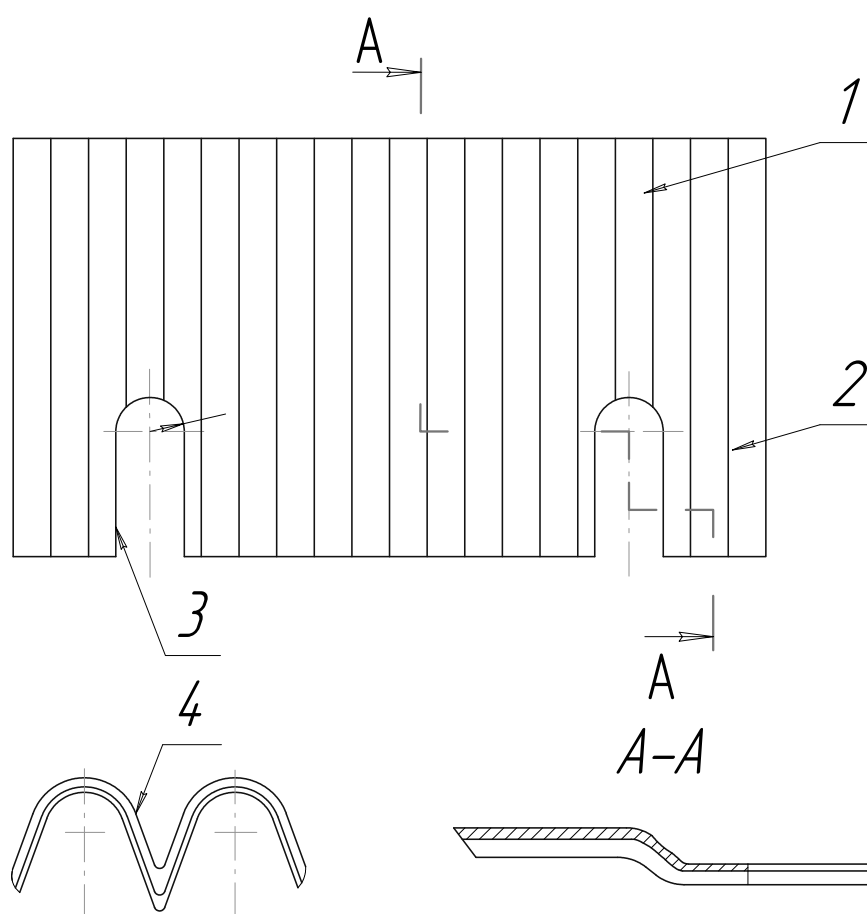


В. В. Савуляк, І. О. Сивак, В. І. Савуляк

# ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ЛОКАЛІЗАЦІЙ ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. В. Савуляк, І. О. Сивак, В. І. Савуляк**

**ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ  
ТОНКОЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ  
В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ЛОКАЛІЗАЦІЙ  
ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ**

**Монографія**

УНІВЕРСУМ-Вінниця

2008

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/447>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

УДК 621.983  
С 13

*Рецензенти:*

**В. М. Михалевич**, доктор технічних наук, професор  
**В. В. Нахайчук**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 20.12.2007 р.)

**Савуляк В. В., Сивак І. О., Савуляк В. І.**

С 13 Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах значних локалізацій деформацій та напружень. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 150 с.

ISBN 978-966-641-239-6

В монографії викладено основні підходи теоретичного та практичного розв'язання проблеми розробки та реалізації технологічних процесів виготовлення із важкодеформівних тонколистових сталей гофрованих заготовок, конструкція яких вимагає значної локалізації деформації.

Монографія призначена для широкого кола інженерно-технічних працівників, науковців та студентів.

**УДК 621.983**

**ISBN 978-966-641-239-6**

© В. Савуляк, І. Сивак, В. Савуляк, 2008

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/447>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

## Зміст

Вступ.....	5
РОЗДІЛ 1. ФОРМОУТВОРЕННЯ СКЛАДНИХ ПРОФІЛІВ З ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ.....	7
1.1. Основні задачі, що постають перед виробниками і споживачами складних профілів з тонколистового прокату.....	7
1.2. Основні способи виготовлення складних профілів з листового прокату.....	7
1.3. Застосування високовольтного електричного розряду в рідині для штампування листових матеріалів.....	9
1.4. Ударне штампування рідиною й еластичним середовищем...	11
1.5. Сучасні технології виготовлення бурякорізальних ножів пластичним деформуванням.....	14
1.6. Основні методи дослідження напружено-деформованого стану під час обробки металів тиском.....	22
1.7. Оцінка деформівності листових матеріалів.....	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ПРОЦЕСІ УТВОРЕННЯ ГОФРІВ.....	30
2.1. Порівняльний аналіз кінематики та напружено- деформованого стану в процесі утворення гофрів з тонколистового прокату.....	30
2.2. Напружено-деформований стан в процесі гофроутворення з тонколистового прокату.....	40
РОЗДІЛ 3. ПЛАСТИЧНІСТЬ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ФОРМОУТВОРЕННЯ СКЛАДНИХ ПРОФІЛІВ З ЛОКАЛІЗОВАНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ.....	55
3.1. Механічні характеристики листових матеріалів.....	55
3.2. Поверхня граничних деформацій.....	65
3.3. Визначення використаного ресурсу пластичності.....	68

