

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. В. Грушко, Т. І. Молодецька

**ХОЛОДНЕ ГНУТТЯ
ТОВСТОЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК
З МАЛОПЛАСТИЧНИХ МЕТАЛІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.981

ББК 34.623

Г97

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 12.12.2013 р.)

Рецензенти:

В. А. Тітов, доктор технічних наук, професор

І. О. Сивак, доктор технічних наук, професор

Грушко, О. В.

Г97 Холодне гнуття товстолистових заготовок з малопластичних металів : монографія / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька. – Вінниця : ВНТУ, 2014 – 144 с.

ISBN 978-966-641-597-7

В монографії розглядаються шляхи вдосконалення процесу холодного гнуття широких заготовок з малопластичних металів щодо раціонального підбору їх геометричних параметрів. Побудовано регресійну модель процесу поперечного гнуття широких товстолистових заготовок. Вдосконалено побудову діаграм пластичності за допомогою параметра, що враховує властивості матеріалу. Отримано залежності, які дозволяють визначати зусилля, необхідні для штампування виробів z-подібного профілю, на основі кривої течії матеріалу та геометричних розмірів заготовки. Розроблено технологічні рішення, що дозволяють зменшити силу деформування.

УДК 621.981

ББК 34.623

ISBN 978-966-641-597-7

© О. Грушко, Т. Молодецька, 2014

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	6
1.1 Відомі способи виготовлення гнутих широких заготовок з малопластичних матеріалів	6
1.2 Теоретичні та експериментально-теоретичні моделі механіки формоутворення гнутих листових заготовок у штампах	17
1.3 Моделі деформовності	22
1.3.1 Скалярні моделі	22
1.3.2 Інтегральні моделі	24
1.3.3 Тензорні моделі	25
1.4 Дослідження методів технологічної механіки	27
1.4.1 Метод ліній ковзання	27
1.4.2 Метод опору пластичним деформаціям	29
1.4.3 Варіаційні методи	30
1.4.4 Метод скінченних елементів	31
1.4.5 Метод верхньої оцінки	32
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	34
2.1 Випробувальні машини та обладнання	34
2.2 Експериментальні зразки, матеріали	36
2.3 Методика розрахунку напружено-деформованого стану матеріалів, що їх отримують методом згину	38
2.3.1 Методика розрахунку напружено-деформованого стану за методом ділильних сіток	38
2.3.2 Метод твердості	41
2.3.3 Методика побудови кривих течії	43
2.3.4 Методика побудови діаграм пластичності	45
2.4 Обґрунтування вибору розрахункових комплексних програм	49
2.5 Основні положення методу планування експерименту	54
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІКИ ПРОЦЕСУ ЗГИНУ ШИРОКИХ ЗАГОТОВОК	59

3.1 Експериментально-теоретичний аналіз механіки процесу згину широкої прямокутної заготовки.....	59
3.1.1 Теоретичний аналіз механіки процесу згину із застосуванням методу скінченних елементів.....	59
3.1.2 Дослідження механіки процесу згину із застосуванням методу сіток	69
3.2 Дослідження процесу гнуття широкої заготовки z-подібного симетричного профілю методом скінченних елементів	76
3.2.1 Дослідження формозмінювання	76
3.2.2 Дослідження напружено-деформованого стану z-подібної заготовки	81
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГНУТТЯ	85
4.1 Оцінка деформовності	85
4.1.1 Діаграми руйнування досліджуваних матеріалів	85
4.1.2 Модель деформовності для гнуття широкої заготовки z-подібного симетричного профілю.....	95
4.2 Розробка методики визначення енергосилових параметрів методом еквівалентної оцінки	109
4.3 Практичне використання результатів дослідження	119
4.3.1 Розробка способу зміцнювального гнуття заготовок.....	119
4.3.2 Адаптація технології гнуття товстолистової заготовки з важкодеформовного матеріалу до параметрів пресового устаткування	122
ВИСНОВКИ.....	130
ЛІТЕРАТУРА	132

ВСТУП

Розвитку ресурсозберігаючих технологічних процесів обробки металів тиском (ОМТ) в умовах постійно зростаючих цін на енергоресурси приділяється особлива увага. Процеси холодного пластичного деформування (ХПД) зазвичай є найекономічнішими з енергетичної точки зору. Проте при формоутворенні заготовок, насамперед з малопластичних металів, інтенсивно вичерпується запас пластичності, що може призвести до утворення тріщин, розривів металу та небажаної технологічної спадковості. Також процесам ХПД властиві високі питомі зусилля на робочий інструмент, уточнені відомості про які необхідні для підбору обладнання та розрахунку штампового оснащення. Методи технологічної механіки направлені на вирішення практичних технологічних задач, в тому числі зазначених, на основі вивчення механіки процесу ОМТ.

Процеси холодного гнуття товстолистових заготовок знайшли застосування при виробництві відповідних виробів різноманітних форм (зокрема, z-подібного профілю) та призначення (для машинобудування, літакобудування, сільського господарства тощо) в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва. Найпоширенішим способом виготовлення таких деталей, особливо з малопластичних матеріалів, зазвичай є гаряче штампування. Використання холодної обробки вимагає суттєво уточнювати як граничні можливості процесу з метою уникнення тріщин, так і визначення його енергосилових параметрів. Існуючі на сьогоднішній день теоретичні розв'язки та експериментально-аналітичні моделі не дозволяють з необхідною точністю прогнозувати напружено-деформований стан (НДС) в процесі гнуття зусиллям товстолистових заготовок навіть для найпростіших випадків. Це пов'язано із невиконанням гіпотези плоских перерізів та наявністю великого рівня зсувних деформацій в осередку згину. Використання відомостей про НДС разом із діаграмами пластичності, згідно феноменологічної теорії деформуємі, дозволяє прогнозувати руйнування. Однак, при згині реалізуються такі умови, в яких метал може поводитись нехарактерно щодо монотонної зміни пластичності від схеми напруженого стану, що визначається показником В. А. Бабичкова. В результаті для процесів, що перебігають на межі технологічних можливостей, також важливо мати надійні дані щодо пластичності металу в умовах, тотожних до умов формоутворення виробу. Отже, для штампування широких товстолистових заготовок відсутні науково обґрунтовані рекомендації, за допомогою яких визначають основні раціональні технологічні параметри та енергосилові характеристики, що важливо при обробці малопластичних та важкодеформівних металів і є важливою умовою впровадження технології в промисловість.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Відомі способи виготовлення гнутих широких заготовок з малопластичних матеріалів

На сьогоднішній день спостерігається позитивна тенденція використання великої кількості гнутих металевих профілів для багатьох галузей народного господарства. Більш того, в деяких конструктивних рішеннях гнуті профілі виявляються пріоритетними як з точки зору вагової віддачі, так і з точки зору їх експлуатаційної надійності та ефективності [1].

Існує декілька альтернативних методів отримання гнутих профілів, а саме: прокат, гнуття на пресах та протягування в інструментальних фільерах. Однак використання цих способів виготовлення проблематичне для отримання профілів з широких заготовок [2]. Ще більш суттєвим обмеженням цих технологій є отримання профілів з малопластичних металів. Крім того, ці способи приводять до великих втрат металу, вони малопродуктивні, собівартість гнутих профілів виявляється достатньо високою, що різко обмежує використання вказаних технологій у виробничій сфері [2, 3].

Широкі гнуті деталі з малопластичних матеріалів, що входять до багатьох конструкцій виробів в будівництві та машинобудуванні, виготовляються за різними технологіями (рис. 1.1). Такі заготовки можна отримати як методами холодного формування, так і з застосуванням нагріву. Нижче наведений аналіз різновидів виготовлення широких гнутих деталей з малопластичних матеріалів.

В кромкозгинальних машинах з прикладанням згинального моменту та стискної сили в процесі формоутворення кута з малим відносним радіусом отримують плоскі заготовки (рис. 1.2). Технологічний процес зводиться до згину кінцевої частини заготовки або отримання деталей з кількома зонами згину. Прикладення стискної сили P_f забезпечує більш коротку траєкторію переміщення торця заготовки (Δl), ніж при звичайному згині; при цьому для здійснення стиснутого згину вісь обертання поворотної частини пристрою зміщують в верхню півплощину на відстань h .

