розширенню технологічних можливостей процесу;
- локалізація осередку знижує необхідне осьове зусилля та дозволяє реалізувати процес на менш металомісткому обладнанні;
- тенденція до рівномірного інтегрального розподілення деформації, що сприяє зниженню залишкових напружень чи їх вирівнюванню;
- своєрідна течія металу, що призводить до появи у центральній зоні напружень розтягу;
- зменшення об'єму та висоти гальмуючих зон пластичної течії, і, як наслідок, можливість отримання деталей із тонким полотном;
- суттєва позаконтактна деформація, що призводить до значного зменшення роботи поверхневих сил тертя;
- зниження максимальних контактних напружень у порівнянні із традиційними процесами формоутворення, що є результатом особливих контактних умов.

Ці особливості локальних методів обробки металів тиском відкрили великі технологічні можливості використання їх у машинобудуванні.

Процеси штампування із локальним прикладенням деформуючого зусилля досить різноманітні за технологією, інструментом та обладнанням (рис. 1.1). Їх конкретний вибір залежить від постановки

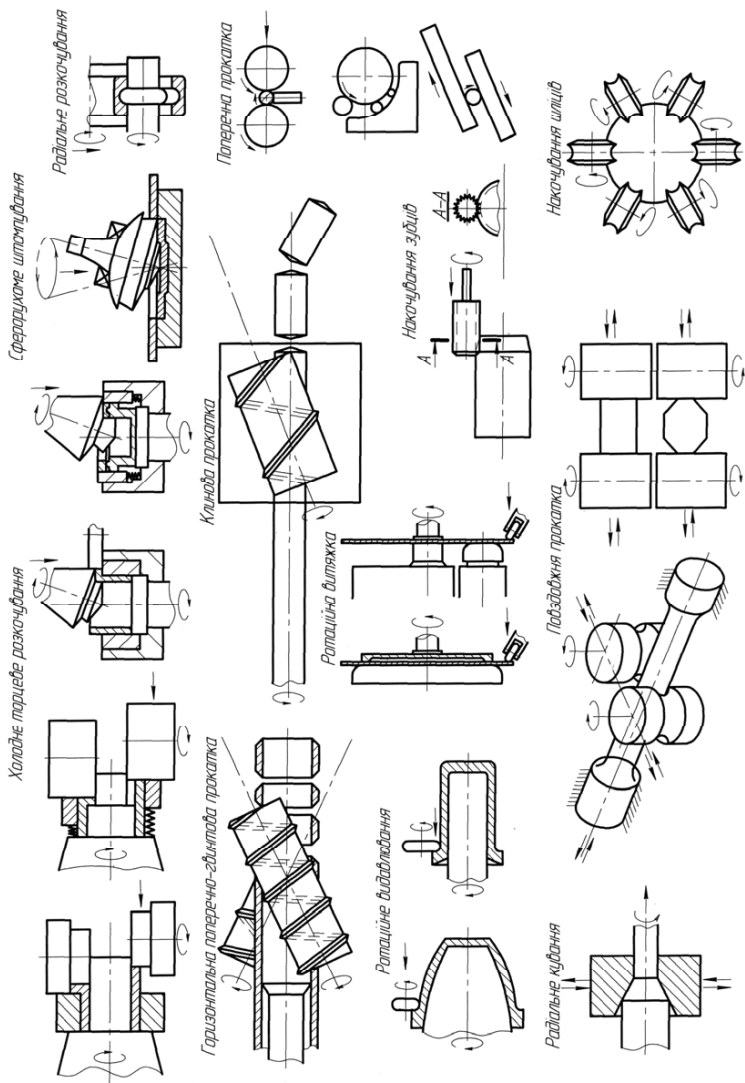


Рис. 1.1. Основні схеми процесів обробки заготовок із локальним осередком деформування

задачі (форма і розміри деталі, матеріал, вимоги до якості, об'єм продукції тощо). До найбільш перспективних процесів холодної деформації із локальним прикладенням деформуючого зусилля відносяться ротаційна витяжка та холодне торцеве розкочування.