3.4. Вплив проміжних відпалів на пластичність листових матеріалів.....	70
3.5. Вплив попередньої деформації на структуру металу після рекристалізаційного відпалу.....	73
РОЗДІЛ 4.	
РОЗРАХУНКИ СИЛ ТЕРТЯ ПІД ЧАС ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ .....	
4.1. Аналіз методів розрахунку.....	86
4.2. Моделювання шорстких поверхонь тертя .....	87
4.3. Визначення сили тертя під час пластичного деформування...	100
4.4. Основи теорії ліній течії та ліній швидкостей.....	106
4.5. Моделювання процесів тертя шорстких поверхонь.....	110
РОЗДІЛ 5.	
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГОФРОУТВОРЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БУРЯКОРІЗАЛЬНИХ НОЖІВ.....	
5.1. Процес різання бурякової сировини. Вимоги до бурякової стружки. Вимоги до бурякорізальних ножів.....	117
5.2. Конструкції бурякорізальних ножів.....	117
5.3. Технологія виготовлення бурякорізальних ножів .....	118
5.4. Методика інженерних розрахунків технології виготовлення бурякорізальних ножів пластичним деформуванням.....	124
ПІСЛЯМОВА.....	129
ЛІТЕРАТУРА.....	134
	135

## ВСТУП

Підвищення конкурентоспроможності машин в умовах ринкової економіки вимагає особливої уваги до проблем надійності та довговічності, зменшення їх собівартості. Використання гофрованих листових матеріалів для створення легких конструкцій високої жорсткості або в якості функціональних деталей машин (наприклад, для бурякорізальних ножів) дозволяє значно просунутись вперед по шляху розв'язання цих проблем.

Виготовлення профільованих заготовок, в тому числі і гофрованих, із малопластичних матеріалів методами штампування стримується, в основному, браком, обумовленим їх руйнуванням або втратою стійкості пластичної формозміни. Тому при виробництві, наприклад, бурякорізальних ножів для цукрових заводів переважно використовують процеси різання.

На цей момент практично відсутні достатньо точні методи розв'язання задач пластичного формоутворення із важкодеформівних тонколистових сталей гофрованих заготовок, конструкція яких вимагає значної локалізації деформації.

На практиці процеси листового штампування розробляються переважно на основі експериментальних досліджень, які можуть відрізнитися від реального процесу. Експериментальний підхід до визначення режимів та складу операцій технологічних процесів зумовлений тим, що властивості заготовок з листових матеріалів в процесі виготовлення залежать від геометричних параметрів заготовки, схеми навантаження, пластичності металу тощо. Актуальною є проблема розробки та подальшого вдосконалення експериментальних методів побудови кривих течії, діаграм пластичності, поверхонь граничних деформацій, вид яких визначався б тільки матеріалом листа, та подальшого розвитку на цій основі математичних моделей процесів пластичної формозміни листових заготовок. Отримані математичні моделі можуть слугувати базою для автоматизації й оптимізації розрахунків та проектування.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень деформівності листових матеріалів покладені в основу математичних

моделей процесів пластичної формозміни листових заготовок. Отримані математичні моделі є базою автоматизованих методів розрахунків та оптимального проектування.

Необхідно також відмітити, що вдосконалення та підвищення точності методів досліджень пластичності листових матеріалів та розробка на цій основі більш достовірних методів проектування нових технологічних процесів листового штампування є актуальною науково-технічною проблемою.

## РОЗДІЛ 1.

### ФОРМОУТВОРЕННЯ СКЛАДНИХ ПРОФІЛІВ З ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

#### 1.1. Основні задачі, що постають перед виробниками і споживачами складних профілів з тонколистового прокату

Завдяки високим технологічним та експлуатаційним якостям залізовуглецевих сплавів об'єми їх використання в найближчому майбутньому мають тенденцію до зростання. Це пов'язано зі значним збільшенням виробництва складних економічних профілів з тонколистового прокату для застосування в будівництві, машинобудуванні та інших галузях. Ще однією причиною цього є наявність добре відпрацьованих технологій та обладнання для виготовлення складних об'ємних конструкцій необхідної жорсткості і точності, а також простотою утилізації [1, 2]. Особливо ефективним є застосування профілів із складною просторовою будовою, що забезпечують високу жорсткість конструкцій в заданих напрямках, або виконання функціонального призначення (наприклад, профільний інструмент, стінки вагонів, настили, покрівля тощо) [3, 4, 5]. Важливо враховувати використання наявних виробничих потужностей, що можуть бути реконструйовані під нові технології [6–10].

#### 1.2. Основні способи виготовлення складних профілів з листового прокату

Вивчення й аналіз літературних матеріалів показали, що відомо кілька різних способів виробництва гофрованих профілів.

Малопродуктивний і дорогий процес одержання подібної продукції, що найбільш широко донедавна застосовувався, зводиться до того, що заготовка в гарячому стані піддається штампуванню на великогабаритних пресах [11]. До недоліків виробництва профілів цим способом можна віднести: окисацію поверхні, появу на ній іржі, що вимагає наступної очистки, появу значних термічних напружень при остиганні, погіршення



екології навколишнього середовища внаслідок значних теплових викидів, збільшення собівартості продукції через значні енергозатрати на підігрів. Ці недоліки обмежують використання гарячого штампування для одержання подібних профілів.

Найбільш продуктивним способом виготовлення профілів складної форми високої жорсткості з гофрами є валкове формування їх на високопродуктивних спеціалізованих агрегатах. Така технологія виробництва профілів цього типу була розроблена в Україні [12].

Відома низка технічних рішень, спрямованих на зниження металоємності листового або профільного прокату за рахунок його зміцнення шляхом нанесення невисоких гофрів, поздовжньо або поперечно розташованих на стрічці [13–15].

Однак, усі подібні рішення допускають формування відкритих (що займають всю довжину або ширину листа) поздовжніх або поперечних гофрів з висотою до подвоєної товщини вихідного матеріалу на листовій заготовці товщиною до 2,0...2,5 мм [16, 17].

