

**С. Г. Ясько, Є. А. Фролов,
В. В. Кухар, О. В. Грушко, І. В. Віштак**

**ТОЧНІСТЬ
ТОНКОЛИСТОВИХ ВИРОБІВ
ПРИ ПНЕВМОУДАРНОМУ
ШТАМПУВАННІ РУХОМИМИ
СЕРЕДОВИЩАМИ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**ТОЧНІСТЬ ТОНКОЛИСТОВИХ ВИРОБІВ
ПРИ ПНЕВМОУДАРНОМУ ШТАМПУВАННІ
РУХОМИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК [621.98.044+621.983.044]::621.7.015

T64

Автори:

С. Г. Ясько, Є. А. Фролов, В. В. Кухар, О. В. Грушко, І. В. Віштак

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 1 від 2 вересня 2022 р.)

Рецензенти:

Л. Г. Козлов, доктор технічних наук, професор

О. О. Шаповал, доктор технічних наук, доцент

Точність тонколистових виробів при пневмоударному T64 штампуванні рухомим середовищами : монографія / С. Г. Ясько, Є. А. Фролов, В. В. Кухар [та ін.] Вінниця : ВНТУ, 2022. 208 с. ISBN 978-966-641-899-2

Розглянуто комплексний підхід до забезпечення точності виконання розділових і формоутворюючих операцій шляхом визначення раціональних конструкторсько-технологічних параметрів процесів пневмоударного штампування в умовах багатонаменклатурного виробництва при дискретно-нестабільних програмах випуску. Подано перелік та закономірності впливу основних конструктивно-технологічних параметрів оснащення на показники форми, розмірної точності та шорсткості виробів. Наведено науково-методологічні підходи до визначення граничного ступеня витягування, закономірностей взаємодії між передавальним рідким або еластичним середовищем, тонколистовою заготовкою та робочими елементами оснащення при пневмоударному штампуванні.

УДК [621.98.044+621.983.044]::621.7.015

ISBN 978-966-641-899-2

© С. Ясько, Є. Фролов, В. Кухар,
О. Грушко, І. Віштак, 2022

ВСТУП	5
Розділ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ	
ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1. Основні відхилення розмірів листоштампованих деталей та заготовок	11
1.2. Поняття про параметри точності	16
1.3. Аналіз виробничих похибок	18
1.4. Аналіз факторів, що впливають на параметри точності	21
1.5. Обґрунтування методів досліджень	32
1.6. Встановлення мети і завдань дослідження	36
1.7. Висновки за розділом:	37
Розділ 2 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ	
ПНЕВМОУДАРНОГО ШТАМПУВАННЯ	
ТОНКОЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ	
2.1. Особливості технологічної системи при використанні процесів пневмоударного штампування рідиною та еластичним середовищем	39
2.2. Обладнання ПУШ і основні технологічні схеми виконання операцій	42
2.3. Критерії ефективності пробивання-вирубання еластичним середовищем	47
2.4. Критерії ефективності процесу пневмоударного витягування рідиною	61
2.5. Висновки за розділом	66
Розділ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
ПАРАМЕТРІВ РОЗМІРНОЇ ТОЧНОСТІ ВИРОБІВ ПРИ	
ВИКОНАННІ РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ	
ПНЕВМОУДАРНИМ ШТАМПУВАННЯМ	
3.1. Технологічні особливості пневмоударного вирубання- пробивання плоских деталей еластичним середовищем	68

3.2. Аналіз причин виникнення похибок при пневмоударному штампуванні деталей еластичними середовищами та їх класифікація, точність штампування розділювальних операцій.....	70
3.3. Дослідження закону розподілу похибок розмірів відштампованих деталей	97
3.4. Висновки за розділом.....	117
Розділ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗМІРНОЇ ТОЧНОСТІ ВИРОБІВ ПРИ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ВИТЯГУВАННЯ ПНЕВМОУДАРНИМ ШТАМПУВАННЯМ.....	120
4.1. Вплив основних конструктивно-технологічних чинників на якість штампування деталей витягуванням.....	121
4.2. Вплив основних технологічних факторів на перебіг процесів пневмоударного витягування.....	130
4.3. Аналітичне дослідження параметрів точності операцій витягування ПУШ	149
4.4. Висновки за розділом.....	162
Розділ 5 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ВИРОБІВ ПРИ ПНЕВМОУДАРНОМУ ШТАМПУВАННІ РІДИНОЮ ТА ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ.....	164
5.1. Технологічне оснащення для ПУШ рідиною	164
5.2. Основні вимоги при проектуванні елементів оснащення	167
5.3. Технологічне оснащення для вирубування-пробивання ПУШ еластичним середовищем	172
5.4. Оцінювання економічної доцільності застосування пневмоударного штампування.....	182
5.5. Висновки за розділом.....	188
ВИСНОВКИ.....	189
Список використаних джерел	192

ВСТУП

Розумні методи господарювання вимагають впровадження висококоєфективних процесів виробництва металопродукції, заснованих на інноваційних наукомістких технологіях, доцільних при сучасних умовах дрібносерійного і серійного виробництва, при дискретно-нестабільних програмах випуску виробів і частих змінах номенклатури.

Для зниження собівартості та збереження якості тонколистових деталей широко використовують процеси високошвидкісного (імпульсного) штампування. Однак, їх впровадження обмежене специфічними особливостями використовуваних енергоносіїв (бризантні вибухові речовини, порох, горючі газові суміші, електричний розряд): високими змінними витратами в собівартості продукції, специфікою обладнання, труднощами в забезпеченні безпеки життєдіяльності та екологічності, а також автоматизації виробництва. До процесів і устаткування з виробництва тонколистових деталей також ставиться низка вимог, комплексне виконання яких є вельми утрудненим. Це універсальність та можливість прискореного переналагодження штампів і перебудова технологічного процесу під час переходу з однієї номенклатури на іншу, адаптивність і здатність пристосовуватися до технологічних відхилень, автономність керування та здатність функціонування в умовах автоматизованих технологій.

Зазначеним вимогам найбільш повно відповідають процеси високошвидкісного формоутворення на основі технологій і устаткування пневмоударного штампування (ПУШ) рідиною та/або еластичним середовищем з високим рівнем автоматизації. Такі процеси характеризуються значною концентрацією енергії, високими швидкостями деформування матеріалу і тиску в зоні обробки, що позитивно позначається на показниках якості виробів. Це призводить до зниження трудомісткості, скорочення кількості технологічних переходів і, як наслідок, витрат і термінів технологічної підготовки виробництва нових виробів. В якості енергоносія використовується стиснене повітря цехової пневмомережі тиском до 0,63 МПа. В

якості штампувальної рідини використовують звичайні емульсії змазувально-охолоджувальних рідин, а в якості еластичного середовища – поліуретан марки СКУ-ПФЛ-100, НИЦ-ПУ-5 тощо. Однак, практичній реалізації техніко-економічних переваг і позитивних особливостей ПУШ перешкоджає відсутність у спеціальній вітчизняній і світовій літературі достатньою мірою науково обґрунтованих принципів проектування технологічних процесів і практичних рекомендацій щодо здатності забезпечення необхідної якості відштампованих тонколистових деталей складної форми і конфігурації в плані, що отримують витягуванням і вирубанням-пробиванням.

Дана робота комплексно розглядає питання забезпечення належних показників якості при виконанні розділових і формоутворюючих операцій ПУШ шляхом визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів устаткування та закономірностей формування розмірної точності та шорсткості тонколистових деталей в умовах їх багатонаменклатурного виробництва при дискретно-нестабільних програмах випуску. У зв'язку з вищевикладеним темою роботи, присвячена вдосконаленню процесів ПУШ шляхом забезпечення виготовлення тонколистових деталей із заданими параметрами розмірної точності та шорсткості поверхонь, є актуальною і має важливе практичне значення.