## 1.2. Ротаційна витяжка циліндричних та конічних оболонок

Процес виготовлення виробів на обкочувальних машинах без стоншення стінки називають по-різному. У вітчизняній літературі його називають давильною обробкою [33, 34, 31, 125], обкочуванням [67], давильно-обкочувальним процесом [139], ротаційним видавлюванням, ротаційною витяжкою [103, 104, 105, 106] і т. д. Але ГОСТом від 1973 р. замість термінів «обкочування», «давильна обробка», «давильно-обкочувальний процес», «ротаційна витяжка» введений один термін «ротаційна витяжка», який і зустрічається в літературі, що випускається після 1973 р. У США цей процес називається спінінгуванням, гідроспінінгом, силовим спінінгуванням, силовим формоутворенням роликками, формоутворенням при обертанні, ротаційною роздачею [67]. У ФРН прийнятий термін видавлювання [32]. В монографії надалі буде використовуватись для позначення процесу термін ротаційна витяжка.

Основні переваги ротаційної витяжки у порівнянні із виготовленням аналогічних виробів на пресах:

- значно менша вартість устаткування завдяки меншим масам і розмірам;
- простота і мала металомісткість оснащення, тому що площа робочих поверхонь інструменту значно менша від площі днища; оснащення простіше у виготовленні і може бути використане для одержання виробів різної товщини, різних діаметрів, а також близьких до розмірів нестандартних виробів;
- майже в 5 – 6 разів менша тривалість переналадження інструменту;
- високі якість і точність одержуваних виробів;
- універсальність обладнання: на тому самому устаткуванні можна виготовляти вироби різних типів при значній зміні їхніх діаметрів і товщин.

Розвитку теорії та технології ротаційної витяжки сприяли праці В. Ф. Баркає, М. А. Гредитора, В. Г. Капоровича, Ю. І. Козлова, В. Г. Кононенка, Н. І. Могильного, Б. В. Розанова, І. П. Ренне, Г. А. Смірнова-Аляєва, А. Г. Трояна, Л. Г. Юдіна, С. П. Яковлева [11, 10, 33, 34, 31, 56, 57, 67, 68, 73, 104, 105, 106, 124, 126, 148, 125, 139]

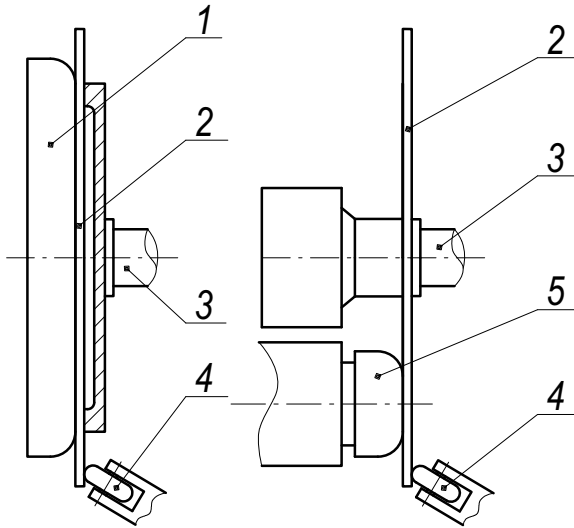


Рис. 1.2. Ротаційна витяжка вісесиметричних деталей  
 1 – оправка; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – розкочувальний ролик;  
 5 – підтримуючий ролик

та ін., а також закордонних дослідників С. Кобояші, С. Колпакціоглу, Ч. Уїка Е. Томсена, П. Шродера [63, 72, 140] та ін.

Значний вклад в теорію та практику формоутворення оболонкових деталей локальним прикладенням деформуючого зусилля внесли Харківський авіаційний інститут, ВНДІ МетМаш, Краматорський індустріальний інститут, Омський, Тульський та Тбіліський політехнічні інститути, Східноукраїнський державний університет.

Вперше в Україні дослідження можливостей та закономірностей ротаційної витяжки були розпочаті В. Г. Кононенком ще на початку 50-х років [73]. В. Г. Кононенко запропонував гіпотезу механізму деформування заготовки, що обертається, яка є першим наближенням до розгляду зв'язку деформації та напружень. Суть гіпотези полягає в тому, що матеріал під давильником вминається і поводить себе як мембрана, що прогинається під його тиском. Дослідження В. Г. Кононенка показали, що головними факторами, що визначають співвідношення деформацій у лунці є: форма та розмір інструменту, співвідношення радіусів кривизни деталі та інструменту у місці контакту, величина зусилля давильника. Гіпотеза лунок, що сформульована у вигляді відповідних рівнянь, пояснює ряд явищ формоутворення оболонок ротаційною витяжкою.