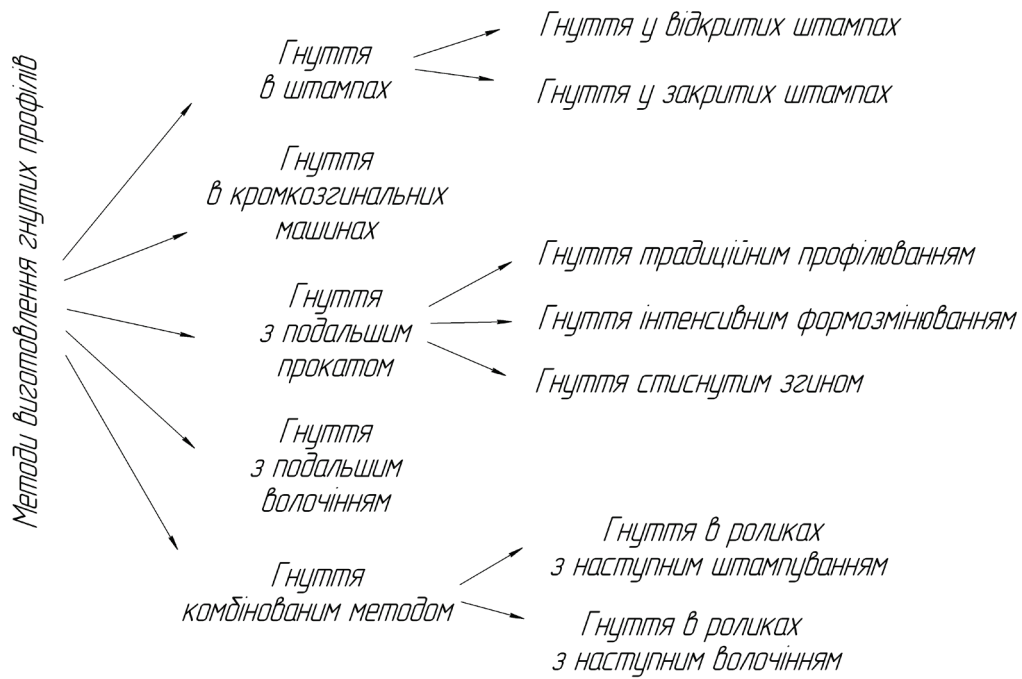


Рисунок 1.1 – Класифікація методів виготовлення гнутих профілів

Кромкозгинальні пристрої зручні в роботі при виготовленні заготовок невеликої довжини, а також при проведенні експериментальних досліджень гнуття нових, в тому числі, композиційних матеріалів невеликих товщин на малі радіуси [2]. Виготовлення профілів цим методом має такі недоліки: висока ціна обладнання, відносно низька точність отриманих деталей, обмежені технологічні можливості (порівняно невелика довжина профілю), низька продуктивність [3]. Тому цей метод не отримав широкого розповсюдження.

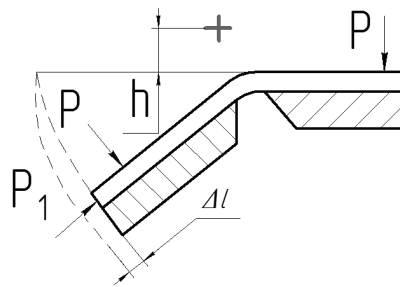


Рисунок 1.2 – Гнуття в кромкозгинальних пристроях

Отримати заготовки з відносно малими радіусами та локальними потовщеннями в зонах згину можна за рахунок протягування листової заготовки через філь'єру (рис. 1.3).

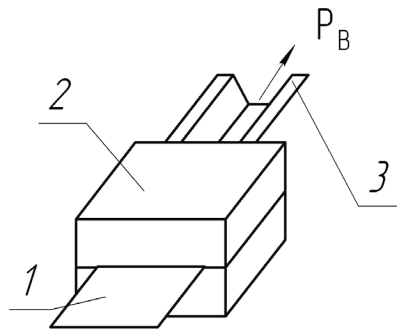


Рисунок 1.3 – Формоутворення профілю під час протягування заготовки через інструментальну фільтру: 1 – листова заготовка; 2 – фільтр; 3 – профіль

Волочіння, за рахунок розтягу при стиснутому згині, розвантажує осередок деформації, що дозволяє зменшити число переходів при виготовленні фасонних профілів. Процес гнуття-волочіння усуває негативний вплив зсувних деформацій по висоті профілю, підвищує точність розмірів та якість поверхні, дає можливість не застосовувати калібрування. Під час волочіння за допомогою інструментальної фільтри відбувається поетапне згинання листової заготовки зі стисканням по її торцях. Торцеві сили стиску створюють осадку матеріалу в процесі формоутворення кута, забезпечують підгинання на малі радіуси та потовщення матеріалу в зонах згину [1, 4–8].

Під час волочіння доцільно протягувати заготовку через роликову фільтру або поєднувати волочіння з іншими способами. В роликовій фільтрі значно, в порівнянні з інструментальною, знижуються контактні напруження в осередках деформацій, що покращує якість поверхні профілю, з'являється можливість вирівнювання напружень по перерізу профілю за рахунок сил волочіння, що знижує величину пружності матеріалу.

Виготовлення гнутих профілів гнуттям-прокатуванням має низку переваг перед іншими способами [8, 9, 10]: висока продуктивність; можливість отримання складнопрофільних деталей; можливість поєднання процесу виготовлення гнутого профілю з його нарізанням в заданий розмір; можливість поєднання процесу пробивання різноманітних отворів в металевій стрічці з заданим кроком з профілюванням стрічки в заданий профіль; можливість поєднання процесу профілювання і гнуття уже готового профілю на заданий радіус.

Суть процесу профілювання полягає в послідовній зміні форми поперечного перерізу заготовки (металева стрічка, смуга) при проходженні її через ряд послідовно встановлених пар роликів, які обертаються в протилежних напрямках [11]. Гнуття здійснюється в декілька проходів. Спочатку отримують профільну заготовку з радіусами, більшими заданих [12, 13], а потім – профіль кінцевої форми перерізу з відносно малими радіусами (рис. 1.4). Для цих цілей використовуються згинально-прокатні стани з роликівним формівним інструментом. Особливістю цього процесу є те, що через близьке розташування клітей заготовка перебуває в пластичному стані і піддається багаторазовому переформуванню. Такий спосіб мало придатний для виробництва профілів з малопластичного матеріалу або матеріалу з покриттям.

Формоутворення профілів в роликах можна умовно розділити на традиційне профілювання, інтенсивне деформування та стиснений згин.

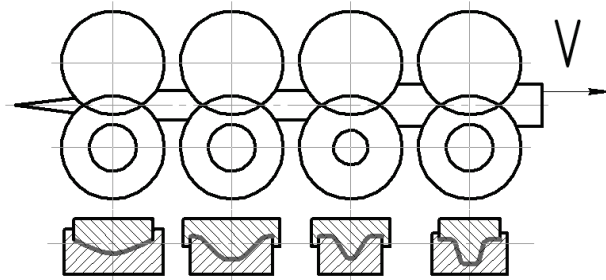


Рисунок 1.4 – Схема гнуття-прокатування в роликівому інструменті

Традиційне профілювання потребує використання багатоклітєвих профілезгинальних машин з числом клітєй від 10 до 52. В умовах постійного удосконалення конструкцій профілюваних деталей традиційне профілювання не можна вважати оптимальним способом виготовлення гнутих профілів в зв'язку з його спрямованістю на масовий характер виробництва (великі габарити обладнання, велика кількість оснащення, великі часові затрати на переналагодження) [3, 5].

Існує велика різноманітність способів виробництва гнутих профілів по схемами традиційного профілювання [14–30]. Ці способи детально аналізуються в роботі [31, 126]. При виконанні роботи нами було прийнято до розгляду відповідні технологічні рішення.