Метою роботи є забезпечення розмірної точності та шорсткості поверхонь тонколистових деталей, що виготовляють ПУШ рідиною або еластичним середовищем при виконанні розділових і витягувальних операцій на основі результатів експериментальних досліджень та функціональних залежностей, що описують вплив енергосилових і конструктивно-технологічних параметрів процесів і обладнання на показники якості відштампованих деталей.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

- дослідити умови експлуатації пневмоударного обладнання для штампування рідким та еластичним середовищем і встановити вимоги до визначення конструктивно-технологічних параметрів, що забезпечують розмірну точність та шорсткість деталей, що штампують;

- удосконалити технологічну систему ПУШ шляхом доповнення

її елементами нової конструкції оснащення, які забезпечують необхідні показники якості відштампованих деталей, та розширюють технологічні можливості в умовах багатонаменклатурного виробництва;

- встановити основні фактори та характер їх впливу на перебіг процесу ПУШ для технологічних операцій пробивання-вирубубання і витягування;

- встановити основні причини виникнення відхилень розмірів деталей, що отримують ПУШ, та провести на основі статистичного аналізу їх класифікацію для операцій пробивання-вирубубання і витягування;

- дослідити вплив основних конструктивно-технологічних факторів на характеристики точності деталей, що отримані методом ПУШ для операцій витягування та пробивання-вирубубання;

- отримати аналітичні залежності для розрахунку очікуваної величини систематичної складової відхилення розмірів виробів відносно дійсного розміру робочого елемента штампового оснащення, що дозволить розрахувати скомпенсоване значення номінального розміру робочого елемента для забезпечення показників точності виробів при виконанні операцій витягування та пробивання-вирубубання;

- проаналізувати техніко-економічні показники і розробити за результатами дослідження рекомендації з проектування технологічних процесів і оснащення для пробивання-вирубубання та витягування;

- впровадити результати дослідження в умовах діючого виробництва.

Об'єкт дослідження – процеси пневмоударного штампування з використанням рухомих рідких та еластичних передавальних середовищ.

Предмет дослідження – характеристики геометричної форми, точності та шорсткості поверхонь виробів, що отримують при розділових і витягувальних операціях пневмоударним штампуванням, закономірності їх якісної та кількісної зміни в залежності від матеріалу та конструктивно-технологічних параметрів елементів оснащення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Уточнено для деталей складного профілю з габаритними розмірами до 300 мм і товщиною листового матеріалу 0,5 – 3,0 мм, що отримують ПУШ, перелік та закономірності впливу основних конструктивно-технологічних параметрів оснащення на показники форми, розмірної точності та шорсткості для розділових операцій пробивання-вирубання еластичним середовищем у технологічних схемах з послідовним відокремленням припуску та операцій витягування рідким середовищем при двоударному навантаженні.

2. Вперше встановлені закономірні зв'язки між математичним очікуванням відхилення лінійних розмірів деталей і дійсним розміром робочого елемента штампного оснащення з урахуванням впливу домінуючих конструктивно-технологічних параметрів процесів пневмоударного штампування для операцій вирубування-пробивання еластичним середовищем із послідовним відокремленням припуску та витягування рідким середовищем при двоударному навантаженні;

3. Вперше встановлені граничні ступені витягування при пневмоударному послідовному подвійному навантаженні для листових матеріалів товщиною 0,5 – 3,0 мм з алюмінієвих, мідних, титанових сплавів та електротехнічних і конструкційних сталей, а також їх вплив на показники якості виробів в залежності від форми, конструкції та відносної маси бойка;

4. Вдосконалені науково-методологічні підходи до визначення закономірностей взаємодії між передавальним рідким або еластичним середовищем, тонколистовою заготовкою та робочими елементами оснащення при ПУШ, що дозволило підвищити ефективність процесів вирубування-пробивання та витягування та збільшити номенклатуру виробів, яку можна виготовити ПУШ.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному: розроблені технологічні схеми процесів і оснащення для ПУШ витягуванням рідким середовищем та вирубування-пробивання еластичним середовищем, які дозволяють виготовляти тонколистові деталі, включно і складної форми із заданими параметрами точності та якості поверхні в умовах багатомініклатурного виробництва при дискретно-нестабільних програмах випуску виробів; в результаті теоретичних і експериментальних досліджень з встановлення

параметрів точності ПУШ тонколистових деталей, були розроблені методичні та практичні рекомендації по вдосконаленню пневмоударного обладнання та проектування технологічних процесів і оснащення для штампування витягуванням, вирубанням-пробиванням, яке не поступається точністю штампуванню в інструментальних штампах, а в ряді випадків і перевершують їх; Визначена область ефективного застосування запропонованих технологічних і технічних рішень, а також визначена техніко-економічна ефективність застосування ПУШ в багатонаменклатурному виробництві.

Розділ 1

СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Штампувальні способи в більшості випадків забезпечують досягнення необхідних показників якості деталей (точності лінійних розмірів і взаємного розташування поверхонь, шорсткості поверхні), високу продуктивність і низьку собівартість (часто вартість праці становить близько 5 % і менше від загальної собівартості деталі).

Якість штампованих деталей визначають: точність розмірів, взаємне розташування і шорсткість поверхонь, однорідність властивостей матеріалу та інші параметри. Всі вони залежать від обраного технологічного маршруту, схеми окремих процесів штампування, якості виготовлення інструменту і вибраного обладнання.

Поєднання окремих процесів штампування визначає технологічний маршрут, а вірно обраний маршрут забезпечує досягнення високої якості виробу.

Якість виробу формується в окремих процесах штампування, його напружено-деформованим станом. Напружено-деформований стан і наступне після зняття деформуючого зусилля розвантаження визначають відхилення розмірів і форми виробу.

Якість поверхні виробу залежить переважно від способу її отримання, якості поверхні заготовки, інструменту та інших факторів.

Питання точності виготовлення деталей і заготовок листовим штампуванням у вітчизняній і закордонній літературі досліджені недостатньо. Хоча холодне листове штампування, як один з найбільш прогресивних способів отримання листових деталей, існує багато десятиліть, інтерес до її можливостей з забезпечення параметрів точності почав проявлятися тільки в останні 30 років.

Такий стан можна пояснити тим, що до недавнього часу такі широко поширені операції листового штампування як вирубання, пробивання, згинання і витягування застосовувалися головним чином для отримання не відповідальних деталей з листа в межах 12...14 класів точності. На величину шорсткості і точності поверхні розділення особливої уваги не зверталось, а в тих виняткових випадках, коли це було потрібно – застосовувались додаткові операції

– калібрування, зачищення або механічне оброблення, які збільшують виробничі витрати і тривалість підготування виробництва.

Проблеми економічної точності стосовно штампувальних операцій вирішувалися працівниками підприємств і організацій, виходячи з їх особистого досвіду і технічних можливостей.

1.1. ОСНОВНІ ВІДХИЛЕННЯ РОЗМІРІВ ЛИСТОШТАМПОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ЗАГОТОВОК

Точність листоштампованих деталей і заготовок залежить від великої кількості параметрів: механічних характеристик, однорідності властивостей вихідного матеріалу деталі і інструменту, схеми процесу і напружень формоутворення, геометричних параметрів деталі, технологічних та інших параметрів процесу.

У загальному випадку розміри і точність визначають систематичні і випадкові похибки, що виникають в процесі формоутворення і видалення деталей (заготовок з штампу): пластичні деформації, що виникають після зняття деформуючого зусилля ΔL_{nl} ; пружні деформації заготовки та інструменту ΔL_{np} ; температурні зміни інструменту і заготовки ΔL_t ; зношування інструменту ΔL_i ; форма вихідної заготовки (короблення, хвилястість тощо) ΔL_s ; похибка розмірів інструменту ΔL_p ; базування заготовки ΔL_b ; випадкові зміни зазначених та інших параметрів ΔL_e :

$$\Delta L = \Delta L_{nl} + \Delta L_{np} + \Delta L_t + \Delta L_i + \Delta L_s + \Delta L_p + \Delta L_b + \Delta L_e \quad (1.1)$$

Пластичну деформацію визначає не тільки процес формоутворення, але і результати взаємодії деталі і інструменту після зняття деформуючого зусилля, а також вид і тип навантаження (статичний або динамічний).

Характерні причини, що викликають відхилення розмірів і можливості керування ними такі:

1. *Пружна зміна розміру виробу ΔL_{np} може бути обумовлена деформаціями розвантаження від дії нормальних сил $\Delta L_{np,пор}$,*

згинальних моментів $\Delta L_{np.M}$ и пружною деформацією інструменту $\Delta L_{np.i}$:

$$\Delta L_{np} = \Delta L_{np.nop} + \Delta L_{np.M} + \Delta L_{np.i} \quad (1.2)$$

Відповідно до закону А. А. Іллюшина про розвантаження деформація розвантаження в даному напрямку прямо пропорційна напруженням розвантаження, рівним різниці напружень навантаження і напружень, які залишаються після розвантаження у загальному випадку [1]:

$$\Delta L_{yx} = \varepsilon_x L_x, \quad \varepsilon_x = \frac{[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]}{E}, \quad (1.2a)$$

$$\Delta L_{yy} = \varepsilon_y L_y, \quad \varepsilon_y = \frac{[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]}{E}, \quad (1.2b)$$

$$\Delta L_{yz} = \varepsilon_z L_z, \quad \varepsilon_z = \frac{[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]}{E}, \quad (1.2c)$$

де L_x, L_y, L_z - розміри виробу в напрямку відповідно x, y, z (для якого визначили деформацію розвантаження); $\varepsilon_x, \sigma_x; \varepsilon_y, \sigma_y; \varepsilon_z, \sigma_z$ - головні нормальні деформації та напруження розвантаження відповідно в напрямках осей x, y, z .