Дослідження В. Ф. Баркає у Тбіліському політехнічному інституті були направлені на вивчення стійкості фланця заготовки при ротаційній витяжці з допомогою створеного ним терезоподібного пристосування для вимірювання зусилля згинання пластинки в статичному та динамічному станах [11, 10]. У якості критерію оцінки втрати стійкості в статичному стані при обертанні був прийнятий провал пластичності під навантаженням. Значна частина досліджень В. Ф. Баркає стосувалась процесів ротаційної витяжки конічних оболонок проєціюванням, для яких розроблені методики визначення напружено-деформованого стану, енергосилових параметрів обладнання.

Розвитку процесів формоутворення порожнинних деталей прикладенням локального деформуючого навантаження сприяли праці В. Г. Капоровича [56, 57] (Краматорський індустріальний інститут), який досліджував закономірності формоутворення оболонок з трубчастої заготовки, вивчаючи кінематику та динаміку обтиску кінців труб, стійкість заготовки, енергосилові параметри процесу, обладнання та інструменту. Роботи В. Г. Капоровича носять характер комплексних досліджень, направлених на розв'язання проблем теорії, технології, обладнання та оснастки.

У працях М. А. Гредитора, Б. В. Розанова, А. Г. Трояна [33, 34, 31, 125, 139] вироблені певні рекомендації з вибору режимів ротаційної витяжки в залежності від форми деталі, властивостей оброблювального металу, геометрії інструменту та інших факторів. Ці роботи представляють великий практичний інтерес для узагальнення досвіду та визначення на цій основі шляхів удосконалення процесів ротаційної витяжки.

Н. І. Могильний [104, 105, 106] та його учні в Східноукраїнському державному університеті своїми дослідженнями внесли суттєвий вклад у розробку теорії ротаційної витяжки та методів проектування технології, обладнання, пристосувань та інструменту, а також вивчення кінематики, динаміки та енергосилових параметрів різноманітних схем ротаційної витяжки без примусового стоншення стінок деталей. Співробітниками створеної на базі Східноукраїнського державного університету лабораторії розроблені спеціальні схеми ротаційної витяжки та траєкторії руху давильного інструменту, пристосування для механізації та автоматизації ротаційної витяжки. Розроблені наукові основи проектування технології ротаційної витяжки та засобів для її здійснення, які ґрунтуються на вивченні контактних умов взаємодії давильного ролика із заготовкою в осередку деформації, механіки формоутворення, стійкості заготовки в процесі ротаційної витяжки, властивостей матеріалу, що оброблюється, геометрії інструменту та розмірів осередку деформації.

Теоретичні основи процесу ротаційної витяжки розроблені на базі вивчення типових технологічних відмов: втрати стійкості заготовки при формоутворенні оболонки локальним навантаженням, що рухається за заданою програмою, гофроутворення під дією напружень стиску, надмірні стоншення та розриви заготовок внаслідок великих напружень та недостатньої пластичності матеріалів.

Розв'язано багато задач визначення залежності граничної стійкості заготовки від форми та розмірів осередку деформації, траєкторії руху інструменту, кривизни твірної оболонки, форми та якості заготовки, величини напружень розтягу та стиску.

В області ротаційної витяжки із навмисним стоншенням стінок великий інтерес представляють роботи Л. Г. Юдіна, С. П. Яковлева, І. П. Ренне [148, 124] та інших. Поміж закордонних дослідників слід відмітити роботи С. Кобояши, Ч. Уїка, С. Колпакчіоглу [140, 63, 72], які досліджували закономірності формоутворення конусів із навмисним стоншенням стінки.

В роботах багатьох авторів відзначається недостатнє вивчення можливостей формоутворення оболонкових деталей методами ротаційної витяжки. Проблеми удосконалення процесів ротаційної витяжки та підвищення їх ефективності приваблюють увагу багатьох вчених, інженерів та винахідників, про що свідчить значна кількість патентів та авторських свідоцтв, які отримані за останні роки.

Інформація про ефективність та можливості ротаційної витяжки розсіяна по різних працях, журналах, дисертаціях, спеціальних збірниках та з великими труднощами доходить до тих, хто приймає рішення про використання нових технологій, що також є одним із суттєвих гальм у розвитку та використанні прогресивних технологій.

### **1.2.1. Визначення енергосилових параметрів обладнання ротаційної витяжки**

Визначення зусилля деформування при виготовленні циліндричних та конічних оболонок на давильно-розкочувальних машинах в холодному стані потрібно проводити при розробці технології ротаційної витяжки, при проектуванні нового обладнання та в інших випадках.