Для створення умов стиснутого згину ширина плоскої заготовки повинна перевищувати ширину розвертки калібру. Осадка криволінійних ділянок профільованої заготовки, що прилягають до кутових зон, створює додаткові сили, що дозволяють отримати в обмеженому контурі місцеве потовщення матеріалу по зонах згинання профілю і малі відносні радіуси. Можливі схеми з торцевим підтисканням при плоскій стінці, однак для збільшення товщини в кутовій зоні ця схема годиться тільки для профілів з малою шириною полиць (до $(20...30)S_0$). Збільшення ширини полиці призводить до втрати стійкості або до хвилястості кромки.

На відміну від традиційного профілювання та стиснутого згину, метод інтенсивного деформування є порівняно новою технологією виробництва гнутих профілів в валках профілезгинальних станів. Цей метод є компромісом між традиційним профілюванням та стиснутим згином [31, 32].

Його відмінність від традиційного профілювання полягає в інтенсифікації схем формоутворення: у використанні меншого числа переходів і більш жорстких режимів підгинання полиць, закритих по всіх переходах калібрів та інколи прикладання невеликих, в порівнянні зі стиснутим згином, торцевих сил до прямолінійних полиць. Метод стиснутого згину призначений для виготовлення гнутих дрібносортових профілів типової конфігурації із важкодеформівних авіаційних сплавів [33–34]. На відміну від стиснутого згину, що направлений на осадження хвилеподібної заготовки при її надлишковій ширині та створює великі сили торцевого підтискання, метод інтенсивного деформування не передбачає формозміни заготовки за рахунок прикладання осаджуваних сил до поверхні заготовки (рис. 1.5).

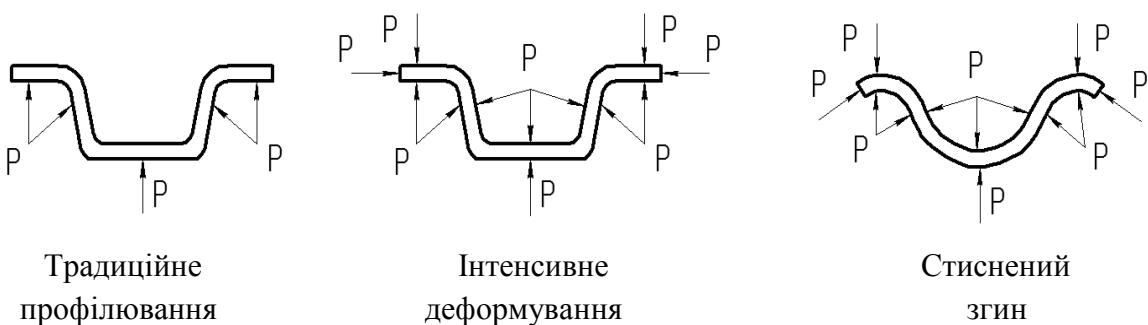


Рисунок 1.5 – Схеми навантаження при різних методах профілювання

При реалізації методу інтенсивного деформування нейтральний шар напружень в зоні згину, як правило, збігається з середньою лінією матеріалу заготовки, в той час як при інших методах він зміщується: при традиційному профілюванні – до внутрішнього контуру, при стишеному згині – до зовнішнього. З цього випливає, що при інтенсивному деформуванні відбувається розвантаження зони згину, що дає можливість досягати менших радіусів згину без руйнування заготовки. Це дозволяє підвищити характеристики жорсткості і міцності профілів, що працюють в конструкціях під навантаженням.

Виготовлення профілів комбінованим методом. Комбінували різні методи з метою підвищення жорсткості профілю за рахунок потовщення в кутовій зоні. Комбінація об'ємного деформування і місцевого нагріву дозволяє отримувати профілі з важкодеформівних матеріалів при швидкості профілювання від 3 до 15 м/хв на станку СПК-300М [35].

Існують також методи виготовлення гнутих заготовок, які недоцільно використовувати з економічної точки зору. Малопродуктивний та дорогий процес одержання подібної продукції, що найбільш широко застосовувався донедавна, зводиться до того, що заготовка в гарячому стані піддається штампуванню на великогабаритних пресах [1]. До недоліків виробництва цим способом можна віднести: окисацію поверхні, появу на ній іржі, що вимагає наступного очищення, появу значних термічних напружень при охолодженні, погіршення екології навколишнього середовища внаслідок значних теплових викидів, збільшення собівартості продукції через значні енергозатрати на підігрів. Ці недоліки обмежують використання гарячого штампування.

У дрібносерійному виробництві застосування складних за конструкцією штампів неекономічне, тому в цих умовах використовують спрощені способи виготовлення деталей: вибуховою хвилею, електрогідравлічне, магнітно-імпульсне штампування, штампування гумою, рідиною чи газом.

Найбільш відомі та широко розповсюджені способи такого штампування описані нижче.

1. При штампуванні гумою (рис. 1.6) лист розміщується на шаблоні, а повзуном преса притискають шар гуми, надаючи заготовці рельєф шаблону.

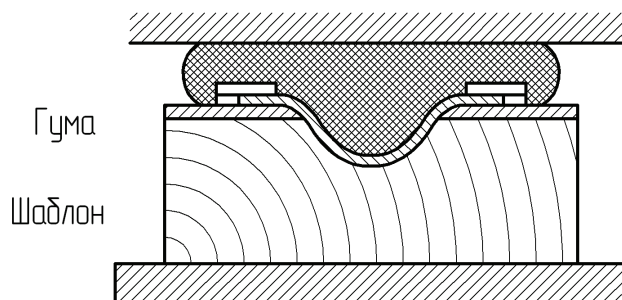


Рисунок 1.6 – Схема штампування гумою

2. При штампуванні рідиною чи газами (рис. 1.7) отримують порожнисті вироби. Принцип роботи зводиться до того, що заготовку поміщають в роз'ємну матрицю і через прийомний канал подають під тиском рідину чи газ.

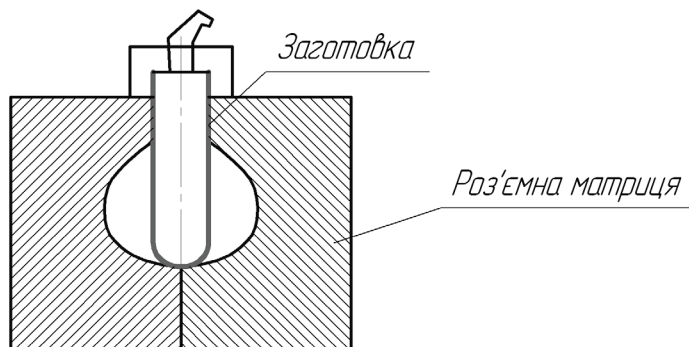


Рисунок 1.7 – Схема штампування рідиною чи газами

3. При штампуванні вибухом (рис. 1.8) на матрицю встановлюють заготовку, яка притискається кільцем до басейна за допомогою гвинтів. Завдяки вибуху відбувається формування заготовки в матриці. Штампування вибухом застосовують при виготовленні деталей великих розмірів із сплавів, які важко деформуються.

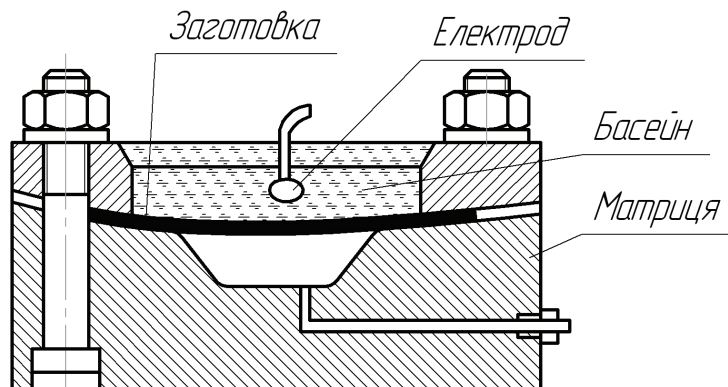


Рисунок 1.8 – Схема штампування вибухом

Електрогідравлічне штампування подібне до штампування вибухом, але ударна хвиля виникає під час електричного розряду в рідині. Електромагнітне (магнітно-імпульсне) штампування ґрунтується на прямому деформуванні металу імпульсними електромагнітними полями.