При цьому

$$\sigma_x = \sigma'_x - \sigma_x^o; \quad \sigma_y = \sigma'_y - \sigma_y^o; \quad \sigma_z = \sigma'_z - \sigma_z^o; ,$$

де $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ - напруження розвантаження, $\sigma_x^o, \sigma_y^o, \sigma_z^o$ - залишкові напруження, які визначають на основі теорії визначення залишкових напружень [2]; x, y, z - вісі прямокутної системи координат; ν - коефіцієнт Пуассона; E - модуль пружності першого роду.

2. *Похибка, обумовлена вигином* виробу поблизу зон сполучення ділянок з різною кривиною або різним просторовим розташуванням. Зона дії згинальних моментів і сил, що перерізають для круглих і коробчастих деталей в цьому випадку обмежена певними розмірами. У циліндричних елементів деталі розмір змінюється тільки на тих ділянках, довжина яких не більше

$$L \leq 1.77\sqrt{d \cdot s},$$

де d – діаметр; s – товщина деталі; у тороїдальних елементів $\omega_2(\theta_2) - \omega_1(\theta_1) \leq 4/\lambda$.

Зазвичай приймається, що довжина для циліндричного або тороїдального елемента перевищує зазначену величину, тому згинальні моменти, сили, що перерізають і нормальні сили не впливають на іншу частину циліндричного і тороїдального елементів, тобто розглянуті елементи є «довгими». При невеликій товщині і великому діаметрі зазначена критична довжина зазвичай невелика. Змінення розміру у коротких циліндричних і тороїдальних елементів можна визначити згідно робіт [3, 4].

Пружна деформація штамп $\Delta L_{np.i}$ в процесі формоутворення залежить не тільки від напружень, що діють, а й від їх місця дії.

3. *Пластичні деформації деталі, обумовлені розвантаженням деталі і інструменту.* У деяких процесах пластичного деформування при певних умовах в ході розвантаження величини пружних деформацій штамп можуть перевищувати можливі пружні деформації розвантаження і пружного навантаження деталі. Це викликає повторне пластичне деформування деталі з напруженнями протилежного знака, тобто розвантаження з пластичною деформацією і наступне розвантаження деталі – визначають номінальні розміри і поле їх розсіювання.

Дослідження процесів розвантаження в виробництві точних деталей способами, що включають зменшення товщини стінки деталі, показали, що пластичне деформування деталі при розвантаженні в цьому випадку не виникає.

Пластичне змінення розміру виробу виникає в процесі розвантаження виробу, який штампують та інструменту в тому випадку, коли деформація штамп перевищує деформацію деталі:

$$\Delta L_{np} = \left| \Delta L_{np.i} \right| - \left| \Delta L_{np.нор} + \Delta L_{np.м} \right| \quad (1.3)$$

4. *Температурні зміни розміру деталі* можуть бути викликані, як зміною температури заготовки та інструменту внаслідок тепловиділення при пластичній деформації, так і розбіжністю температур заготовки та цеху.

Температурні зміни розміру деталі і інструменту виникають внаслідок зміни лінійних розмірів через охолодження деталі або нагрівання інструменту, так і внаслідок змінення механічних характеристик матеріалу заготовки та інструменту при цьому нагріванні.

5. *Зношування інструменту* в процесах листового штампування викликане дією на інструмент високого тиску, підвищених температур, термо-ЕРС. Все це обумовлює більш інтенсивну дію абразивного, адгезійного і дифузійного механізмів зношування інструменту.

Процес зношування включає три основних періоди (рис. 1.1):

I – припрацювання – відбувається швидке зношування поверхневого шару при інтенсивному видаленні елементів поверхневого шару, що впливає на переміщення матеріалу, який штамнують;

II – рівномірне усталене зношування, яке визначає стабільність робочого процесу;

III – катастрофічне зношування – роботу не виконують.

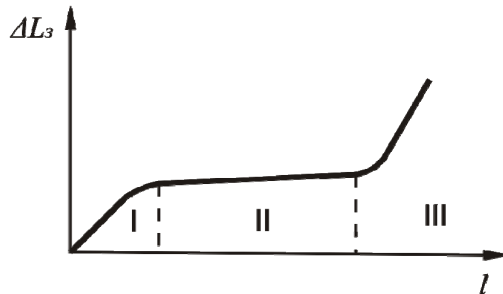


Рисунок 1.1 – Крива зношування інструменту:

ΔL_z – величина зношування, мкм; l – фактичний шлях відносно інструменту виробів, що деформуються; I – ділянка припрацювання; II – ділянка усталеного зношування; III – ділянка катастрофічного зношування

У розрахунках процесу зношування зазвичай враховують перші два періоди зношування, для яких враховують всі фізичні умови виконання процесу. Для багатьох операцій листового штампування розроблені відповідні моделі зношування інструменту: для розділювальних – в роботах [5, 9], а витягувальних – у роботі [9].

Запишемо найбільш загальний випадок моделі (див. рис. 1.1):

$$\Delta L_z = Z_0 + 3 \cdot l, \quad (1.4)$$

де Z_0 – зношування, що відповідає періоду припрацювання, 3 – питоме зношування, що відповідає ustalеному періоду зношування.

Похибка розміру інструмента переважно повністю переноситься на розмір виробу, тому інструмент зазвичай рекомендується виготовляти на 1...2 квалітети точніше в порівнянні із заданою точністю виробу.

6. Неточність виготовлення елементів штампa. Неточність виготовлення цих елементів впливає на відхилення від номінальних розмірів при виконанні різних операцій листового штампування. Ступінь впливу цих неточностей різною мірою позначається на відхиленнях розмірів деталей.

Неточність виконавчих розмірів оснащення в більшості операцій повністю переноситься (копіюється) на деталь, це відноситься до операцій вирубубання, пробивання, витягування, відбортування тощо.

7. Неточність встановлення штампa на прес може бути викликана:

- неправильним порядком закріплення;
- наявністю сторонніх тіл між нижньою плитою і столом установки, або дефектом опорних поверхонь;

8. Похибка форми і розмірів заготовки: коробоподібність, серпоподібність, відхилення від круглості, різновщинності, непрямолінійність, наявність залишкових напружень; величина похибок деталей визначається залежно від виконуваної операції.

9. Неточність деталі, що залежить від похибки базування заготовки, обумовлена: неточністю форми, розмірів заготовки; схемою її установки.

Величина цієї похибки залежить від конкретних умов орієнтування заготовки щодо фіксатора і може дорівнювати нулю або становитиме значну частину допуску на виріб.

Величина пружних деформацій елементів технологічної системи прес-штамп-заготовка (П-Ш-3) залежить від типу установки Т-1324 або ТА-1324.

Загальна величина розсіювання розмірів відштампованої деталі визначається з допомогою формул (1.1–1.4) додаючи з врахуванням

знаку всі відхилення, що викликані кожною з перелічених причин за формулою:

$$\Delta L_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n \Delta L_k \quad (1.5)$$

де ΔL_k – відхилення розміру, викликане i -ю причиною, яка визначається формулою (1.1–1.4); n – кількість причин, що викликають відхилення розміру.

1.2. ПОНЯТТЯ ПРО ПАРАМЕТРИ ТОЧНОСТІ

Точність виготовлення деталей – ступінь наближення її форми і розмірів, отриманих в результаті технологічного процесу, до заданих кресленнями форми і розмірів. Таке визначення точності прийнято в машинобудуванні [6, 7, 9, 10].

Розглядаючи питання досягнення точності при штампувальних операціях Subramonian S. [11] розуміє під точністю деталей різницю між граничними відхиленнями будь-якого її параметра. Він вводить поняття про можливу точність. Можлива точність – це точність, яка може бути досягнута новітніми технологічними процесами, застосуванням нових видів технологічного устаткування і оснащення. Точність в більшості випадків забезпечується завданням відповідних допусків на форму і розміри деталі. Точність характеризується наданням деталі форми, близької до оптимальної з точки зору її деформації, надійності і довговічності, поліпшенням зовнішнього вигляду.

Міхаленко Ф. П. і ін. [12, 13] питання зносу інструменту та якості деталей досліджують за допомогою коефіцієнтів точності:

$$K_y = h_y/S; K_n = h_n/S; K_c = h_c/S; K_{\alpha} = |\operatorname{tg} \alpha| = (d_1 - d_2)/(K_c S). \quad (1.6)$$

де h_y – висота утягування; h_n – висота пояса; h_c – висота сколювання; α – кут сколювання; h_s – висота задирок; S – товщина матеріалу (див. рис. 1.2, а).