Розгляд реальних умов навантаження при ротаційній витяжці приводить до висновку, що напружено-деформований стан заготовки є досить складним. Проведення аналізу із врахуванням усіх діючих у реальному осередку деформації напружень і відповідних їм деформацій викликає великі труднощі і не дає можливості отримати розв'язок у замкненому вигляді [67].

Зусилля, що викликає деформацію та формоутворення заготовки, змінюється за величиною та напрямом із постійною зміною точки прикладання. Гвинтоподібні рухи натискного ролика і прогин заготовки у напрямі руху ролика викликають появу на межі осередку деформації згинальних моментів та перерізувальних сил. Навантаження тут місцеве і несиметричне відносно опори.

У роботі [137] процес ротаційної витяжки представлено як процес поширення місцевого згину заготовки на всю поверхню оболонки, крім центрального круга, що знаходиться під верхнім штампом. Місцевий згин заготовки здійснюється боковим зусиллям, що передається через боковий ролик. Криву контуру ділянки, що деформується, виражено многочленом

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3. \quad (1.1)$$

Крім того, приймається умова симетричності контуру. Згідно з цим припущенням, на основі розв'язку рівнянь рівноваги ділянки, що деформується, сумісно із рівнянням пластичності отримано формулу для обчислення зусилля, що діє на натискний ролик

$$Q = \frac{\sigma_s}{2} \cdot \left( \frac{4\bar{Y}^2 - \bar{X}^2}{\bar{X}\bar{Y}} s^2 - \frac{16s^3\bar{Y}^2 - s\bar{X}^4}{2\bar{X}^2\bar{Y}} \right); \quad (1.2)$$

$$\bar{X} = \frac{2\pi R_g}{3}; \bar{Y} = 2R_g, \quad (1.3)$$

де  $R_g$  – радіус бокового ролика;  $s$  – товщина заготовки;  $\sigma_s$  – межа текучості.

Експериментально встановлено, що на зусилля видавлювання впливають головним чином механічні властивості матеріалу  $\sigma_s$ , товщина  $s$ , ширина фланця  $B$ , подача  $h$ , радіус ролика  $R_g$  [73]. Крім того зусилля залежить від діаметра заготовки  $D$ , від радіусів заокруглень оправки та валка. Згідно з формулою (1.2) зусилля деформування залежить лише від механічних властивостей матеріалу, товщини заготовки та радіуса ролика. Тобто вираз (1.2) не враховує значної кількості технологічних параметрів процесу ротаційної витяжки.

Для визначення зусилля при ротаційній витяжці у роботі [68] використано розв'язок невісесиметричної задачі для прогину круглої пластини, що закріплена по внутрішньому контуру. Але, зважаючи на допущення, на базі яких отримано вираз для знаходження зусилля формоутворення при ротаційній витяжці, можна зробити висновок, що

цей вираз придатний для розрахунку зусиль при малих подачах для обмеженого діапазону місць прикладення сили. Фактично зусилля визначається на початку процесу формоутворення і, якщо оправка і валок мають значні радіуси заокруглення, то такий метод дає суттєво занижене значення зусилля [73].

Зважаючи на складність визначення зусилля деформування розрахунковими методами у роботі [105] була зроблена спроба знайти емпіричні залежності для визначення зусилля ротаційної витяжки від технологічних параметрів процесу. Повне зусилля формоутворення розбивали на три взаємно перпендикулярні складові: осьову  $P_x$ , нормальну  $P_y$  та колову  $P_z$ . Складові повного зусилля вимірювали за допомогою розробленого трикомпонентного силувимірювального пристрою. На базі обробки експериментальних досліджень було запропоновано емпіричні формули для інженерного розрахунку максимального зусилля деформування

$$\begin{aligned} P_y &= 0,612\sigma_s B^{0,75} h^{0,18}; \\ P_x &= 0,495\sigma_s B^{0,75} h^{0,18}; \\ P_z &= 0,115\sigma_s B^{0,75} h^{0,18}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Співвідношення (1.4) дають досить значні розбіжності із експериментальними даними, коли оправка і валок мають значні радіуси заокруглення порівняно із товщиною заготовки.