Основною перевагою цих методів є можливість отримання за один прохід деталей зі значно більшими ступенями деформації, ніж при статичному навантаженні [35, 36], а також невисока вартість операції через спрощення штампового оснащення (немає потреби виготовляти і матрицю, і пуансон та підганяти їх). Основними недоліками, які обмежують більш широке застосування вказаних способів, є низька продуктивність, невисока стійкість оснащення, великі амортизаційні відрахування, висока собівартість обслуговування та спеціальні заходи з безпеки, як і в роботі з іншим високовольтним обладнанням.

Достатньо високі затрати, що виникають внаслідок виготовлення профільованих деталей, потребують детального аналізу причин, що приводять до таких затрат. Проведемо аналіз дефектів профілів та можливих причин їх виникнення.

Дефекти гнутих профілів.

а) Відхилення геометрії в осьовому напрямку:

- прогин у вертикальному напрямку. Причиною утворення є помилка при виборі діаметрів формівних роликів, неправильне розташування осі профілювання у вертикальній площині, відхилення ширини заготовки, неправильне налаштування хорошого пристосування. Цей різновид дефектів спостерігається практично на профілях всіх типорозмірів;

- прогин в горизонтальному напрямку. Дефект з'являється через неправильне розташування осі профілювання в горизонтальній площині, нерівномірний зазор роликів калібру, бокове зміщення заготовки на попередніх проходах, шаблеподібність вихідної заготовки (більше 3 мм/м), помилкову схему формоутворення несиметричного профілю, неправильне налаштування правильного пристосування. Щоб позбутися дефекту слід дотримуватись схем та режимів виробництва симетричних профілів;

- скручування. Відбувається через помилки при виборі схем формоутворення, зміщення осі профілювання, нерівномірності зазору в роликівих калібрах, відхилень параметрів заготовки (шаблеподіб-

ність, різнотовщинність тощо), неправильного налаштування правильного блока, внаслідок незбалансованості деформаційних характеристик полиць, що підгинаються.

б) Дефекти поперечного профілю:

- відсутність точності лінійних розмірів: недоформування по висоті (дефект пов'язаний із заниженою шириною заготовки, нерівномірним зазором роликового калібру); видовжене відбортування; скорочене відбортування. Відхилення по ширині профілю часто відбуваються через зміни кривизни зони згину в процесі деформування. При розвантаженні виникає розширення профілю, навіть при відсутності значних відхилень кутів гнуття.

- відсутність точності лінійних розмірів: пружинення. При стисненому згині пружинення може бути негативним у зв'язку з осадженням заготовки в замкнутому калібрі. При інтенсивному деформуванні пружинення менше, ніж при традиційному профілюванні, однак його необхідно враховувати при розробці схем формоутворення;

- недоформована зона згину: зменшене значення радіуса згину; перевищене значення радіуса згину;

- різна товщина по перерізу. Дефект обумовлений нестабільними умовами профілювання (при гарячому прокатуванні виникає внаслідок великого перепаду температур по довжині розкату, а при холодному – через зміни зазору між валками, зміни сил прокатування) або є наслідком роботи профілювальних валків незадовільної якості.

в) Втрата стійкості елементів профілю:

- лінії Чернова–Людерса – це сліди площин ковзання, що виходять на поверхні деформованої заготовки. Дефекти зменшують точність розмірів виготовлених виробів, а іноді призводять до браку.

- кромкова хвилястість. Дефекти у вигляді чергування гребенів та впадин утворюються внаслідок нерівномірного витягування металу по довжині і ширині смуги чи листа.

- злам полиці. При високій жорсткості полиць, що підгинаються, можуть виникати злами полиць. Злами утворюються при місцевій пластичній деформації внаслідок різких перегинів і є невиправним браком профілю;

- зминання. Найчастіше виникає при контакті заготовки з бортом ролика;

- складки на внутрішній поверхні зони згину. Причиною дрібних складок на внутрішній поверхні є несприятливе поєднання силових факторів, нерівномірний зазор роликового калібру.

г) Дефекти поверхні та руйнування:

- дефекти поверхні: задири; подряпини; порушення шару покриття.

Дефекти поверхні профілю з'являються у вигляді задири, подряпин, руйнування покриття. Причиною цього можуть бути жорсткі схеми формоутворення (великі контактні напруження), незадовільна якість поверхні формівних роликів, велика ширина заготовки при виготовленні профілю в закритих калібрах;

- дефекти, пов'язані з руйнуванням:

- руйнування зовнішнього контуру. Тріщини виникають в місцях згину на зовнішній поверхні. Причини тріщиноутворення: недостатня пластичність металу та дефекти його мікроструктури, малі радіуси згину при профілюванні, наявність глибоких подряпин, що збігаються із зовнішньою поверхнею зони згину;

- затискачі на внутрішньому контурі. Проявляються у вигляді потовщень на внутрішньому контурі при гнутті, виникають в результаті нерівномірної деформації смуги в поперечному напрямку.

д) Шкідлива зміна механічних властивостей:

- нерівномірне деформаційне зміцнення. Дефект пов'язаний зі зміною механічних властивостей матеріалу заготовки і зазвичай супроводжується зниженням пластичності окремих її ділянок. Цей вид дефекту є результатом нерівномірного нагрівання по ширині заготовки, різнотовщинності тощо;

- великозернистість після термообробки. Виникає при нагріванні заготовки вище певних температур і довгій витримці.

Наведений аналіз дозволяє виявити особливості виникнення дефектів гнутих профілів, що виготовляються з листового матеріалу. Враховуючи розглянуті способи виготовлення гнутих заготовок та спектр дефектів, що супроводжує деякі з них, виявлено найбільш ефективний та прогресивний метод виробництва гнутих товстолистових профілів в умовах дрібносерійного виробництва – це гнуття в штампах. Застосування гнутих заготовок із листового та смугового прокату замість заготовок, що отримані безпосередньо прокатуванням дозволяє суттєво знизити вагу виготовлюваних деталей та складальних одиниць машин. По-

перечні перерізи гнутих деталей регламентуються галузевими стандартами та виготовляються гнуттям в спеціалізованих штампах [2, 37].

Виготовлення профілів в штампах є найбільш дослідженим [37–39]. Його відмінною рисою є можливість створення в закритому штампі великих стискальних зусиль, що забезпечують гнуття на малі радіуси і потовщення матеріалу в зонах згину. Створені штампи, в яких гнуття здійснюється при неперервній дії стискальних сил в процесі деформування заготовки, і штампи, в яких плоска заготовка попередньо згинається на великий радіус ($r \gg 5S_0$), а потім, при створенні додаткових стискальних зусиль, здійснюється згин з малим відносним радіусом (рис. 1.9). Можливі варіанти формування профілів за так званою зворотною схемою, в якій на попередніх переходах формують рифт в середній частині широкої заготовки, а в останньому переході осаджують рифт для заповнення кутових зон профілю. Спосіб забезпечує, в залежності від властивостей матеріалу, потовщення по зонах згину до 30 %.

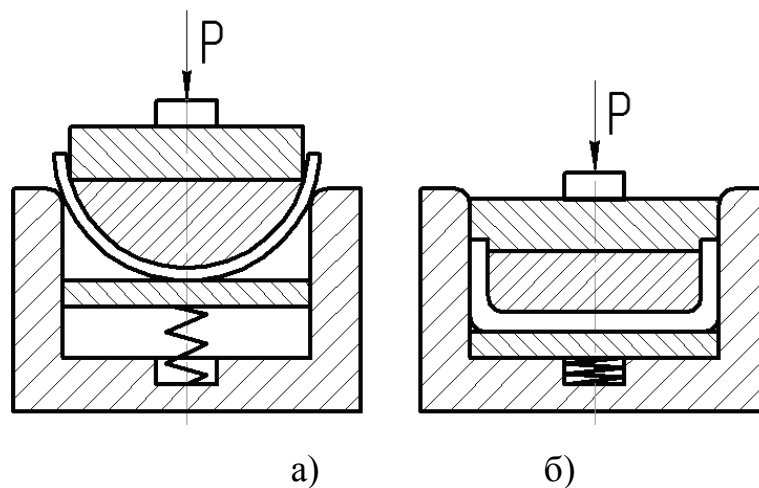


Рисунок 1.9 – Гнуття стискуванням зі згином в штампах: а) – перший перехід (гнуття на великий радіус); б) – кінцеве формоутворення профілю

Щоб уникнути мікротріщин, які виникають на внутрішній поверхні зони згину, запропоновано вести процес в штампі, пуансон та матриця якого складові (рис. 1.9), а вставки пуансона і матриці підпружинені (наприклад, поліуретаном) [40].