Однак оцінювання точності деталей за допомогою коефіцієнтів точності не дає наочного уявлення про параметри штампованих деталей, особливо при штампуванні невеликих партій деталей.

Umaras E. [14] поряд з параметрами точності відштампованих деталей, як різницю між максимальними та мінімальними розмірами деталі, вводить поняття різнокатетності поверхні сколювання, тобто b_{max} і b_{min} (рис. 1.2, б).

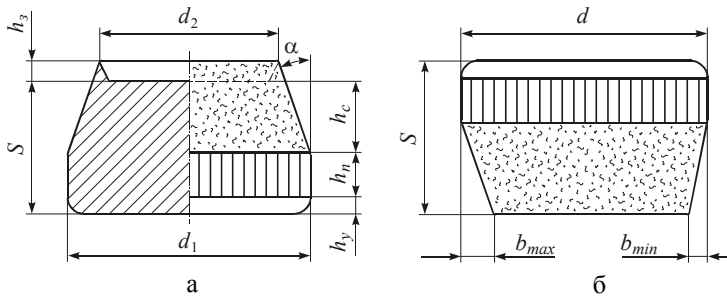


Рисунок 1.2 – Параметри поверхні зрізання

Н. Makich [15] якість і точність виробів, що отримуються в штампах, визначає наступними параметрами: відповідністю розмірів виробів і розмірів, заданими за їх кресленнями; відсутністю на поверхні виробу тріщин, задирок, а також ліній зсувів; шорсткістю крайок зрізу; рівномірністю перерізу матеріалу.

Незважаючи на різне тлумачення параметрів точності, автори, переважно, визначають їх сутність як відповідність параметрів готових деталей тим що задані.

Відповідно до вищевикладеного та сучасної термінології [16, 17] точність штампованих деталей повинна включати [18]: точність форми, точність розмірів, точність взаємного розташування поверхонь.

Точність форми – площинність, шорсткість поверхні зрізання, величина задирок на поверхні зрізання.

Точність розмірів – відповідність розмірів відштампованих деталей розмірам, що задані кресленням.

Точність розташування поверхонь – паралельність, співвісність, перпендикулярність площин.

Параметрами точності штампованих деталей є: величина відхилення від площинності; значення шорсткості поверхні зрізу; величина

задирок; величина відхилення розмірів; величина відхилення від паралельності; величина відхилення від співвісності; величина відхилення від перпендикулярності.

Шорсткість поверхні зрізання визначається на паску і на поверхні зколювання (рис. 1.3). Лінійні розміри деталі визначаються по паску. Відхилення від перпендикулярності площин визначається кутом відколу α поверхні зрізання. Інші параметри точності визначаються відповідно до встановленого порядку [16] звичайними методами вимірювання.

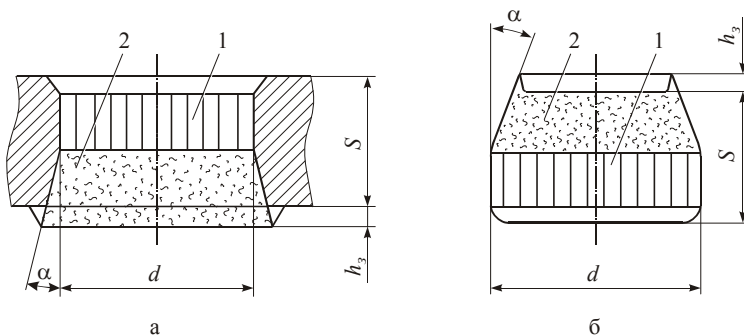


Рисунок 1.3 – Поверхня зрізання:

1 – пасок, 2 – поверхня сколювання, h_z – висота задирка, S – товщина матеріалу, d – розмір деталі, α – кут сколювання

1.3. АНАЛІЗ ВИРОБНИЧИХ ПОХИБОК

Відхилення фактичних параметрів точності штампованих деталей від заданих є наслідком виробничих похибок [19, 20].

Виникаючі похибки можна поділити на дві групи: випадкові (похибки переміщення, незакономірні) і систематичні, що викликають однакові зміни параметрів точності у партії деталей.

Більшість факторів, що викликають виробничі похибки, є чисто випадковими. Дія ж систематичних факторів виявляється у зсуві всієї області визначення параметрів точності.

До причин, що викликають виробничі похибки, належать:

- 1) похибки обладнання [21, 22, 23, 24, 25];
- 2) похибки інструменту [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32];
- 3) неоднорідність матеріалу заготовки або деталі, анізотропія механічних властивостей і коливання хімічного складу матеріалу, внутрішні напруження, коливання товщини матеріалу внаслідок прокатки;
- 4) похибки виконавця – під час встановлення та закріплення штампа, при фіксації заготовки і деталі у ньому, при контролі розмірів.

Вплив обладнання на точність виконання технологічних операцій листового штампування виявляється в порушенні взаємного розташування верхньої і нижньої частин штампа. Однак, як показав досвід експлуатації штампів [33, 34, 35, 36], вплив цього фактора на результуючу точність деталей незначний.

Зношування робочих частин штампа призводить до зміни розмірів деталі, яку штампують. При цьому, зношування матриці збільшує розміри деталі, а зношування пуансона їх зменшує.

Величина z_{\min} відповідає зазору, при якому отримується найбільш якісна поверхня зрізання і забезпечується найбільша стійкість робочих частин штампа.

Величина z_{\max} приймається, виходячи з умови отримання мінімальної допустимої задирки для даного класу деталей і товщини матеріалу.

При розділювальних операціях без притискання матеріалу, який штампують, розміри штампованих деталей змінюються не тільки за рахунок зношування робочих частин, а й в наслідок пружного повернення матеріалу деталей. Залежно від стану і товщини штампований матеріал має різну величину пружного повернення. За характером похибку, пов'язану з пружним поверненням деталі, слід вважати систематичною.

Вплив анізотропії властивостей матеріалу на похибки при розділювальних операціях полягає в тому, що механічні властивості його в різних напрямках прокатки неоднакові: в поздовжньому напрямку показники міцності вище, ніж в поперечному, а пластичні показники, навпаки, нижче. Це надає певний вплив на пружні деформації і на

відхилення розмірів штампованих деталей від номінальних розмірів. Ступінь впливу цієї похибки на точність штампованих деталей незначний.

На точність деталей, які штамнують певний вплив мають коливання розмірів заготовки за шириною і товщиною: перші призводять до того, що перемички між деталями, що вирубуються і по крайках смуги виявляються не однаковими, що викликає спотворення форми деталей і розсіювання розмірів; другі призводять до значних коливань деформацій. За своїм характером ці похибки слід віднести до випадкових і незначних.

Похибки, пов'язані з неточністю фіксації і базування, виникають при фіксації заготовок по упорам без додаткового притискання до базових поверхонь. Похибку базування слід враховувати як випадкову, що підпорядковується закону нормального розподілу. Даний вид похибки залежить від виконавця.

У разі фіксації по технологічних отворах похибка дорівнює гарантійному зазору, який зазвичай знаходиться в межах 0,05...0,1 мм і залежить від товщини матеріалу, який штамнують і габаритних розмірів штампованих деталей. Вже згадана похибка в тому випадку, коли вона залежить від штампа, є систематичною.

Похибки установки робочих частин також призводять, переважно, до порушення рівномірного розподілу зазора. Ці похибки носять випадковий характер. До такого виду похибок належать також похибки, пов'язані з неправильним встановленням направляючих деталей.

Виробничі похибки за своєю суттю є випадковими, котрі підпорядковуються загальним законам теорії ймовірності та математичної статистики. Крім того, абсолютна величина похибок в значній мірі залежить від конкретних виробничих умов, що ускладнює розробку єдиної системи допусків для штампованих деталей. Особлива складність при цьому полягає в тому, що відхилення геометричних розмірів штампованих деталей при розділювальних операціях спрямовані в бік збільшення розмірів деталей (або «тіла» деталей). Існуюча ж система допусків і посадок заснована на протилежному напрямку похибок обробки (в «тіло» деталі). Таким чином, поля допусків по діючим стандартам не збігаються з полями технологічних

похибок штампованих деталей, які повинні сполучатися без підготовки з механічно обробленими деталями виробів. Виконання цієї вимоги забезпечується розрахунком виконавчих розмірів робочих частин штампа.

1.4. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПАРАМЕТРИ ТОЧНОСТІ

Головними джерелами відхилення розмірів деталей, які штампують, є процеси, що відбуваються в усіх елементах технологічної системи, метод штампування і умови процесу формоутворення.