### 1.3. Холодне торцеве розкочування

Холодне торцеве розкочування відноситься до нових технологічних засобів обробки металів тиском, причому, під засобами маються на увазі як пристрої та машини для здійснення своєрідної схеми навантаження об'єкта, що оброблюється, так і прийоми, способи дії, які направлені на досягнення тих позитивних ефектів, які забезпечують конкурентноздатність методу по відношенню до традиційних технологічних процесів.

Сучасний стан розвитку холодного торцевого розкочування є результатом вкладу А. П. Агєєва, Р. А. Бабушкіна, К. Н. Богоявленського, Л. В. Виноградова, Н. М. Йолкіна, В. Д. Ковальова, Н. А. Корякіна, Л. Т. Кривди, В. В. Лапіна, В. А. Матвійчука, В. В. Наговіцина, В. А. Огороднікова, А. С. Пшенішнюка, М. Т. Селіна та інших дослідників Санкт-Петербурзької, Іжевської та Київської шкіл [7, 8, 15, 16,



17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 44, 81, 89, 90, 91, 111, 122], З. Марциняка (Польща), Р. М. Standing, А. Appleton, R. A. Slater, W. Jonson, J. B. Hawkyard (Англія), К. Kuba, Y. Hirai, M. Kobayashi, T. Nakane (Японія) та ін.

Перша розробка процесу штампування обкочуванням була проведена у 1907 р. Слайком (Slick) в патенті про конструкцію машини для штампування обкочуванням від імені фірми **Bethlehem Steel Corporation** [1, 5]. У 1928 р. запропонована ідея пресу для торцевого розкочування, а у 1929 р. англієць Massey запатентував розробку пресу для сферорухомого штампування [2]. Вказані патенти не знайшли свого практичного втілення аж до кінця 60-х років, що було пов'язано із рядом проблем, зокрема, із динамічною незрівноваженістю машини. Значний розвиток та промислове освоєння штампування обкочуванням почались лише у кінці 60-х років за рахунок розвитку та покращення конструкції різних типів підшипників [4].

Процес холодного торцевого розкочування дозволяє отримати холодним деформуванням вісесиметричні, суцільні і порожнинні складнопрофільні вироби з тонкостінними елементами значних розмірів. Формозміна заготовок може реалізовуватись за такими схемами: осаджування, висадка зовнішніх і внутрішніх буртів на трубчастих заготовках; пряме і зворотне видавлювання; роздавання, відбуртовка, ротаційна витяжка, чеканка тощо.

При торцевому розкочуванні в якості основного деформуючого інструменту використовують валки циліндричної чи конічної форми. Циліндричний деформуючий валок (рис. 1.3) формує внутрішні та профільні зовнішні бурти за схемою висадки [18]. Діаметр циліндричного валка не залежить від розмірів деталі, а визначається конструктивними особливостями обладнання.

Значно більші технологічні можливості забезпечує деформуючий інструмент у вигляді конічного валка, що розташований під кутом до осі обертання деталі (див. рис. 1.3). Конічний валок дає можливість формування деталі за схемами висадки, прямого та оберненого видавлювання, роздачі, осаджування, карбування [18]. При деформації конічним валком у ряді випадків можна відмовитись від використання оправки, що спрощує конструкцію оснастки. Недоліками конічного інструменту є складність форми валка та залежність розміру інструменту від розміру деталі.

Холодному торцевому розкочуванню властиві всі основні переваги методів локальної обробки металів тиском, що впливають із обмеженості приконттактного шару та впливу зовнішніх зон, пластично недеформованих чи таких, що частково піддаються деформації під ді-

єю матеріалу, що витікає з приконтрної області, чи під дією інших зовнішніх сил.

Із впровадженням розкочування на машинобудівних підприємствах коефіцієнт використання металу збільшується до **0,8**; на **30–35%** знижується трудомісткість обробки та на **6–12%** зменшується потреба у виробничих площах (кожний станок дозволяє вивільнити два-три токарних), що забезпечує досягнення значного економічного ефекту у порівнянні із діючими технологічними процесами [37].