Разом з тим, у більшості патентів на профілі, елементи яких посилені переривчастими гофрами, або не розкривається, яким способом ці гофри наносяться на ділянки профілю, або вказується, що в складі ліній для їхнього виробництва є штампувальний прес [18, 19].

Є країни де запатентовані технічні рішення, спрямовані на створення способів, які дозволяють формувати профілі з матеріалів, що погано деформуються. Так, у США отриманий патент на пристрій для вібраційного деформування листового матеріалу [20]. Відповідно до цього патенту для полегшення процесу деформування при гнутті або витяжці металевих заготовок використовується вібротехнічний пристрій. Під час механічних коливань формувального інструмента до заготовки прикладаються динамічна і статична складові сили, достатні для її деформування.

У [21] запропоновано пристрій для безперервного формування металевих листів хвилеподібного профілю з опуклими й увігнутими елементами за допомогою коливального руху. Пристрій складається з двох валків, що обертаються в підшипниках з однаковою швидкістю в протилежних напрямках, а також вібратора з віброважелями для утворення коливань. Верхній валок, що має переривчасті формувальні елементи

(виступи), з'єднаний з вібратором. При обертанні валка з опуклими елементами йому передаються високочастотні коливання вібратора, при цьому полегшується формування профілю, запобігається утворення тріщин і нерівностей на виробках.

Слід зазначити, що способи, які використовують коливальні рухи валків, розраховані на застосування в перспективі, оскільки в наш час вони є малопродуктивними, вимагають складного, дорогого і дефіцитного устаткування.

З розглянутого питання можна привести ще ряд патентів зарубіжних країн [22-25]. Однак, слід зазначити, що більшість відомих способів і пристроїв розраховані на технологічні процеси виготовлення гофрів відносно малої кривизни та мають порівняно невисоку продуктивність.

Аналіз науково-технічної і патентної літератури також показав, що в колишньому СРСР та країнах СНД наукові публікації, авторські свідоцтва і патенти з питань формування на листовій заготовці гофрів з великими локальними деформаціями, малими радіусами кривизни та великими кутами загострення практично відсутні. Виняток складають роботи, в яких розглядаються окремі спеціальні питання конструкції профілів високої жорсткості й устаткування для їх дрібносерійного та масового виготовлення [26–28].

### **1.3. Застосування високовольтного електричного розряду в рідині для штампування листових матеріалів**

Найбільш відомими і широко розповсюдженими є два способи листового штампування електричним розрядом – за допомогою електричного розряду в рідині і вибуху дротинки.

У 1950 році, вперше в СРСР, Л. А. Юткіну було видано авторське свідоцтво на спосіб отримання високих і надвисоких тисків. Суть способу полягає в здійсненні в рідині високовольтних імпульсних розрядів, що створюють потужні імпульсні поля тисків, високошвидкісне переміщення рідини, ультразвукові коливання, кавітаційні процеси і світлові спалахи [29, 30]. Сукупність цих явищ автор назвав електрогідравлічним ефектом.

Роботи Л. А. Юткіна стали поштовхом до розвитку електрогідроімпульсного штампування. На початку 60-х років спосіб почав

активно впроваджуватись у виробництво і досліджуватись. У Миколаєві А. П. Сорочинський, А. К. Постоев, Г. Т. Поддубний та інші створили проектно-конструкторське бюро електрогідравліки й організували серійне виробництво електрогідравлічних установок [31]. В. С. Комельков, В. В. Арсеньтьєв, І. З. Окунь, І. П. Кужекін заклали основи теорії електрогідравлічного ефекту [32, 33]. Глибоке дослідження процесів електрогідроімпульсного штампування проведене в роботах Ю. Є. Шамаріна [34, 35, 36], С. А. Бичкова [37], В. Н. Чачина [38, 39, 40, 41], Ю. Є. Шаріна [42].

Високовольтний електричний розряд у рідині характеризується визначеною послідовністю явищ: утворення провідного каналу, виділення енергії в цьому каналі і його розширення. Ефективність цих процесів у першу чергу буде залежати від величини тиску, часу його дії та жорсткості заготовки.

Виділення енергії відбувається протягом дуже короткого проміжку часу (порядку  $10^{-6}$ с). При цьому енергія електричного розряду безпосередньо перетворюється в енергію іонізованого газу високого тиску.

Під дією внутрішнього тиску канал розряду починає розширюватись, утворює газовий пухир, збільшуючись в об'ємі і після виділення енергії. Швидкий ріст газового пухиря призводить до виникнення ударної хвилі, яка відривається від його стінки і потоку рідини, що розтікається. Як ударна хвиля, так і потік рідини, що розтікається, несуть у собі енергію, що з успіхом може бути використана для здійснення різних технологічних процесів. В залежності від жорсткості заготовки основним чинником деформування може слугувати енергія ударної хвилі або енергія кавітації рідини. Крім того позитивний вплив на формозміну важкодеформівного матеріалу здійснює коефіцієнт динамічності (характеризує відношення границь текучості матеріалу під час динамічних та квазістатичних випробувань), який наближається до одиниці для матеріалів з границею текучості близько 500 МПа [43]. Разом з тим, енергія, яка витрачається на пластичну деформацію, перетворюючись на теплоту викликає тепловий ефект, прояв якого зосереджується в зонах площин ковзання. Це дає змогу підвищити кількість площин ковзання і одночасно збільшити граничні деформації.