Основними перевагами гнуття заготовок в холодному стані є енергозбереження, хороші техніко-економічні показники виробництва, відносно спрощена технологія виробництва та зниження собівартості заготовки.

1.2 Теоретичні та експериментально-теоретичні моделі механіки формоутворення гнутих листових заготовок у штампах

Гнуття є одною з найбільш розповсюджених формоутворювальних операцій холодного штампування, за допомогою якого отримують різні деталі з листового матеріалу. Кількість гнутих виробів постійно збільшується за рахунок удосконалення принципів конструювання та технології виготовлення машин й елементів конструкцій. Так, литі та ковані заготовки витісняються штампозварювальними, що виготовлені з гнутих елементів; профільний прокат з легких профілів замінюють заготовками, отриманими безпосередньо гнуттям зі смуги та стрічки і т. д. [41]

Теоретичний аналіз процесів гнуття розглядається у великій кількості робіт відомих вчених В. І. Давидова [42], І. П. Ренне [43], Р. Хилла [44], Е. А. Попова [45], Г. Я. Гуна [46], Ю. М. Аришенського [47], В. В. Колмогорова [48], М. Є. Докторово і І. С. Тришевського [49, 50], А. Д. Матвеева [51], С. І. Вдовина [52], В. І. Єршова [53], Г. В. Проскурякова [54, 55] та ін. В них досліджено багато питань гнуття: напружено-деформований стан та зміни товщини в зоні згину, різні формування умов пластичності та врахування зміцнення, граничні можливості процесу гнуття.

Дослідження кутової зони при звичайному гнутті розглядається в роботі [43–45], в яких визначено напружено-деформований стан в зонах розтягу та стиску при пластичному та пружно-пластичному згині.

Зміна товщини заготовки в роботі [49] визначається на основі рівності площ зони стиску та зони розтягу. Згин зі спрощеною умовою пластичності був розглянутий в роботі [43], де встановлено, що зміна товщини заготовки не залежить від пластичних властивостей матеріалу, а визначається рівнянням руху. В роботі [49] зміна товщини визначається для випадку гнуття з розтягом, а в роботі [56] – з торцевим стиском.

Існує доволі велика кількість робіт, в яких розглядаються питання врахування зміцнення, анізотропних властивостей матеріалу, питання пружності [42, 46, 47, 49, 53]. Проте, зазвичай, ці результати не пов'язують з особливостями схем формоутворення, характеристиками перерізу заготовки, умовами реалізації процесу гнуття.

В залежності від розмірів, форми та профілю деталі гнуття здійснюється в спеціалізованих штампах, на кривошипних, ексцентричних, фрикційних і гідравлічних пресах; на спеціальних станках для гнуття. Гнуття на малі радіуси деталей малих і середніх розмірів здійснюють, зазвичай, на штампах. Гнуттям без нагрівання заготовок виготовляють з листового матеріалу деталі (заготовки) різних габаритних розмірів товщиною 0,01–100 мм, що мають різноманітні профілі в поздовжньому та поперечному напрямку.

Важливим параметром є внутрішній радіус гнуття (рис 1.10а). Він визначає складові технологічного процесу виготовлення деталі та конструкцію штампів для гнуття. Максимально допустимий радіус, при якому гнуття зберігається, визначається за формулою

$$r_{\max} = \frac{\varepsilon S}{2\sigma_T}.$$

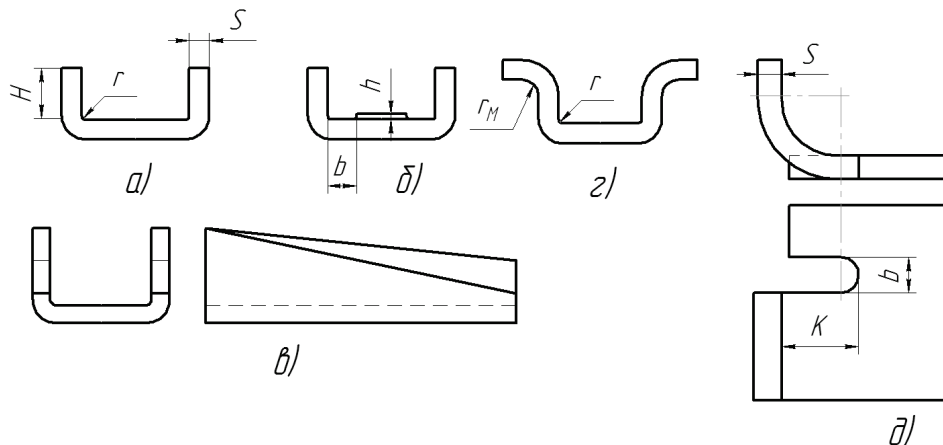


Рисунок 1.10 – Деталі, що піддаються згину

Мінімальний радіус гнуття r встановлюється за гранично допустимими деформаціями крайніх волокон. При переході допустимих норм матеріал деталі переходить в зону руйнування, що виявляється в появі тріщин на поверхні деталі.

Значення мінімально допустимого радіуса може бути розраховане за формулою [41]

$$r = \frac{S}{2} \left(\frac{1}{\delta} - 1 \right),$$

де δ – відносне видовження (у відносних одиницях).

Наведена формула визначення мінімального радіуса гнуття стосується радіуса, що утворює пуансон. Якщо деталь має більш складну форму (рис. 1.10г) і виготовляється в одному штампі, то радіус r_M , що його утворює матриця, повинен бути більшим $3S$. Якщо $r_M < 3S$, тоді в процесі гнуття на бокових полицях деталі можливі вм'ятини та задири. При необхідності малого радіуса на деталі процес гнуття слід виконувати за дві операції: гнуття в матриці з $r_M > 3S$ та осадження до заданого радіуса.

Гнуття в штампах здійснюється одночасною дією на заготовку пуансона та матриці, причому точки прикладання сил P та Q знаходяться на певній відстані одна від одної (рис. 1.11). Сили P та Q утворюють згинальний момент, що є достатнім для виконання формозміни. В процесі гнуття кривизна деформованої ділянки заготовки збільшується, при цьому одночасно відбувається розтяг зовнішніх та стиск внутрішніх шарів. Зі зменшенням радіуса згину пластичною деформацією охоплюється вся товщина заготовки. Форма зони пластичної деформації та її протяжність при $\alpha = 90^\circ$ складають близько однієї четвертої плеча гнуття (рис. 1.11).

Після гнуття форма та розміри поперечного перерізу заготовки в пластичній деформації змінюються. Зміни поперечного перерізу заготовки тим більше, чим менше радіус згину.

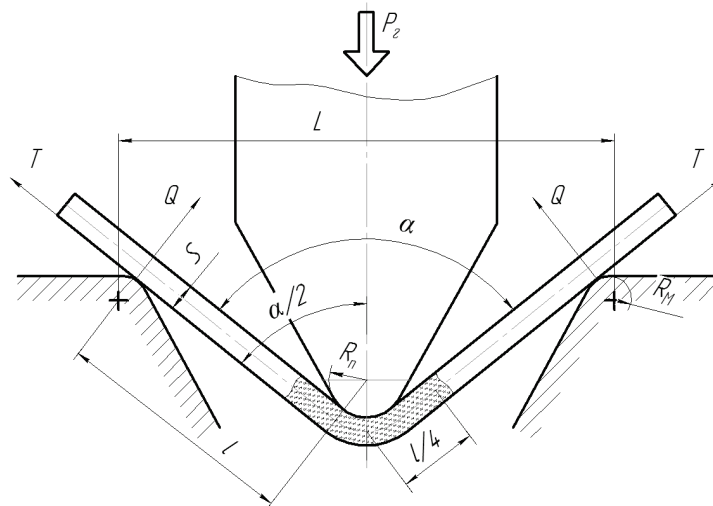


Рисунок 1.11 – Схема дії сил при гнутті в штампі

Величина зовнішнього згинального моменту при гнутті визначається з умови рівноваги його з моментом внутрішніх сил. Останній визначається з моментів нормальних напружень в зоні розтягу та стиску. Для визначення моментів внутрішніх сил необхідно знати розподіл напружень по поперечному розрізі та величину необхідного напруження для цього ступеня деформації [57].