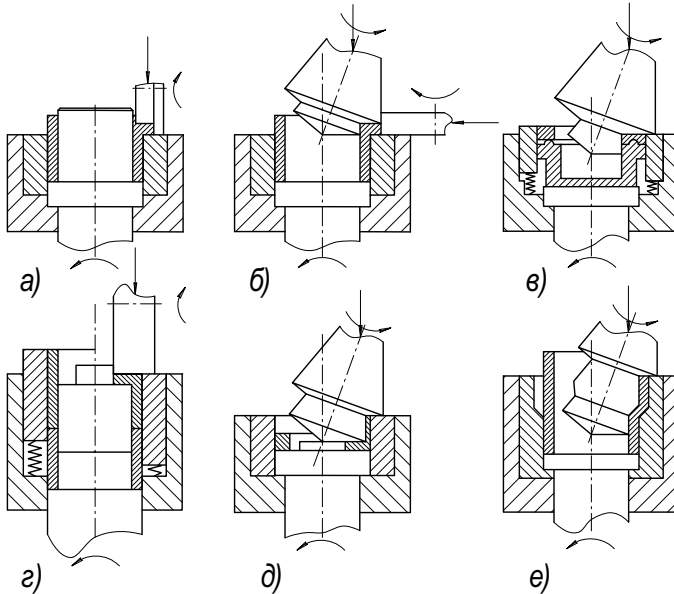


Рис. 1.3. Схеми холодного торцевого розкочування:  
а, б – висадка зовнішнього бурта; в – чеканка; г – висадка зовнішнього бурта; д – обернене видавлювання; е – роздача

Можливість використання обладнання відносно невеликої потужності (розрахункове зниження зусилля зменшується у **14,3...21,4** рази у порівнянні із традиційними методами штампування) при виготовленні великогабаритних деталей, а також низька вартість оснащення (металомісткість машин у **10...15** раз нижча) та незначний час підготовки виробництва та переналагодження обладнання дозволяють ефективно використовувати процеси торцевого розкочування у дрібносерійному виробництві. У середньому затрати на розробку та створення преса для штампування обкочуванням складає **25 %** від вартості звичайного преса аналогічних технологічних можливостей

[122]. Безшумність процесу сприяє покращенню умов праці та підвищенню культури виробництва.

Використання процесів холодного торцевого розкочування сприяє більш повній автоматизації виробництва, а також супроводжується покращенням фізико-механічних властивостей матеріалу, при цьому забезпечується оптимальне розташування волокон металу, що призводить до підвищення експлуатаційних властивостей готових виробів.

Вказані переваги холодного торцевого розкочування дозволили успішно впровадити цей процес не лише в масове виробництво (підшипникова та автотракторна промисловості) [15, 17, 18, 26, 55], але також і на підприємствах з малосерійним та індивідуальним характером виробництва (електронне приладобудування, хімічне машинобудування та ін.) [34, 89].

### **1.3.1. Обладнання для холодного торцевого розкочування**

Для реалізації холодного торцевого розкочування на практиці застосовуються такі типи обладнання:

- а) модернізовані різьбонакочувальні верстати;
- б) розкочувальні верстати на базі гідравлічних пресів;
- в) спеціалізовані прецизійні напівавтомати.

**1.3.1.1. Модернізовані різьбонакочувальні верстати.** На базі різьбонакочувальних верстатів ГД-8 і UPW-25x100 створено три типи розкочувальних верстатів: МРБ-35; UPW-25М; МРК-30. Модернізація полягає у заміні нерухомої головки різьбонакочувального верстата на торцеву головку, що містить шпindel, на планшайбі якого встановлюється матричний блок (таблиця 1.1.).

В розкочувальних верстатах МРБ-35 і UPW-25М використовується привід обертання шпінделя рухомої головки. Шпindel торцевої головки обертається за рахунок сил тертя, що виникають на контактній заготовці з валком і матрицею. Розкочувальним інструментом є циліндричний валок, що встановлюється на шпінделі рухомої головки.

Верстат МРК-30 оснащено вузлом з конічним розкочувальним валком. Вузол кріпиться до опорних поверхонь рухомої головки і включає корпус зі шпінделем, що може вільно обертатись і сприймати значне осьове і радіальне навантаження. Кут нахилу осі шпінделя, в якому закріплюється конічний валок, складає  $10^\circ$ .