Wang X. Z. [8], Шаров А. А. [9], Барвинок В. А. [10], Subramonian S. [11], Северденко В. П. [37], виділяють в своїх роботах такі фактори, що впливають на параметри точності деталей, які штампують:

- товщина і матеріал деталі, яку штампують;
- несталість механічних властивостей матеріалу деталі;
- конструкція, якість виготовлення і стійкість штампа;
- величина зазору між пуансоном і матрицею і нерівномірність його розподілу;
- пружні деформації деталі;
- технологічний процес штампування;
- конструкція і стан пресового обладнання;
- розміри і форма деталі, яку штампують;
- зношування робочих частин штампу.

Сажин Е. Г. [34] вважає, що величина допуску на деталь, яку штампують, повинна бути більше або дорівнювати алгебраїчній сумі відхилень, які викликані різними факторами, що діють при штампуванні, а саме:

- допуск на виготовлення робочих частин штампа;
- відхилення від розміру, викликане пружною деформацією матеріалу, нерівномірністю зазору, анізотропією матеріалу і його викривленням;
- величиною зношування матриці і пуансона;
- неточність базування деталі.

Допуск на деталь має бути не менше суми трьох основних чинни-

ків: величини зношування, що допускається для робочих частин штампа, пружної деформації і викривлення матеріалу, що штампується, допуску на виготовлення робочих частин штампа. Автор запропонував встановити чотири групи точності виготовлення деталей залежно від точності виготовлення штампів.

Ефимов Н. А. [39] експериментально дослідив параметри точності листових деталей, що вирізаються поліуретаном, як з точки зору якості деталі, так і зношування штампа. Показано зміну розмірів деталей при вирубуванні – пробиванні залежно від основних технологічних параметрів.

Міхаленко Ф. П. [12, 13] вводить поняття оптимального зазору, при якому забезпечується задовільна якість деталей, які штампують і стійкість штампів.

Величина зазору [42] між робочими частинами має вирішальне значення для нормального розділення матеріалу, який штампують і отримання якісних деталей. Розділення йде по лініях ковзання при досягненні величини напружень, що перевершують силу зчеплення кристалів (зерен) міжкристалічної ґратки. Кількома дослідниками запропоновані емпіричні залежності для визначення оптимального зазору [41, 42, 43, 44, 45]. Але наведені залежності не враховують одночасно багатьох чинників, що впливають на величину зазору: наприклад, опір зрізанню.

Фотєєв Н. К. [46] досліджував вплив нерівномірності розподілу зазору (ексцентриситет) між робочими частинами штампа на зношування робочих частин (стійкість штампа), при вирубуванні слюди (товщина – 1 мм, діаметр заготовки – 5 мм).

Farzin M. [54] при дослідженні процесів вирубування товстолістового матеріалу відзначає залежність опору зрізанню від товщини матеріалу і зазору між робочими частинами. Мінімальний опір зрізанню спостерігається при оптимальному зазорі.

У дослідженнях Мовшовича А. Я. [47] наводяться дані про вплив товщини матеріалу на вигин деталей при вирубуванні, розглядається вплив анізотропії властивостей листового матеріалу на точність штампування. Вплив анізотропії механічних властивостей матеріалу, який штампують, уздовж і поперек прокату на точність деталей досліджувався Громовою Е. Г. [47], Hernandez J. J. [49], Зубцовим М. С. [50, 51]. При штампуванні круглих деталей, типу кільця

статора, відхилення розмірів деталей від розмірів робочих частин штампа сягають 0,6...0,8 % від діаметра деталі.

Грігор'єв Л. Л. [52], досліджуючи точність отворів, отриманих штампуванням за елементами на координатно-револьверних пресах, приходять до висновку, що вплив товщини матеріалу на величину сумарного відхилення розмірів деталі, які штампують, незначний і при штампуванні за 12 квалітетом і нижче для товщини матеріалу, який штампують, до 2 мм нею можна знехтувати. Однак в цьому дослідженні не враховано розміри штампованих деталей, немає даних для товщини матеріалу вище 2 мм.

Вплив товщини і марки матеріалу, який штампують, на параметри точності штампованих деталей також досліджували Смирнов Г. В. [53], Farzin M. [54], Чистяков А. В. [55], Шенкар В. С. [56]. Naas E. [43], Seidenberg [45].

Singh U. P. [36] зазначає, що параметри точності штампованих деталей залежать від технологічності деталі, тобто такого поєднання форми, розмірів і матеріалів, які дозволяють отримати деталі з найменшою витратою засобів і часу, характеру застосовуваних операцій і їх послідовності. Але в роботі не наведено чітких рекомендацій по параметрах точності штампованих деталей залежно від їх розмірів і форми.

Мовшович А. Я. [33], Сажин Е. Г. [34] дослідили вплив розмірів штампованих деталей на їх параметри точності. Відзначалося збільшення відхилення міжцентрової відстані залежно від товщини матеріалу і розмірів штампованих деталей: при відстані 100 мм відхилення становить $\Delta = 0,21$ мм, при міжцентровій відстані 200 мм – $\Delta = 0,3$ мм. Також відзначено, що зі збільшенням розмірів деталей в межах 50...250 мм положення центру групування розмірів штампованих деталей зміщується на 12 %. При цьому абсолютне зміщення центру групування розмірів штампованих деталей при пробиванні на 20 % більше, ніж при вирубуванні.

Дорін В. І. [57] також вказує на те, що більш точні розміри деталей можна отримати при штампуванні в суміщених штампах. При проектуванні штампів слід застосовувати діагональне розташування колонок, так як задне розташування колонок призводить до зниження точності штампованих деталей через перекося плит, що викликає

швидке зношування штампа, нерівномірність розподілу зазору між робочими частинами штампа.

Subramonian S. [11] приходиться до висновку, що в балансі точності штампованої деталі частка точності, що залежить від конструкції застосовуваного штампа, значна. Відомо, що точність деталей в простих штампах в 2 – 3, а точність деталей в універсальних штампах в 1,5 – 2 рази нижче точності деталей в спеціальних штампах. Підвищити точність деталей можна також застосуванням штампів суміщеної дії.

Шишков Б. І. [58] вважає, що більш високої точності штампованих деталей можна досягти застосуванням штампів суміщеної дії; суміщенням центру тиску штампа з віссю штампа.

Вплив конструкції штампів [5, 6, 9, 11, 58, 59] на показники точності штампованих деталей досліджувався тільки стосовно до спеціальних штампів. Відсутні дані щодо впливу конструкції штампів на параметри точності деталей штампованих іншими методами, наприклад, високошвидкісним штампуванням на пневмоударному обладнанні.

Вайнтрауб Д. А. [22], Досліджуючи параметри точності штампованих деталей невеликих габаритів (до 100...150 мм і товщиною до 4 мм, матеріал: сталь, латунь, алюміній, бронза БрОФ 10-1), зробив такі висновки:

1) процес вирубування відбувається за теоретичною схемою, що відображає спільну дію спрацювання і затуплення матриці штампа і представляє собою композицію законів рівної ймовірності і нормального зі зростаючим розсіюванням;

2) зміщення центру групування X , збільшення розсіювання σ визначається залежностями, які можуть бути прийняті лінійними;

3) зміщення центру групування (коефіцієнт A) залежить, переважно, від товщини матеріалу, який штампують і для вирубування «на провал» воно на 30...40 % більше, ніж для вирубування з притискачем матеріалу. Для вирубування «на провал» коефіцієнти B і C , залежні від механічних властивостей матеріалу і типу штампа, вище, ніж для вирубування з притискачем матеріалу;

4) вплив випадкових чинників для нових виготовлених штампів призводить до кривих розсіювання, близьких до нормального закону

Гауса, що дозволяє для визначення меж розсіювання розмірів відштампованих деталей користуватися правилом $b\sigma$. Залежності, що впливають на миттєві розподіли, близькі до лінійних;

5) вплив переточувань матриці проявляється тільки при вирубуванні «на провал» у вигляді зсуву центру групування на величину, близьку до різниці розмірів матриці до і після перешліфовування, причому характер і параметри граничного закону розподілу залишаються практично незмінними. При вирубуванні з притискачем переточування не спричиняє будь-якого істотного впливу на основні статистичні характеристики процесу;

6) відносний вплив спрацювання на розсіювання розмірів для досліджених деталей в середньому в 2...2,5 рази перевершує вплив випадкових факторів, а вплив затуплення становить близько 0,3...0,4 від величини спрацювання.

У дослідженні запропонована методика обчислення допусків на деталі, які штампують, але не вирішені питання взаємозв'язку між розмірами штампованих деталей і робочими частинами штампа залежно від спрацювання останніх.