Аналогічний принцип покладений в основу штампування вибухом дротинки, тільки для забезпечення гарантованого пробою передавального середовища, як канал електричного імпульсу використовується тонка дротинка. Під час проходження імпульсу струму через дротинку вона розігрівається і випаровується практично миттєво створюючи ударну хвилю. Далі процес розвивається за такою ж схемою, як і після розряду в рідині. Через конструктивні особливості устаткування оптимальний розмір дротинки і довжина її в пристрої можуть не збігатися, що призводить до погіршення умов штампування.

Ефективність перетворення енергії істотно залежить від умов протікання процесу у відкритому об'ємі або замкнутому. Якісна картина навантаження об'єкта обробки при використанні відкритих (великих) об'ємів може бути представлена так: 1) переміщення заготовки під дією ударної хвилі (як прямої, так і відбитих), потоку рідини, що кавітує, і гідропотоку [44].

У випадках, коли енергія, яка необхідна для деформування настільки велика, що її виділення за короткий проміжок часу може призвести до руйнування заготовки, застосовують розбиття енергії на ряд імпульсів.

Основною перевагою таких методів є можливість отримання за один перехід деталей із значно більшими ступенями деформації, ніж при статичному навантаженні [45], а також невисока вартість операції через спрощення штампової оснастки (не має потреби виготовляти і матрицю і пуансон та підганяти їх). Основними недоліками, які обмежують більш широке застосування вказаних способів є дуже невисока продуктивність, невисока стійкість оснастки, великі амортизаційні відрахування, висока собівартість обслуговування та спеціальні заходи техніки безпеки, як і в роботі з іншим високовольтним обладнанням.

#### **1.4. Ударне штампування рідиною й еластичним середовищем**

У цьому способі використовується високошвидкісний удар твердого тіла по обмеженому об'єму рідини або еластичного середовища. Він застосовується порівняно недавно і був використаний А. Д. Томленовим для випробувань матеріалів [46]. Застосування проміжного поршня в розробленій схемі не дозволило використовувати високі швидкості удару

через низьку стійкість бойка, а тому в цих пристроях швидкість удару не перевищувала 5,0...7,5 м/с. Така швидкість не дозволяє досягти високих енергій удару при відносно невеликих габаритах і масі пристроїв.

В подальшому розвитку методу створений якісно інший тип гідроударних пристроїв – прес-гармата. У цих пристроях бойок ударяє безпосередньо по рідині, що значно підвищує його стійкість.

Розгін бойка в прес-гарматах здійснюється енергією порохових газів, що дозволяє досягти швидкості удару до 150 м/с [47–49]. Завдяки компактності енергоносія прес-гармати мають невеликі габаритні розміри, прості конструкції, дешеві. Великі швидкості удару забезпечують високу ефективність штампування. Однак застосування порохового енергоносія є причиною ряду недоліків, що стримують поширення прес-гармат у промисловості. До таких недоліків відносяться складність роботи з вибуховими речовинами і труднощі в точному дозуванні енергії удару (пов'язані з їх точним дозуванням і характеристиками горіння). Однак завдяки своїм високим енергетичним можливостям прес-гармати – незамінне устаткування при одержанні ряду деталей з великими габаритами.

Недоліки, пов'язані з використанням вибухівки, усунуті в гідроударному устаткуванні [50]. Високошвидкісний молот цієї конструкції забезпечує прямий удар бойком по рідині зі швидкістю до 50 м/с. Як енергоносієм використовується стиснутий азот, оскільки молот працює за безвитратною схемою. Повернення бойка у вихідне положення і стиск азоту до початкового тиску здійснюються гідравлічним приводом. Застосування таких пристроїв дозволило наблизити умови роботи на них до умов роботи на звичайному ковальсько-пресовому устаткуванні. У той же час невисока швидкість удару і використання гідравлічного приводу для повернення бойка обумовлюють високі вагові показники молота – важить 45 т і займає площу 20 м<sup>2</sup>.

Новий етап у розвитку гідроударного способу штампування – ударне штампування листових матеріалів рідким і еластичним середовищем.

Накопичений у ресивері стиснутий газ, розширюючись, розганяє бойок, що зі швидкістю 20...150 м/с ударяє по рідині або еластичному середовищу, створюючи там імпульс тиску, що деформує заготовку

відповідно до форми матриці. Енергія удару регулюється зміною тиску газу в ресивері.

Цей метод має низку переваг у порівнянні з традиційною технологією штампування. До найбільш істотних достоїнств методу ударного листового штампування відносяться: 1) значне спрощення і здешевлення штампувального оснащення; 2) можливість штампування в одній матриці деталей різної товщини; 3) скорочення термінів підготовки виробництва; 4) точність дозування енергії удару; 5) створення високих тисків, що дозволяють ефективно обробляти важкодеформівні матеріали; 6) висока рівномірність прикладеного навантаження і легкість керування імпульсом тиску, що діє на заготовку, як за амплітудою, так і за тривалістю; 7) висока точність і якість поверхні відштампованих виробів; 8) одержання деталей складних форм, які не отримуються іншими методами; 9) немає необхідності в ущільненнях при штампуванні еластичним середовищем.

У свою чергу, існуюче обладнання і устаткування для цього методу має такі переваги в порівнянні з іншими імпульсними машинами: 1) відсутність засобів підвищеної небезпеки (високої напруги, пороху); 2) високий коефіцієнт корисної дії устаткування, простота, надійність і зручність в експлуатації; 3) відносно невелика маса і мала займана виробнича площа.