Зусилля гнуття визначається з рівності зовнішнього згинального моменту внутрішніх сил. Згинальні моменти для різних схем гнуття такі:

для однокутового:

$$M = Pl / 4; \quad l = 2(r + S);$$

для двокутового:

$$2M = Pl; \quad l = r + 1,2S.$$

Оптимальним плечем для вільного гнуття є

$$l = (15 \div 20)S,$$

де l – відстань між опорами, мм.

Зусилля, що потрібне для двокутового гнуття, більше від зусилля однокутового гнуття заготовки тих же розмірів. В даному випадку гнуття здійснюється дією двох згинальних моментів, що за інших рівних умов потребує подвійного зусилля.

Але й одностороннє зусилля при двокутовому згині більше від зусилля однокутового (V-подібного) гнуття тому, що при одному і тому ж згинальному моменті плече двокутового гнуття менше. Крім того, до зусилля двокутового гнуття необхідно додати зусилля притискання, що складає 0,25–0,3 зусилля згину. В деяких випадках доцільно застосовувати зусилля притискання більшої величини $(0,5 \div 0,6)D_{\phi}$.

На рис. 1.12 показана схема двокутового гнуття (лівої полиці). На рис. 1.12а показане початкове положення та епюра одностороннього згинального моменту (для точок А, В, С), а на рис. 1.12б – подальша стадія згинання зі схемою сил, що діють на заготовку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березовский С. Ф. Производство гнутых профилей / С. Ф. Березовский, Ф.М. Кропылев. – М. : Metallurgy, 1978. – 152 с.
2. Березовский С. Ф. Эксплуатация и ремонт оборудования профилибочных станков / С. Ф. Березовский. – Челябинск : Metallurgy. Челяб. отделение, 1991. – 175 с.
3. Колганов И. М. Процессы стесненного изгиба при различных методах формообразования / И. М. Колганов. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 108 с.
4. Колганов И. М. Возможности формообразования листовых профилей стесненным изгибом при волочении через роликую фильеру / И. М. Колганов // Авиационная промышленность. – 1984. – № 9. – С. 36–38.
5. Изготовление гнутых листовых профилей повышенной жесткости из труднодеформируемых материалов / И. М. Колганов, Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков [и др]. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 3. – С. 18–21.
6. Колганов И. М. Исследование процесса формообразования профилей стесненным изгибом в роликующих фильерах / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, В. П. Ломакин // Авиационная промышленность. – 1982. – № 7. – С. 36–39.
7. Колганов И. М. Разработка технологии и оборудования для формообразования профилей стесненным изгибом из сплава АБМ–1 / И. М. Колганов, Б. В. Богданов, А. С. Леукин // Состояние и перспективы изготовления и применения листовых профилей в изделиях отрасли : сборник научных трудов – 1992. – №2. – С. 69–80.
8. Проскуряков Г. В. Классификация схем формообразования профилей стесненным изгибом при гибке прокаткой / Г. В. Проскуряков, А. С. Москвин, Э. М. Каримов // Авиационная промышленность. – 1990. – № 6. – С. 9–11.
9. Расширение технологических возможностей формообразования профилей из листовых заготовок / И. М. Колганов, Г. В. Проскуряков, Б. В. Богданов [и др]. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 8. – С. 18–20.
10. Проскуряков Г. В. Классификация схем формообразования профилей стесненным изгибом при гибке прокаткой / Г. В. Проскуря-

ков, А. С. Москвин, Э. М. Каримов // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 6. – С. 9–11.

11. Богоявленский К. Н. Разработка методики расчета основных параметров процесса изготовления гнутых профилей / К. Н. Богоявленский, И. П. Манжурич, В. В. Рис ; под ред. К. Н. Богоявленского // *Изготовление деталей пластическим деформированием*. – Л. : Машиностроение. – 1975. – № 2. – С. 383–396.

12. Тришевский И. С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / под ред. И. С. Тришевского. – К. : Техника, 1980. – 535 с.

13. Скоков Ф. И. Разработка и освоение технологии производства уголкового профиля с отбортовками / Ф. И. Скоков, С. В. Колоколов, М. Е. Докторов, В. В. Клепанда // *Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката* – Х. : УкрНИИмет. – 1970. – № 15. – С. 277–283.

14. А. с. 1136866. СССР, Мкл В21D5/06. Способ изготовления неравнополочных гнутых профилей проката / И. С. Тришевский, А. П. Антипенко, В. И. Мирошниченко, Э. С. Дахновский и др. – № 3624898/25-27 ; заявл. 21.07.1983 ; Бюл. № 4, 1985.

15. А. с. 2201829. РФ, Мкл В21D5/06. Способ изготовления корытного профиля / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – № 2001103683/02 ; заявл. 07.02.2001 ; Бюл. № 37, 2001.

16. А. с. 2006315. РФ, Мкл В21D5/06. Способ изготовления гнутого корытного профиля / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Ф. Рашников, В. В. Пахарев. – № 5031815/27 ; заявл. 12.03.1992 ; Бюл. № 10, 2003.

17. А. с. 778863 СССР, Мкл В21D5/06. Способ изготовления гнутых несимметричных профилей / С. Ф. Березовский. – № 2692817/25-27 ; заявл. 07.12.1978 ; Бюл. № 42, 1980.

18. А. с. 309761 СССР, Мкл В21D5/06. Способ изготовления гнутых профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко, В. В. Клепанда, С. В. Зеленский, В. Б. Калужский, Я. В. Хижинков. – № 1203356/25-27 ; заявл. 01.01.1971 ; Бюл. № 23, 1971.

19. А. с. 360130 СССР, Мкл В21D5/08. Способ производства гнутых профилей с отбортовками / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, В. М. Щеглов, В. В. Клепанда, В. Д. Гуренко, И. С. Гринь. – № 1460073/25-27 ; заявл. 01.01.1972 ; Бюл. № 36, 1973.

20. А. с. 1669613 РФ, Мкл В21D5/06. Способ производства гнутых профилей / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, А. А. Ушаков, В. В. Пахарев. – № 4694242/27 ; заявл. 22.05.1989 ; Бюл. № 30, 1991.

21. А. с. 1780896 РФ, Мкл В21D5/06. Способ производства гнутых корытных профилей / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. К. Визгалов, А. А. Ушаков. – № 4943566/27 ; заявл. 07.06.1991 ; Бюл. № 46, 1992.

22. А. с. 1637901 РФ, Мкл В21D5/06. Способ производства корытного профиля / В. И. Гридневский, А. А. Ушаков, В. Г. Антипанов, В. К. Визгалов, Н. Т. Пахомов. – № 4605648 /27 ; заявл. 15.11.1988 ; Бюл. № 12, 1991.

23. Чекмарев А. П. Гнутые профили проката / А. П. Чекмарев, В. Б. Калужский // *Металлургия*. – 1974. – № 1. – С. 104–110.

24. А. с. 2040998 РФ, Мкл В21D5/06. Способ изготовления несимметричного гнутого профиля корытного типа / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Ф. Афанасьев, В. В. Пахарев. – № 92000901/08 ; заявл. 15.10.1992 ; Бюл. № 15, 2002.

25. А. с. 2056189 РФ, Мкл В21D5/06. Способ производства гнутых корытных профилей / В. Г. Антипанов, В. И. Гридневский, В. Ф. Афанасьев, А. С. Бельшев. – № 94027534/08 ; заявл. 20.07.1994 ; Бюл. № 17, 2000.