Досліджував вплив спрацювання робочих частин штампів на параметри точності штампованих деталей Мовшович А. Я. [33]. Досліджувалися деталі розмірами до 250 мм і товщиною матеріалу, який штампують, до 10 мм. У процесі вирубування-пробивання спостерігається монотонне зміщення центру групування і збільшення розсіювання розмірів. Центр групування визначався як середнє арифметичне всіх дійсних розмірів деталей в даній партії. Вплив спрацювання відбувається нерівномірно. До початку появи задирок центр групування зміщується порівняно повільно і досить рівномірно. Виняток становить початковий період припрацювання, протягом якого центр групування зміщується трохи більше. З моменту появи задирок зношування починає збільшуватися усе зростаючою мірою. Зсув центру групування залежить від виду операції. При пробиванні він на 10...12 % більше, ніж при вирубуванні. Розсіювання розмірів характеризується також середнім квадратичним відхиленням σ від центру групування і розмахом R .

Вплив спрацювання робочих частин штампа вивчали Горнов Ю. Н. [27], Фотєєв Н. К. [46], Романовський В. П. [60, 61], Lange К. [62, 63], Винник П. М. [25] тощо. Необхідно відзначити, що в

цих дослідженнях за критерій спрацювання приймається тільки величина задирок у штампованих деталей, а параметри точності не розглядаються.

Михаленко Ф. П. і Ляпін Ю. І. [12] дослідили вплив технологічних чинників на зношування робочих частин і якість штампованих деталей. Мінімальне зношування і найбільша стійкість отримується при оптимальному зазорі, що забезпечує мінімальні значення опору зрізанню $\sigma_{зр}$.

У напрямних повзуна преса не допускаються великі зазори. Площини повзуна і столу преса повинні бути паралельні, має бути збіг центру тиску штампа з віссю симетрії преса.

Із зарубіжних досліджень найбільш повний аналіз факторів, які впливають на параметри точності штампованих деталей відображено у роботах [45, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73].

Stauberg M. [72] зазначив негативний вплив нерівномірного зазору між пуансоном і матрицею при вирубуванні на якість штампованих деталей і стійкість штампів. Основна причина нерівномірності зазору – деформація матриці при термічній обробці. Дано рекомендації по виготовленню робочих частин штампів. Для забезпечення рівномірного зазору пропонується закріплення пуансонів за допомогою легкоплавких матеріалів.

Rechel B. [69] розглянув фактори спрацювання пуансонів. Визначено три фази спрацювання: механічна, адгезійна, дифузна. Висунуто гіпотезу термоелектричного спрацювання, згідно з якою при динамічному навантаженні переважає або адгезійне (термо-електромеханічне) або дифузійне (термоелектрохімічне) зношування залежно від комбінації матеріалів пуансона і матриці. Цим пояснюється відоме на практиці явище: підвищення стійкості штампів і якості штампованих деталей при різних матеріалах пуансона і матриці або при їх різній твердості.

Для малих і середніх точних деталей (до 150 мм) застосовуються суміщені штампи. Відмічений вплив на точність деталей обробки пуансонів штампів, розглянуті способи видалення задирок: в електролітах, в галтувальних барабанах, шліфуванням.

У роботах [70, 71] рекомендуються методи вимірювання спрацювання ріжучих кромок штампу та надається загальна схема спрацювання.

На якість деталей [74] впливає величина зазору. У той час, як при великих зазорах виникає задирок при втисканні матеріалу листа в зазор між матрицею і пуансоном, при малих зазорах виникає вторинний задирок. Його виникнення викликано тим, що при зворотному ході пуансона матеріал, що прилип до нього знімається і залишається на поверхні листа.

Мокино Икую [65] досліджував якість поверхні зрізання при вирубуванні і пробиванні різних матеріалів. На процес вирубування впливають: глибина заглиблення пуансонів в матеріал, який штампують і якість поверхні матеріалу, стан робочої поверхні пуансона і матриці, а також наявність на них гострих кромek, наявність в робочій зоні притискання матеріалу, який штампують.

У роботах [75, 76, 77] розглянуті питання конструкції штампів і її вплив на якість штампованих деталей.

Докладний аналіз чинників, що впливають на якість штампованих деталей, наведений в роботах [67, 78, 79, 80].

Для оцінювання якості поверхні зрізання [79] деталі, яку штампують, використовуються наступні характеристики: ширина блискучого циліндричного паска; ширина і кут нахилу поверхні сколювання; висота задирок.

Рекомендується: розміри деталей вимірювати тільки по блискучому паску, ширина його повинна бути обмежена тільки мінімальним значенням; похибки форми повинні знаходитися в межах допуску на розмір, що відноситься до відповідної поверхні; висота задирки обмежується тільки максимально допустимими значеннями.

За критерій оптимального зазору [67] прийнято збігання або невелика позитивна різниця (до 0,025 мм) розмірів пробитого отвору і пуансона.

У роботах [6, 11, 12, 21] розглядаються питання впливу на якість штампованих деталей геометрії робочих частин штампа, вихідного стану матеріалу, який штампують.

Kibe Y. [6] вказує, що при вирубуванні з притискачем в суміщеному штампі для деталей габаритами до 30...50 мм викривлення сягає 0,02...0,05 мм.

Відхилення розмірів деталей залежно від товщини матеріалу (до 4,0 мм) і типу штампа знаходяться в межах:

зовнішній контур – 0,03...0,4 мм;

внутрішній контур – 0,02...0,2 мм.

Для складного контуру допуск розширюється на 25...50 %, шорсткість поверхні зрізання – $R_a = 0,63...1,25$ мкм.

При чистовому вирубванні [58, 81] деталі можна виготовляти з точністю отвору і контуру по 8 – 9 квалітетам, з допусками на міжцентрову відстань – 0,02 мм, шорсткість поверхні зрізання сягає $R_a = 0,63...1,25$ мкм.

У суміщених штампах [57] не співвісність елементів штампованих деталей товщиною до 2 мм знаходиться в межах $\pm(0,02...0,8)$ мм, штампах послідовної дії $\pm(0,1...0,3)$ мм, в вирубних штампах $\pm(0,3...0,5)$ мм. Точність деталей при зачисних операціях сягає 9 – 10 квалітетів.

Lange K. [62] наводить дані по параметрах точності деталей габаритами до 60 мм і товщиною від 1 до 4 мм: величина відхилень розмірів приблизно дорівнює полю допуску 6 – 7 квалітетів, а для деталей цього ж габариту товщиною до 1 мм – полю допуску 7 квалітету. Для розмірів деталей, що оформляються пуансоном, величина відхилень приблизно дорівнює 0,02 мм.

При вирубванні деталей матрицею зі скошеними кромками точність розмірів трохи збільшується і сягає 7 квалітету. Точність розмірів штампованих деталей при виготовленні пуансонів і матриць штампів з паралельними ріжучими кромками по 5 – 7 квалітетам залежно від товщини матеріалу, який штампують.

Відхилення розмірів відштампованих деталей середніх габаритів (до 30...60 мм) від фактичних розмірів робочих частин штампа при роботі «на провал» для матеріалів товщиною від 1 до 3,5 мм знаходиться в межах 9 – 11 квалітетів. Для тонких матеріалів товщиною від 0,5 до 1 мм відхилення розмірів не виходять за межі 12 квалітети. Застосування штампів з притискачем для тонких матеріалів (до 1,5 мм) може значно зменшити пружне повернення, що буде сприяти підвищенню точності деталі.

Деталі, отримані звичайним вирубванням в штампах [82], тільки на частині поверхні зрізання (паску) мають шорсткість $R_a = 2,5...0,63$ мкм, а на більшій частині (сколювання) $R_a = 5,0...20$ мкм, причому точність розмірів залежить від точності робочих частин інструменту, наприклад при 10-му квалітеті його

точності розміри деталей, що вирубуються відповідають 12 – 14 квалітету точності.

Як показав аналіз вищенаведених джерел при інструментальному пробиванні-вирубуванні можливі похибки форми, розмірів міжцентрових і базових елементів виробу, форми поверхні поділу. Точність при вирубуванні і пробиванні визначається: відхиленням від площинності деталей, відхиленням від паралельності і форми поверхні поділу, наявністю залишкових напружень в матеріалі, який штампують, а також ряду факторів пов'язаних з фізико-хімічними особливостями матеріалу, технічними характеристиками преса і штампа, конфігурацією і розмірами деталей та обраної технології штампування.