Розглянемо, що забезпечує достоїнства методу й устаткування для ударного штампування рідким і еластичним середовищем. Через те, що роль пуансона при такому методі штампування виконує рідина, або еластичне середовище (поліуретан), то виготовлення штампа зводиться лише до виготовлення однієї матриці, тобто оснащення помітно спрощується, бо усувається найбільш складна і вартісна операція припасування матриці до пуансона. Ціна такого оснащення в 3...5 разів менша вартості штампів, а при штампуванні складнопрофільних і особливо при роздачі порожнистих виробів вартість обладнання може знижуватися в десятки разів. Спрощення устаткування, в свою чергу, приводить до скорочення термінів проектування і зниження затрат праці на її виготовлення, тобто до помітного скорочення термінів підготовки виробництва, що іноді відіграє вирішальну роль. Використання рідини або еластичного середовища як пуансона дозволяє також штампувати в одній

матриці деталі з листів різної товщини, тому що такий пуансон автоматично "підлаштовується" під зміну товщини матеріалу.

При формувальних операціях рідким або еластичним середовищем в основному реалізується схема двохосового напруженого стану. Формувальні операції, здійснювані рідким і еластичним середовищем, істотно відрізняються між собою, оскільки застосування останнього збільшує необхідну для формоутворення енергію удару.

Високі швидкості деформування і рівномірність розподілу навантаження під час ударного формування рідким і еластичним середовищами – основна причина вищої здатності до штампування листових матеріалів у порівнянні зі статичним формуванням як у штампі, так і еластичним середовищем [51–54]. Так, граничні значення потоншення центральної частини заготовки при ударному штампуванні в 1,2...2 рази перевищують аналогічні значення при статичному формуванні, відповідно і відносна глибина формування, тобто відношення глибини прогину заготовки до діаметра матриці перевищує аналогічні значення для статичного формування. Тому метод ударного штампування рідиною або еластичним середовищем в багатьох випадках – незамінний спосіб формоутворення деталей. Однак він має недоліки: висока вартість устаткування; недостатня його вивченість і надійність; низька ефективність устаткування в дрібносерійному виробництві через складність переналагодження; складний перехід від однієї деталі до іншої, через потребу ретельного попереднього аналізу конфігурації деталі і розрахунку техніко-економічних показників. Крім того в [55] вказується, що ударні методи штампування мають вартість виготовлення деталей вищу, ніж штампування, штампування вибухом і електрогідроімпульсна штамповка (рис. 1.1). Економічно доцільним вважається використання електрогідроімпульсної штамповки та ударних методів, якщо розміри виробничої серії деталей складають до 300-400 штук.

### **1.5. Сучасні технології виготовлення бурякорізальних ножів пластичним деформуванням**

В технічній літературі недостатньо відомостей щодо технологічних процесів виготовлення бурякорізальних ножів методами пластичного

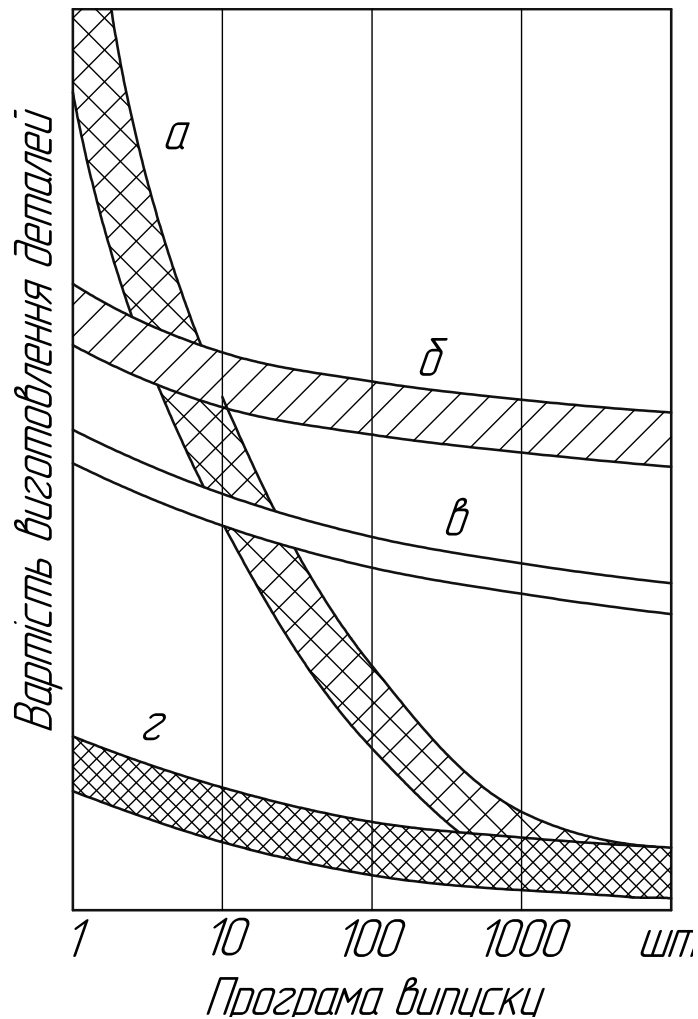


Рис. 1.1. Вартість виготовлення деталей в залежності від програми випуску і обладнання, яке застосовується: *a* – штамповка на механічних пресах; *б* – видавлювання роликком на верстатах; *в* – штамповка вибухом; *г* – електрогідроімпульсна штамповка

деформування. Значно ширше представлені технології виготовлення гофрованих листових матеріалів для використання в різних конструкціях, зокрема як огорожувальні та силові елементи. Виконаний вище аналіз показав, що найбільш реальними для виготовлення бурякорізальних ножів методами пластичного деформування з тонкого листа є технології, що використовують згинання. При цьому бажано повністю уникати витяжки в місцях значних локальних деформацій. Нижче представлені способи та пристрої є найбільш загальними та уособлюють в собі значну частину переваг та недоліків сучасних технологій виробництва гофрованих деталей з тонколистової стрічки відповідної товщини, що використовують для формоутворення деформування гнуттям.