**1.3.1.2. Розкочувальні верстати на базі гідравлічних пресів.** В умовах дрібносерійного виробництва розкочувальний верстат можна створити на базі гідравлічного преса, який має достатню для встанов-

Таблиця 1.1

Технічні характеристики розкочувального обладнання  
на базі різьбонакочувальних верстатів

Параметри	Розмірність	Модель		
		UPW-25M	МРБ-35	МРК-30
Зусилля розкочування	кН	250	350	350
Швидкість обертання шпинделя	об/хв	50...100	40...90	60
Кут між віссю валка та віссю деталі	град	90	90	10
Продуктивність	шт/г	30...100	30...100	30...100
Габаритні розміри				
довжина	мм	2300	2300	2300
ширина	мм	1240	1360	1300
висота	мм	1240	1400	1400
Маса	кг	3600	4200	4200
Потужність приводу обертання	кВт	5,0	7,5	7,5

лення пристрою робочу зону. Модернізація преса полягає в тому, що до верхньої плити прикріплюють розкочувальну головку з валком. В отворі нижньої плити преса розміщується змонтований в окремому корпусі шпиндель приводу обертання матричного блока. Розкочувальні головки виконують в двох варіантах: з непривідним циліндричним або непривідним конічним валком. Застосування тієї чи іншої головки зумовлено конфігурацією деталі і схемою розкочування. Непривідний розкочувальний валок обертається за рахунок контакту з заготовкою, яка обертається завдяки приводу матричного блока. Кут між віссю шпинделя торцевої головки і віссю розкочувального валка становить: для конічного валка –  $10^\circ$ , для циліндричного валка –  $90^\circ$ .

Матричний блок закріплюється на планшайбі шпинделя торцевої головки. Привід обертання здійснюється від електродвигуна через редуктор. Дані верстати забезпечують великі зусилля розкочування. Зокрема верстат ДБ-2436 зусиллям 800 кН дозволяє розкочувати габаритні деталі діаметром до 250–300 мм.

1.3.1.3. Спеціалізовані прецизійні розкочувальні напівавтомати. Азовським заводом ковальсько-пресових автоматів освоєно випуск напівавтоматів КО9013, СО424, САО428 зусиллям відповідно 125, 250 та 630 кН [15]. Ці верстати включають такі вузли: станина, корпус, редуктор, шпиндель, головка розкочувальна, гідроциліндр, суппорт, виштовхувач, електрообладнання. В якості розкочувального інстру-

мента застосовується конічний валок. Технічні характеристики розкочувальних верстатів представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Технологічні характеристики напівавтоматів для холодного торцевого розкочування

Параметри	Розмірність	Модель		
		КО9013	СО424	САО424
Зусилля деформації	кН	125	250	630
Швидкість обертання матриці	об/хв	125	200	200
Потужність привода обертання	кВт	6	18,5	30
Продуктивність	шт/г	240	150	100
Діаметр вихідної заготовки	мм	60	125	250
Ширина бурта готової деталі	мм	15	25	40
Висота бурта готової деталі	мм	10	15	25
Габаритні розміри верстата				
довжина	мм	2000	3500	4600
ширина	мм	2000	1240	2000
висота	мм	1200	1240	1500
Маса верстата	кг	3000	3600	15000

### 1.3.2. Залежність інтенсивності і напрямку течії матеріалу заготовки під час формоутворення холодним торцевим розкочуванням від технологічних параметрів процесу

При переформуванні квадратних заготовок у круглі методом штампування обкочуванням при нульовому зміщенні валка було помічено, що в центрі заготовки метал інтенсивно переміщувався на периферію, внаслідок чого відбувалось значне стоншення заготовки в центрі, аж до руйнування і появи отвору [20]. Це обмежувало можливість процесу, оскільки не дозволяло отримати суцільні круглі заготовки необхідної якості.

Аналогічний результат отримано у роботі [149]. Появу стоншення в центрі тонкої заготовки із великим відношенням діаметра до висоти автори роботи пояснювали дією підпираючих напружень. „Осередок деформації розташований поза контактної зони (“шарнір пластичності”), а у напрямі по висоті діють напруження стиску, так що там можливе виникнення центрального стоншення, а також руйнування заготовки.”

У роботі [55] автори намагаються пояснити течію матеріалу на периферію під час торцевого холодного розкочування кільцевих заготовок на основі закону найменшого опору. Осередок деформації, що

*Наукове видання*

**Михалевич Володимир Маркусович  
Красвський Володимир Олександрович**

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІКИ  
ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ХОЛОДНОМУ ТОРЦЕВОМУ  
РОЗКОЧУВАННІ ТА РОТАЦІЙНІЙ ВИТЯЖЦІ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Красвським

ВИДАВНИЦТВО ВНТУ «УНІВЕРСУМ-ВІННИЦЯ»

Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 13.02.2008 р.  
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний Ум. др. арк. 10,86  
Наклад 100 прим. Зам № 2008-017

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-81-59

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/445>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>