Точність штампованих деталей залежно від обраної операції штампування та її схеми знаходиться в межах 6...16 квалітетів, шорсткість поверхні, яка формується безпосередньо в контакті з інструментом, відповідає $Ra \approx 0,32...1,25$, а та яка не формується в контакті з інструментом – не нижче $Rz \approx 20$, вихідна шорсткість поверхні листової заготовки на деформованих ділянках поверхні деталі знижується у 2...4 рази.

Похибка форми в поздовжньому перетині можлива у вигляді відхилення твірної від прямолінійності і паралельності її осі, в поперечному перерізі у вигляді овальності і ограновування. Відхилення твірної від прямолінійності і паралельності осі може бути викликано нерівномірністю механічних властивостей матеріалу по висоті деталі і нерівномірністю товщини: стінки заготовки по висоті, що приводить до різної деформації по товщині, висоті і поперечного перерізу деталі і різним діаметральним деформаціям розвантаження по висоті деталі.

В роботах Комарова А. Д. [83, 84], Рябих О. А. [85], Ходирева В. А. [86] та інших джерел [87–95] досліджувались технологічні можливості та точність деталей, що отримуються штампуванням еластичним середовищем (витягування, пробивання-вирубування) з використанням пресового обладнання, а процеси самого формоутворення докладно досліджено в роботі Ісаченкова Е. І. [96].

При вирубуванні і пробиванні за допомогою еластичного середовища, що виконує роль матриці або пуансона відповідно, в навантаженому стані штампа контур поділу не збігається з контуром ріжучої кромки жорсткого інструменту (шаблону або матриці).

Відстань між контурами розділення металу і штампа може дещо змінюватися через нестабільність механічних властивостей оброблюваного матеріалу, умов тертя і величини тиску еластичного середовища. У дрібносерійному виробництві зношування шаблонів незначне, тому основний вплив на точність деталей справляє стабільність зони розділення.

Встановлено, що при вирубуванні-пробиванні листових деталей товщиною до 1,5 мм отримують більш високі параметри точності, ніж при аналогічних операціях з металевими пуансоном та матицею в наслідок того, що процес розділення відбувається весь час з притискуванням заготовки.

В експериментальних дослідженнях Рябих О. А. з визначення точності деталей при операціях розділення еластичним середовищем встановлено, що на відхилення розмірів при статичному навантаженні впливають: марка матеріалу заготовки і його фізико-механічні властивості та їх анізотропія, товщина матеріалу заготовки, розмір зони штампування, гострота ріжучих кромки шаблона або матриці атерілу заготовки тощо.

Твердість еластичного середовища не впливає помітно на точність розмірів при вирубуванні. Однак при пробиванні отворів твердість еластичного середовища має деякий вплив. При пробиванні отворів відносно невеликого діаметра $d/s < 20 \dots 25$) зі збільшенням твердості еластичного середовища зменшується величина відхилення. При подальшому збільшенні діаметра отвору твердість еластичного середовища істотно не впливає на величину відхилення.

Останнім часом з'явився ряд досліджень, що присвячені імпульсним методам формоутворення [97–116] в яких розв'язані питання: технологічних можливостей різноманітних методів імпульсного штампування та визначені раціональні області їх застосування; керування енергосиловими параметрами пластичного деформування; обладнання імпульсного формоутворення; енергетичних та силових параметрах гідродинамічних процесів штампування, а також здатність до штампування матеріалів при гідроударному витягуванні; застосування поліуретану та рідини для пневмоударного листового штампування [105], що має такі переваги:

- простота і низька вартість оснащення, оскільки в якості пуансона використовується рідина;

- відсутність ущільнюючих пристроїв;
- високе і рівномірне деформуюче зусилля;
- відсутнє пружне повернення;
- короткі терміни підготовки виробництва;
- висока якість поверхні відштампованих виробів;
- відсутність джерел підвищеної небезпеки, так як роль енергоносія виконує стиснене повітря, яке отримується від цехової пневмомережі з тиском до 0,63 МПа або від індивідуального компресора з тиском до 1,0 МПа.

В роботах [98, 99, 100] розглянуті показники якості імпульсного формоутворення складнопрофільних деталей.

В роботах Чачіна В. Н. [104, 105], Бичкова С. А. [106], Кривцова В. С. [101, 102] запропоновано концептуальні підходи до створення технологічних систем з використанням імпульсних методів штампування, а також проведено аналіз стану імпульсних методів формоутворення і шляхів розвитку деяких імпульсних технологій.

В роботі Фролова Є. А. [114] запропонований концептуальний підхід до обрання методу і засобів виробництва тонколистових деталей імпульсним штампуванням. Показано, що для багатонаменклатурних і дискретно-нестабільних програм випуску виробів доцільне застосування технології і засобів технічного забезпечення метода ПУШ гідросередовищем та поліуретаном.

У той же час в роботах [117–121, 130] питання точності штампування з застосуванням зазначеного методу висвітлювалися переважно з точки зору констатації практичних результатів їх застосування та відсутній статистичний аналіз відхилення розмірів за габаритами і товщиною матеріалу, який штампують, для основних операцій пробивання-вирубання і витягування.

Не досліджувався вплив технологічних чинників на виникнення виробничих похибок при ПУШ. Слід зазначити, що причини виникнення виробничих похибок, їх характер і ступінь впливу в процесі пневмоударного штампування має свою специфіку, пов'язану з особливостями застосовуваної технології, обладнання та оснащення (відсутності жорсткого пуансона, високошвидкісного деформування, виду енергоносіїв, номенклатури оброблюваних матеріалів тощо).

При ПУШ значно скорочується частка випадкових похибок, підвищується ступінь впливу похибок систематичного характеру, що

дозволяє з високим ступенем ймовірності керувати якістю штампування.

Необхідна точність розмірів деталей переважно може бути досягнута без додаткових витрат. Науковою основою такого підвищення точності штампованих деталей і їх елементів при проектуванні технології та вдосконаленні її є урахування впливу систематичних похибок, що визначають величину відхилення розмірів деталі від розмірів штампового оснащення.

Отже попереднє визначення величини і умов виникнення відхилення розмірів деталей при ПУШ залежно від розмірів штампового оснащення дозволяють вирішити найважливішу практичну задачу: підвищення точності розмірів виготовлених деталей за рахунок компенсації впливу систематичних, а в деяких випадках і випадкових похибок.

Відзначимо такі переваги ПУШ рідким і еластичним середовищем: імпульсне навантаження заготовки, високі швидкості деформування, безпуансонний метод формоутворення і суттєве пластичне деформування практично всієї поверхні виробу, який виготовляють, суттєво впливають на точність форми, розмірів і шорсткість поверхонь, які отримують в процесі деформування. Також наявні дослідження не дозволяють розробити практичні рекомендації з вдосконалення процесу ПУШ, які дозволяли би підвищити точність і якість деталей, які штампують.

Наявні науково-виробничі дані на сьогодні не дозволяють обґрунтовано і впевнено призначати необхідні параметри точності розмірів деталей при ПУШ через протиріччя в рекомендаціях з призначення розмірної точності деталей та недостатність конкретних даних про умови, за яких можливе досягнення необхідної (більш високої) точності розмірів.

1.5. ОБґРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Встановлення закономірностей процесів, що протікають при обробці металів тиском, і, зокрема, в загальній технологічній системі, що включає об'єкт обробки, обладнання та оснащення, обумовлює необхідність системного аналізу з визначенням складу та відносин між елементами системи.

У процесі дослідження отримана структура зіставляється із значенням цільової функції, забезпечуючи багатокрокову послідовність аналізу, як вихідних засновків і припущень, так і ступеня адекватності прийнятої математичної моделі і опису процесу.

Різноманіття технологічних схем деформування, використовуваних в пневмоударного штампуванні і широкий спектр вимог, що висуваються власне до технологічної системи, зумовлюють необхідність диференційованого підходу, як з точки зору теоретичного аналізу, так і з точки зору проведення експериментальних досліджень. Результати експериментальних досліджень в цьому випадку можуть бути використані в якості критеріальних для оцінки ступеня достовірності теоретичних рішень.

Формозміна при різних процесах обробки тиском переважно здійснюється завдяки дії на заготовку робочих частин штампа. Під дією штампа заготовка піддається пластичній деформації і приймає форму робочих частин штампа. Але після зняття деталей зі штампа, вони будуть відрізнятися від форми і розмірів відповідних частин штампа, а також будуть відрізнятися формою і розмірами один від одного – це явище називається розсіюванням розмірів і проявляється досить помітно, впливаючи на точність і якість деталі, яку штампують.