Патенти [56, 57] описують спосіб гофрування листового матеріалу (товщина  $s=0,1\dots0,5$  мм;  $\frac{h}{b}=1,5\dots2,5$ ) послідовним гнуттям кожної сторони гофри з одночасною фіксацією частини листа, на якій вже сформовані гофри. За цією технологією для отримання гофрів з більшою відносною висотою  $\frac{h}{b}$  і меншими радіусами заокруглень лист деформується в три етапи: 1) попереднє деформування листа за допомогою першої системи штампів пристрою; 2) утворення гофри вільним гнуттям; 3) остаточне формування гофри в додатковому штампі пристрою. Такий спосіб формоутворення вимагає порівняно складної кінематичної схеми пристрою та зумовлює невисоку продуктивність процесу.

Суть винаходу за авторським свідоцтвом [58] полягає в тому, що в матеріалі вздовж тонкої стрічки із заданим кроком виконують отвори, через які пропускають довгий корд, трос тощо. При цьому надівають на корд розпірні елементи між кожною парою отворів. Один кінець корду фіксують, а інший витягують до контакту розпірних елементів з гранями утворених гофрів.

Внаслідок неоднорідності ділянок матеріалу, вільного формування гофрів вони мають різну форми та геометричні параметри. Цей спосіб може бути застосований лише для виготовлення заготовок гофрованих деталей, або таких деталей, що не вимагають будь-якої значної геометричної точності, з тонкої стрічки, що не потребує значних зусиль під час гофроутворення.

В пристроях [59, 60] застосована складна кінематична схема механізму з двома повзунами, що здійснюють коливальний рух, згинаючи стрічку, подача деформованого листа здійснюється за рахунок обертання шліцевих валів. Принципова схема пристроїв показана на рис. 1.2. Для цих механізмів процес гофроутворення відбувається вільним гнуттям стрічки, що не забезпечує точності геометричних параметрів. В [61–63] застосовується спосіб формування гофрів шляхом почергового гнуття з використанням пар пуансонів, що рухаються назустріч. Пуансони почергово відіграють роль матриці, відносно якої згинається лист (рис. 1.3).

Штамп [64] має можливість задавати геометрію і форму готової гофри і складається з ряду пуансонів, що почергово опускаються, починаючи від центру штамп, в відповідні пази і деформують лист. Під

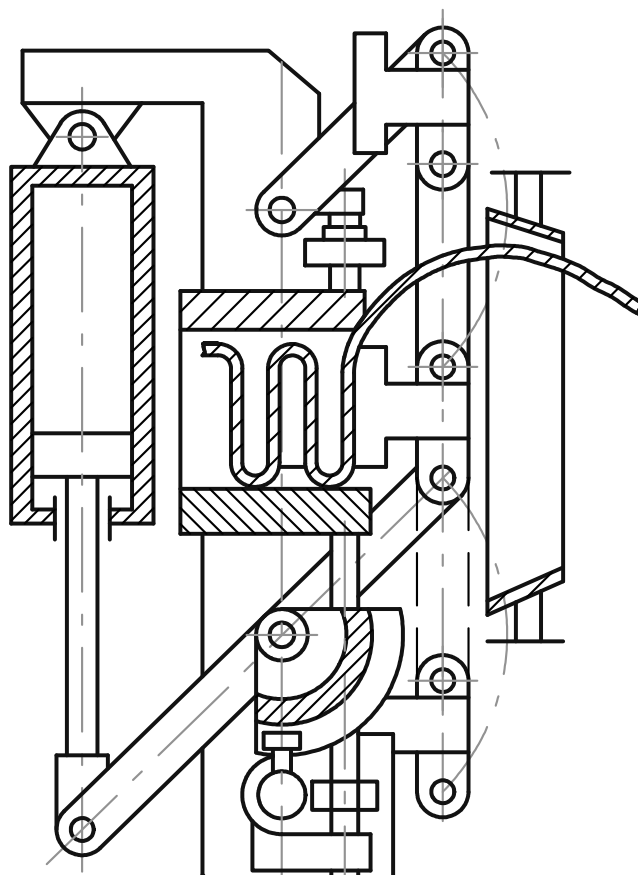


Рис. 1.2 – Пристрій для гофрування

час руху пуансонів виникають сили тертя, а при малих радіусах кривизни гофри пуансони будуть виконувати роль ножів, які ковзають по листу і можуть його розрізати. На початкових стадіях деформування можлива також втрата стійкості листа, що викликає утворення морщин поперек гофрів.

В пристрої [65] деформування матеріалу гнуттям відбувається поступово на значній довжині. В ролі матриці використовують набір формувальних ребер, а подавального механізму – натягнуті між двома бараба-

нами, які обертаються, ремені. Конструктивна схема механізму не передбачає калібрування, крім того схема деформування (за допомогою вакуумної камери створюється розрідження і матеріал втягується між формувальні ребра) не дозволяє отримати точну гофровану деталь та обробити листовий матеріал із якою-небудь значною товщиною ( $>0,05$  мм) (рис. 1.4).