26. А. с. 2063282 РФ, Мкл В21D5/06. Способ производства гнутого корытного профиля / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Ф. Афанасьев. – № 94027553/02 ; заявл. 20.07.1994 ; Бюл. № 15, 2002.

27. А. с. 863064 СССР, Мкл В21D5/06. Способ изготовления гнутых профилей / И. С. Тришевский, Э. С. Дахновский, В. И. Мирошниченко, А. П. Антипенко, В. И. Анисимов, В. И. Гридневский, В. Г. Матко – № 2813288/25-27 ; заявл. 27.08.1979 ; Бюл. №3 4, 1987.

28. А. с. 2006315 РФ. Мкл В21D5/06. Способ изготовления гнутого корытного профиля / В. И. Гридневский, В. Г. Антипанов, В. Ф. Рашников, В. В. Пахарев. – № 5031815/27 ; заявл. 12.03.1992 ; Бюл. № 34, 1994.

29. Широкобоков В. В. Разработка программного обеспечения для расчета и анализа коэффициента использования металла / В. В. Широкобоков, В. И. Дубина, Р. Ю. Говтвян // *Обработка материалов давлением : Сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 142–147.

30. Энергетика рабочего хода кривошипного прессы на разделительных листоштамповочных операциях / М. Р. Рей, Т. С. Сушкова, И. И. Матусевич [та ін.] // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля. – 2011. – С. 246–254.

31. Филимонов С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 444 с.

32. Тришевский И. С. Теоретические основы профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Metallurgiya, 1980. – 287 с.

33. Изготовление гнутых листовых профилей повышенной жесткости из труднодеформируемых материалов / И. М. Колганов, Ф. З. Абдулин, Г. В. Проскуряков [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 3. – С. 18–21.

34. Куприн П. Н. Влияние на качество гнутых профилей схем формообразования и условий профилирования / П. Н. Куприн, И. М. Колганов, Р. Р. Ахмедзянов // Перспективные методы и средства обеспечения качества летательных аппаратов : Сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ. – 2000. – № 3 – С. 45–52.

35. Пихтовников Р. В. Штамповка листового металла взрывом / Р. В. Пихтовников, В. И. Завьялова. – М. : Машиностроение, 1964. – 175 с.

36. Шамарін О. Ю. Електрогідравлічне штампування листових заготовок з титанових сплавів : – дисертація канд. техн. наук : 05.03.05 / Шамарін О. Ю. – Вінниця, 2002. – 186 с.

37. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение. 1979. – 520 с.

38. Унксов Е. П. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.

39. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.

40. Производство и применение гнутых профилей проката : справочник / под ред. И. С. Тришевского. – М. : Metallurgiya, 1975. – 576 с.

41. Малов А. Н. Технология холодной штамповки / А. Н. Малов. – М. : Машиностроение, 1969. – 568 с.

42. Давыдов В. И. Производство гнутых тонкостенных профилей / В. И. Давыдов, М. П. Максаков. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 240 с.
43. Ренне И. П. Пластический изгиб листовой заготовки / И. П. Ренне // Труды Тульского механического ин-та. – 1950. – № 4. – С. 146–162.
44. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М. : ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
45. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
46. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Metallurgiya, 1980. – 456 с.
47. Арышенский Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М. : Metallurgiya, 1990. – 304 с.
48. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgiya, 1986. – 688 с.
49. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Metallurgiya, 1980. – 288 с.
50. Тришевский И. С. Холодногнутые гофрированные профили проката / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда, Я. В. Хижняков. – Киев : Техника, 1973. – 272 с.
51. Матвеев А. Д. Ковка и штамповка : справочник в 4 т. – Т.4. Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева. – М. : Машиностроение, 1987. – 544 с.
52. Вдовин С. И. Прогрессивные технологические процессы гибки листовых заготовок / С. И. Вдовин, Д. В. Голенков, В. А. Жердов, С. В. Семин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – № 1. – С. 19–21.
53. Ершов В. И. Изготовление уголковых профилей гибкой с осадкой листовых заготовок / В. И. Ершов, В. Д. Гаврилин, Ю. Р. Медведев // Авиационная промышленность. – 1993. – № 6. – С. 39–41.
54. Проскураков Г. В. Исследование и разработка способа изменения кривизны профиля при стесненном изгибе / Г. В. Проскураков, Е. Н. Чебурахин, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 9–13.

55. Опыт промышленного изготовления листовых профилей и деталей из них / Г. В. Проскураков, А. В. Нуждов, В. И. Филимонов [и др.] // *Авиационная промышленность*. – 1990. – № 1. – С. 3–4.
56. Проскураков Г. В. Стесненный изгиб / Г. В. Проскураков // *Авиационная промышленность*. – 1966. – № 2. – С. 9–13.
57. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
58. Долгов В. А. Расчет усилий штамповки при двухугловой гибке / В. А. Долгов, В. П. Романовский, И. А. Мовшович // *Вестник машиностроения*. – 1972. – № 3. – С. 20–28.
59. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин – М. : Metallurgizdat, 1947. – 342 с.
60. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.
61. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров – М. : Metallurgiya, 1970. – 229 с.
62. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
63. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 1975. – № 9. – С. 135–137.
64. Сивак И. О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. – Краматорськ–Слов'янськ : ДДМА. – 2000. – № 2 – С. 168–171.
65. Ильюшин А. А. Об одной теории длительной прочности / А. А. Ильюшин // *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. – 1967. – № 4. – С. 21–35.
66. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // *Физика и техника высоких давлений*. – 1983. – № 11. – С. 28–32.
67. Михалевич В. М. Модели накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией / В. М. Михалевич // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1993. – № 5. – С. 144–151.
68. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. – 195 с.

69. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е. П. Унксова – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
70. Фрейденталь А. Математические теории неупругой сплошной среды / А. Фрейденталь, Х. Гейрингер. – М. : ГИФМЛ, 1962. – 432 с.
71. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление металлов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
72. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – М. : Издательство МГУ, 1990. – 310 с.
73. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике / К. Ректорис. – М. : Мир, 1985. – 590 с.
74. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 542 с.
75. Галлагер Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
76. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 510 с.
77. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 360 с.
78. Розенберг А. М. Прочность твердосплавных рабочих элементов деформирующих протяжек / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – К. : Техника, 1971. – 123 с.
79. Дель Г. Д. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.
80. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
81. Огородников В. А. Деформируемость металла при обработке давлением / В. А. Огородников // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 3. – С. 74–78.
82. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.
83. Ренне И. П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом делительных сеток в процессах обработки металлов давлением / И. П. Ренне. – Тула : ТПИ, 1979. – 96 с.

84. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / П. Бриджмен. – М. : Издательство иностранной литературы, 1955. – 444 с.

85. Фридман Я. В. Изучение пластической деформации и разрушения методом накатанных сеток / Я. В. Фридман, Т. К. Зилова, И. И. Деинна. – М. : Машиностроение, 1962. – 450 с.

86. Розенберг А. М. Твёрдость и напряжение в пластически деформируемом теле / А. М. Розенберг, Л. А. Хворостухин // Журнал технической физики. – 1955. – № 2 – С. 14–22.

87. Грушко О. В. Технологічний паспорт матеріалу для процесів поверхневого зміцнення заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Вісник НТУ «ХПІ» тематична редакція : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ „ХПІ” – 2010. – № 42. – С. 113–118.

88. Щеглов Б. А. Испытание толстолистовых металлов на штампуемость / Б. А. Щеглов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – № 4. – С. 38–44.

89. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М. : Изд. АН СССР, 1963. – 375 с.

90. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.

91. Матвийчук В. А. Способы испытания металлов на пластичность / В. А. Матвийчук // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2008 – № 6, – Ч. 2. – С. 156–161.

92. Унков Е. П. Инженерная теория пластичности / Е. П. Унков. – М. : Машгиз, 1959. – 328 с.

93. Матвийчук В.А. О повышении пластичности металлов в случаях появления шейки при растяжении / В. А. Матвийчук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 9. – С. 18–22.

94. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М. : Гостехтеоретиздат, 1956. – 583 с.

95. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Б. Меллор. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.

96. Семенов Е. И. Ковка и штамповка : справочник в 4 т. / Ред. совет : Е. И. Семенов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1986. – Т.1. – 568 с.

97. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1980. – 155 с.
98. Третьяков А. В. Механические свойства сталей при пластическом деформировании : справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянов. // – М. : Машиностроение, 1971. – 268 с.
99. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении : учеб. пособие / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
100. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением : монография / В. А. Огородников. – К. : Вышшая шк., 1983. – 175 с.
101. Красневский С. М. Разрушение металлов при пластическом деформировании / С. М. Красневский, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. – Минск : Наука и техника, 1983. – 175 с.
102. Огородников В. А. Прогнозирование технологического наследия в современных технологиях обработки давлением / В. А. Огородников, А. В. Грушко, Н. В. Бабак // Проблемы создания новых машин и технологий : науч. труды Кременчугского политехнического университета. – 2001. – 1(10). – С. 370–375.
103. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ» "Машинобудування". – 2012. – № 64. – С. 220–226.
104. Calibration and evaluation of seven fracture models / T. Wierzbicki, Y. Bao, Y. W. Lee, Y. Bai // International Journal of mechanical Sciences. – 2005. – № 47 – P. 719–743.
105. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : Универсум–Винница, 2005. –
106. Белов М. И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД / М. И. Белов // Пластическая деформация сталей и сплавов. – 1996. – № 4 – С. 224–227.
107. Филимонов В. И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 209 с.
108. Илюшкин М. В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндричес-

кой заготовки) : учебно-методическое пособие / М. В. Илюшкин – Ульяновск : УлГУ, 2012 – 91 с.

109. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с.

110. Рогов В. А. Методика и практика технических экспериментов : учебное пособие для вузов / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М. : Академия, 2005. – 283 с.

111. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов по спец. «Машины и технология обраб. металлов давлением» / В. А. Евстратов–Харьков : Вища школа Изд-во при Харьк. ун-те 1981. – 248 с.

112. Грушко О. В. Моделивання зміцнення матеріалу в процесі штампування z-подібних заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Обробка матеріалів тиском : зб. наук. праць. – Краматорськ – 2012. – № 1 (30). – С. 31–37.

113. The role of hydrostatic pressure in severe plastic deformation / M. J. Zehetbauer, H. P. Stüwe, A. Vorhauer, E. Schaffer and J. Kohout. // ADVENGMAT. – 2004. – Vol. 5. – № 5. – P. 330–336.

114. Грушко О. В. Особливості товстолистого штампування за схемою згину та зсуву / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Машинобудування – 2011. – № 62. – С. 193–197.

115. Пат. 74746 Україна, МПК (2006.01) B21D 11/20. Спосіб гнуття заготовки / В. В. Кухар, О. В. Грушко, Т. І. Молодецька, Б. С. Каргін, С. Б. Каргін, Є. А. Мкртчян, О. М. Кононов, В. А. Бурко : заявник та власник патенту Приазовський державний технічний університет. – № u201204820 ; заявл. 17.04.12 ; опубл. 12.11.12, – Бюл. № 21. – 4 с.

116. А. с. 1526870. СССР, Мкл B21D5/01. Способ получения П-образных изделий / М. О. Золотов, А. К. Пермяков, В. В. Игошин, А. Г. Мисаилов, М. И. Бородаев. – № 4218762 ; заявл. 01.04.1987 ; Бюл. № 45, 1989.

117. А. с. 394131. СССР, Мкл B21D11/20. Способ гибки листовых заготовок / В. П. Буш, Г. Ю. Девонисский Рижский завод Автоэлектроприбор. – № 1471523/25-27 ; заявл. 28.08.1970 ; Бюл. № 34, 1973.

118. Зубцов М. Е. Листовая штамповка : учебник для студентов вузов / М. Е. Зубцов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1980. – 432 с.

119. Пат. 37339 Україна, МПК В21D13/00. Пристрій для виготовлення гофрованої стрічки / В. В. Савуляк, В. І. Савуляк, Т. І. Молодецька, заявник та власник патенту Вінницький національний технічний університет – № U20807655 ; заявл. 04.06.2008 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. – 4 с.

120. Пат. 39596 Україна, МПК В21D13/00. Пристрій для виготовлення гнутих профілів / В. В. Савуляк, В. І. Савуляк, Т. І. Молодецька, заявник та власник патенту Вінницький національний технічний університет – № U20808675 ; заявл. 09.09.2008 ; опубл. 25.02.2009, Бюл. № 24. – 4 с.

121. Ильин Л. Н. Технология листовой штамповки / Л. Н. Ильин, И. Е. Семенов. – М. : Дрофа, 2009. – 475 с.

122. Краткий справочник металлиста / Под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1987. – 960 с.

123. Зубцов М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – М. – Л. : Машгиз, 1958. – 459 с.

124. Грушко О. В. Механіка формозмінювання круто зігнутих колін новим методом холодного пластичного деформування як основа оцінки якості деталей : дисертація канд. техн. наук : 05.03.05 / О. В. Грушко – Вінниця, 2000. – 193 с.

125. Савуляк В. В. Виготовлення з малопластичних тонколистових матеріалів гофрованих заготовок з малими радіусами кривизни поверхонь способами холодного пластичного формоутворення : дисертація канд. техн. наук : 05.03.05 / Савуляк В. В. – Вінниця, 2006. – 176 с.

126. Мищенко О. В. Производство гнутых профилей с отбортовками в роликах методом интенсивного деформирования / О. В. Мищенко, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 122 с.

127. Tetsu to hagane / K. Nakajima // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 1995. – V. 81. – № 4. – P. 72–75.

128. Сивак И. О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ–Слов'янськ: ДДМА. –2000. – с. 168–171.

129. Савуляк В. І. Зносостійкість бурякорізальних ножів у цукровому виробництві / В. І. Савуляк, В. В. Савуляк, Т. І. Молодецька // Збірник наукових праць ВДАУ. Серія технічні науки. – 2010. – Вип. 4. – С. 37–42.

130. Грушко О. В. Визначення силових характеристик процесів обробки тиском методом еквівалентної оцінки / О. В. Грушко, В. В. Кухарь, Т. І. Молодецька // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : збірник наукових праць. – Луганськ, 2012. – № 31. – С. 218–226.

131. Деформированное состояние в условиях поперечного изгиба толстолистовой широкой заготовки / А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, Р. С. Ткаченко, А. В. Гуцалюк // Вісник національного технічного університету «ХП». Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – № 46(952). – С. 204–212.

132. Артюх Г. В. Адаптація технології гнуття товстолистової заготовки з важкодеформівного матеріалу до параметрів пресового устаткування / Г. В. Артюх, В. В. Кухар, О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Захист металургійних машин від поломок : збірник наукових праць. – Маріуполь, 2012. – Випуск 14. – С. 110–116.

133. Грушко О. В. Моделювання зміцнення матеріалу в процесі штампування z-подібних заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автоматичних експертиз : Міжнародна науково-технічна конференція, 30–31 трав. 2011 р. : тези доп. – Вінниця, 2011. – С. 133–135.

134. Грушко О. В. Математична модель зміцнення матеріалу в процесі штампування товстолистових заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Інноваційні ресурсозбереженні матеріали та зміцнювальні технології : Міжнародна науково-практична конференція, 06–08 черв. 2012 р. : тези доп. – Маріуполь, 2012. – С. 133–135.

135. Savulyak V. I. The wearproofness of beeting knives in saccharine production / V. I. Savulyak, T. I. Molodetska, V. V. Savulyak // Materials of the international Conference “Tehnomus XV”. – Romaniya : Suceava, 2009. – P. 417–422.

Наукове видання

**Грушко Олександр Володимирович
Молодецька Тетяна Ігорівна**

**ХОЛОДНЕ ГНУТТЯ
ТОВСТОЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК
З МАЛОПЛАСТИЧНИХ МЕТАЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено Т. Молодецькою

Підписано до друку 14.11.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,32.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2014-56.

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.