Серед представлених способів і пристроїв заслуговує на увагу розробка [66], що використовує ідею суміщення в одному штампі формуютьовальної та калібрувальної операцій шляхом послідовного наближення форми гофри до заданої (рис. 1.5). При цьому використовуються переваги штампу для забезпечення геометричних параметрів виробу, мінімізується вплив пружних деформацій на точність гофри, забезпечується простота конструкції механізму. Але штамп [66] не дозволяє повністю уникнути (зменшити до нуля) деформацій розтягу в зоні інтенсивної формозміни, через що значно підвищується використання ресурсу пластичності матеріалу, а отже підвищується ймовірність браку та

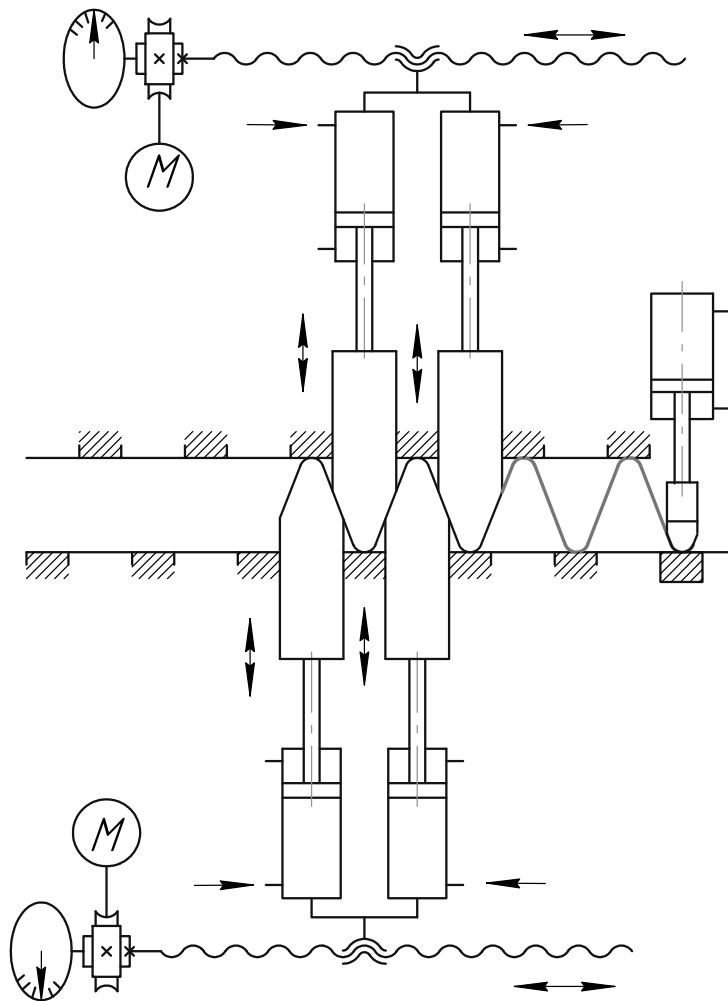


Рис. 1.3. Пристрій для гофрування листового матеріалу

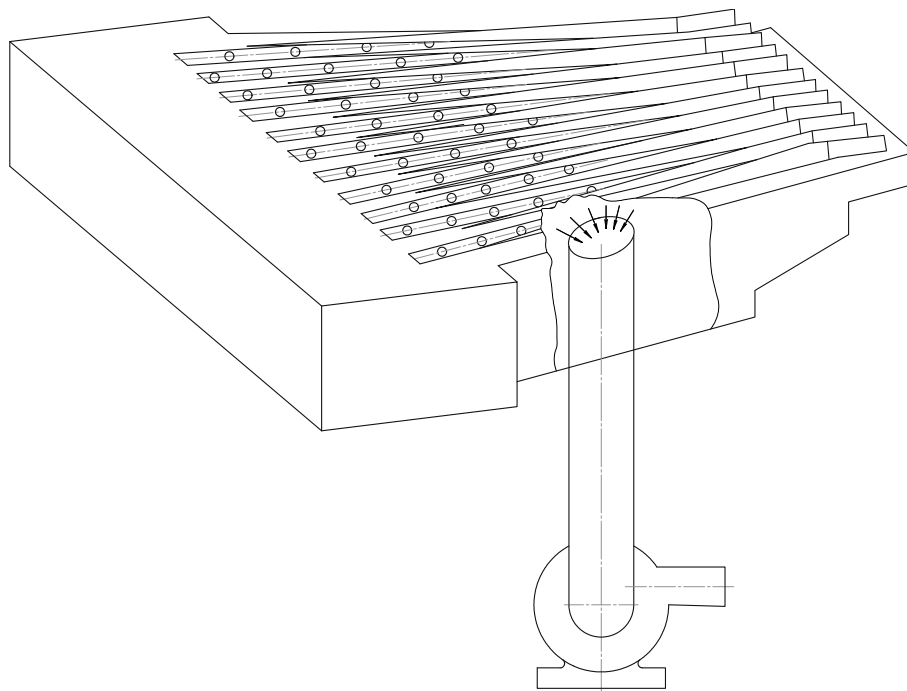


Рис. 1.4. Пристрій для гофрування тонколистового матеріалу (товщини 0,05 ... 0,15 мм)

зменшується термін експлуатації виробів. На відміну від [66] в [67] за рахунок постійної довжини листа (відповідає довжині готової гофри) та накладання вібраційного навантаження вдається зменшити зусилля деформування, підвищити продуктивність, зменшити деформації розтягу.

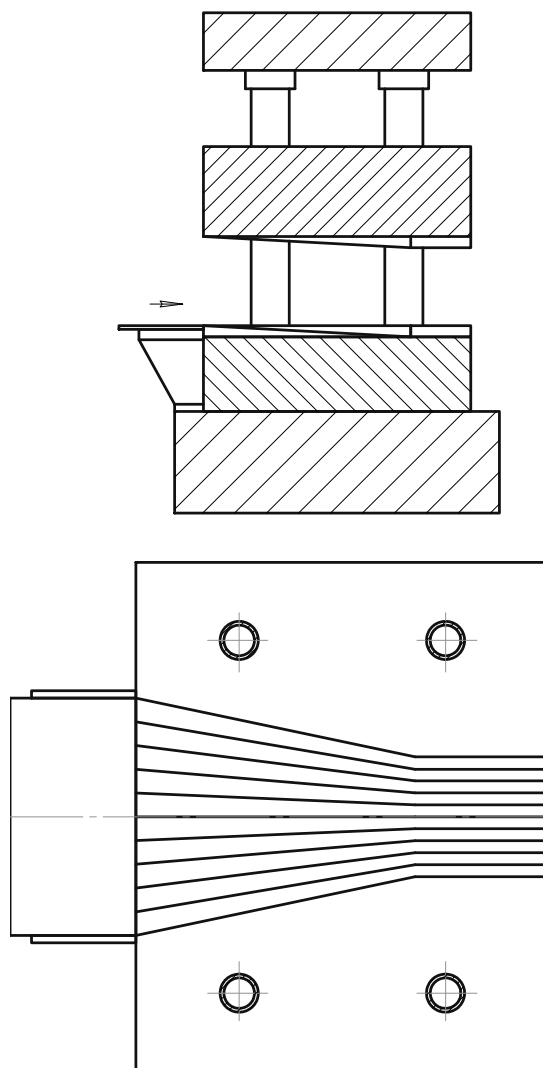


Рис. 1.5. Штмп для виготовлення гофрованої стрічки

Значно зменшити деформації розтягу листа в процесі формування гофри дозволяє пристрій за патентом [68] (рис. 1.6). З цією метою пуансон матриці виконано з двох частин – фіксувальної частини, що підпружинена, та формувальної частини, які встановлені на рухомій плиті. Під час робочого ходу плити підпружинена частина спочатку затискає сформовані гофри, не дозволяючи їм деформуватися під впливом зусилля формування гофри. Після затискання формувальна частина пуансона формує гофру,

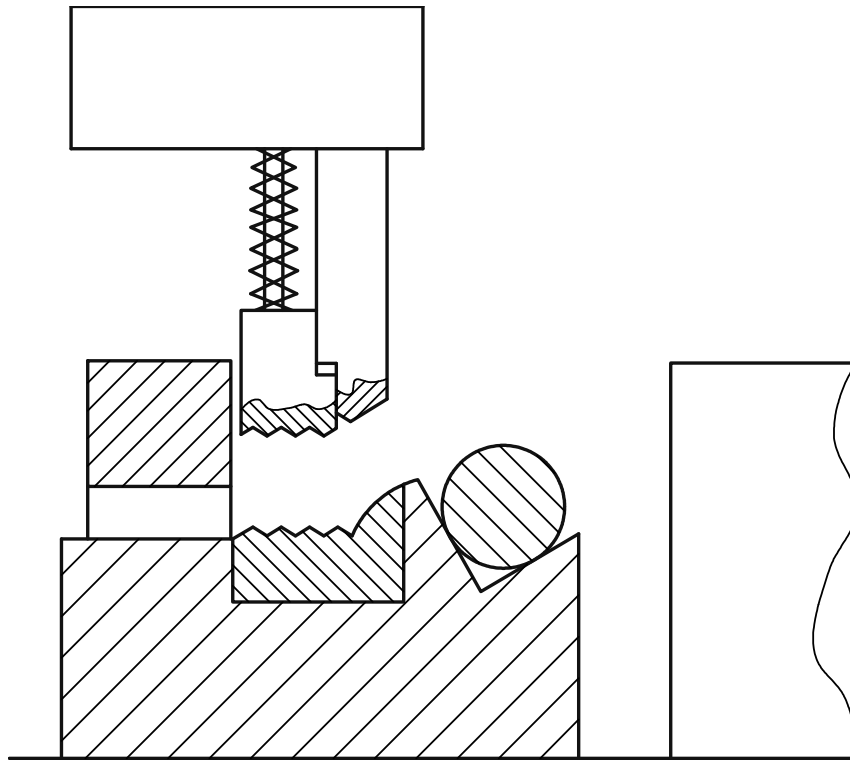


Рис. 1.6. Пристрій для формування поперечних паралельних гофрів на стрічковому матеріалі, який періодично переміщують

підтягуючи вільний кінець листа. Недоліком робочого процесу формування гофри є необхідність проковзування листа відносно точок контакту пуансон–лист. Внаслідок цього одна із стінок гофри видовжується і потоншується під дією сил тертя між пуансоном і матеріалом заготовки. Внаслідок цього підвищується також ступінь використання ресурсу пластичності на вершині гофри, де відбувається згин листа.

Пристрій [69] використовує кулачкові механізми, які працюють в протифазі, для забезпечення відносного переміщення інструменту і матеріалу з метою формування прямокутних гофрів (переважно для тепловідводів та нагрівачів) (рис. 1.7). Недоліком такого пристрою є нестабільність кроку переміщення інструменту (крок гофрів) через зношування кулачкових механізмів. Можлива область його застосування – для формування неточних гофрів із матеріалів з високою пластичністю.

Спосіб [70] пропонує формувати гофри із підбраного товстолистового матеріалу шляхом його пропускання між валками. В процесі формозміни заготовка набуває форму готової гофри з відповідною

*Наукове видання*

**Савуляк Віктор Валерійович  
Сивак Іван Онуфрійович  
Савуляк Валерій Іванович**

**ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОГО  
МАТЕРІАЛУ В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ЛОКАЛІЗАЦІЙ  
ДЕФОРМАЦІЙ ТА НАПРУЖЕНЬ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. В. Савуляком

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 14.03.2008 р.  
Формат 29,7 x 42 ¼ Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,66  
Наклад 100 прим. Зам. 2008-034

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/447>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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