Первинні похибки, під дією яких виникає сумарне розсіювання розмірів, при різних операціях гнуття численніші і інтенсивніше проявляються, ніж при інших операціях листового штампування. Проаналізувавши різні технологічні процеси формоутворення можна умовно розділити всі похибки на наступні основні групи

1) похибки штампа (неправильна геометрія елементів робочих частин, неправильна робота штампа – зміщення заготовки в процесі гнуття, зношування робочих поверхонь і тощо);

2) похибки матеріалу (неоднорідність по товщині, анізотропія (неоднорідність механічних властивостей), наявність місцевих деформацій матеріалу в зоні гнуття);

3) похибки робітника (неправильне встановлення штампа, неправильне укладання деталі, неоднакова сила удару).

За характером дії похибки поділяють на систематичні і випадкові. До перших відносяться похибки виготовлення елементів робочих частин штампів, їх зношування і середнє значення величини пружної деформації; до других - всі інші похибки.

Вплив неточності роботи штампового оснащення в основному залежить від його конструкції, зокрема від якості виготовлення установки.

Похибки виготовлення штампа є джерелом ряду випадкових похибок, що впливають на точність виготовлення деталі, з якими в певних випадках доводиться рахуватися, як і з похибками зміщення деталі в процес деформування, але похибки виготовлення робочих частин штампа і їх зношування можна обмежити завданням необхідних допусків. Вплив випадкових похибок при гнутті виявляється більш помітно, тому вони виконують головну роль в утворенні більшого сумарного розсіювання розмірів, властивого операціями гнуття. Тому кожна з них повинна бути розглянута докладніше.

Вплив розсіювання розмірів матеріалу за товщиною досить істотно позначається на розмірах.

Пружне повернення деталі після деформування залежить від матеріалу заготовки (заготовки з більшою межею міцності дадуть більше пружне повернення), її товщини, радіусу і кута гнуття (при зменшенні радіусу згинання та при збільшенні товщини заготовки пружне повернення зменшується), сили удару штампа. Пружне повернення досить суттєво впливає на кутові розміри деталі, його величина дорівнює пружній деформації, яка виникає при дії згинального моменту. Для розрахунку величини пружнього повернення різні автори пропонують різні формули і методи його визначення, але в результаті взаємодії багатьох умов впливають на його величину, більш-менш точного методу його визначення не існує. На виробництві вплив пружнього повернення компенсують калібрувальними операціями.

Для підвищення точності і зменшення впливу масштабного чинника доцільно проводити експерименти на моделях, порівнянних за геометричним, масштабним і іншим параметрам, близьким до натурних або безпосередньо на діючому обладнанні. За отриманими результатами встановлюються закономірності і уточнюється математична модель процесу з використанням відомих методів математичної статистики, планування експерименту та регресійного аналізу.

Так як розробка чисто аналітичних моделей ударно-динамічних процесів ускладнена через складність обліку динаміки хвильових процесів і течії матеріалу при пластичному високошвидкісному

деформуванні, то у разі вирішення окремих прикладних задач зазвичай доводиться застосовувати спрощення і припущення для зручності інженерних розрахунків, але такі, що не призводять до неприпустимих помилок кількісного і якісного характеру. Тому дослідження зіткнення бойка з передавальним середовищем обмежується аналізом прикладних задач з різного роду спрощенням фізичної і математичної моделі явища гідроудару, які можуть бути застосовані в конкретному випадку. Наприклад, рішення задач розрахунку тиску з урахуванням хвильових процесів в рідині в тривимірному просторі в повному обсязі представляє значні труднощі, тому на практиці необхідно використовувати рішення, засновані на припущеннях, які дозволяють звести цю задачу до плоскої або одновимірної і вирішити її чисельними методами.

З огляду на специфіку ударно-динамічного процесу ПУШ для ресстрації параметрів (тиск, швидкість, переміщення) використовуються сучасні методики, апаратура і обладнання, електричні методи вимірювання тиску.

Експериментальні дослідження характеру пластичного деформування матеріалу проводилися відомими методами вимірювання геометричних параметрів, механічних властивостей і твердості [26, 32, 62, 123].

В основу прийнятої методики експериментальних досліджень точності пневмоударного вирубування-пробивання покладено статистичний метод, заснований на застосуванні законів математичної статистики і теорії ймовірностей. При цьому методі дослідження виробничих похибок штампування листових деталей висновки можуть бути достовірними і об'єктивними, якщо вони ґрунтуються на великій кількості дослідів і спостережень.

Для побудови діаграм визначалися середні значення величини відхилень розмірів деталей в вибірках (тобто середні значення вибірки).

Розміри відштампованих деталей вимірювалися на інструментальному мікроскопі УІМ-21ПК, шорсткість поверхні зрізання визначалася на блискучому паску і на поверхні сколювання за допомогою мікроскопа МІС-11 і профіломера-профілографа моделі 252, величина задирок – мікрометром і оптиметром, що забезпечило при усередненні значень вибірки досягти похибки вимірювань не більше 1 мкм,

відхилення від площини – на повіркових плитах за допомогою індикаторів годинникового типу.

1.6. ВСТАНОВЛЕННЯ МЕТИ І ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз попередніх досліджень представлених в підрозділах 1.1 – 1.3, дозволяє сформулювати мету даної роботи та визначити завдання, вирішення яких забезпечує її досягнення.

Метою роботи є забезпечення розмірної точності та шорсткості поверхонь тонколистових деталей, що виготовляють ПУШ рідиною або еластичним середовищем при виконанні розділових і витягувальних операцій на основі результатів експериментальних досліджень та функціональних залежностей, що описують вплив енергосилових і конструктивно-технологічних параметрів процесів і обладнання на показники якості відштампованих деталей.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. Дослідити умови експлуатації пневмоударного обладнання для штампування рідким та еластичним середовищем і встановити вимоги до визначення конструктивно-технологічних параметрів, що забезпечують розмірну точність та шорсткість деталей, що штампують.

2. Удосконалити технологічну систему ПУШ шляхом доповнення її елементами нової конструкції оснащення, які забезпечують необхідні показники якості відштампованих деталей, та розширюють технологічні можливості в умовах багатомономенклатурного виробництва.

3. Встановити основні фактори та характер їх впливу на перебіг процесу ПУШ для технологічних операцій пробивання-вирубування і витягування;

4. Встановити основні причини виникнення відхилень розмірів деталей, що отримують ПУШ, та провести на основі статистичного аналізу їх класифікацію для операцій пробивання-вирубування і витягування;

5. Дослідити вплив основних конструктивно-технологічних факторів на характеристики точності деталей, що отримані методом ПУШ для операцій витягування та пробивання-вирубування;

6. Отримати аналітичні залежності для розрахунку очікуваної величини систематичної складової відхилення розмірів виробів відносно дійсного розміру робочого елемента штампового оснащення, що дозволить розрахувати скомпенсоване значення номінального розміру робочого елемента для забезпечення показників точності виробів при виконанні операцій витягування та пробивання-вирубання;

7. Проаналізувати техніко-економічні показники і розробити за результатами дослідження рекомендації з проектування технологічних процесів і оснащення для пробивання-вирубання та витягування;

8. Впровадити результати дослідження в умовах діючого виробництва.

1.7. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. Встановлено, що більшість дослідників розглядає вплив виробничих похибок при штампуванні деталей з розмірами до 300 мм і товщиною до 4 мм, які штампують в спеціальних і універсальних штампах з використанням механічних пресів.

2. Виявлено численні протиріччя між матеріалами різних авторів про вплив конструктивно-технологічних факторів на точність штампування.

4. Виявлено, що за основу всіх проведених досліджень взятий однофакторний експеримент, що не дозволяє врахувати одночасний вплив всіх факторів, їх взаємозв'язок між собою, а також не дозволяє математично описати процес штампування і отримати аналітичні залежності параметрів точності операцій від основних факторів таких як: величина зазору між робочими частинами штампа і його нерівномірність; товщина матеріалу, який штампують; міцність і пластичні характеристики матеріалу, який штампують; розміри і форма штампованих деталей; величина зношування робочих частин штампа; зміщення центру тиску штампа; тип штампа.

3. Визначено, що у літературних джерелах недостатньо відомостей з статистичних та експериментальних досліджень з точності пневмоударного штампування, аналітичних залежностей для визначення розсіювання розмірів відштампованих деталей та результуючої точності залежно від комплексного впливу технологічних факторів.

4. Визначено, що у технічній літературі відсутні науково-обґрунтовані дослідження щодо точності, що досягається при пневмоударному штампуванні деталей.

5. Визначено відсутність поглибленого аналізу причин виникнення похибок, пов'язаних зі специфікою методу ПУШ і їх класифікація для операцій вирубування-пробивання.

6. Визначено, що відсутні конкретні дані про умови при яких можливе досягнення більш високих параметрів точності.

7. Визначено, що для широкого впровадження в промислове виробництво технології ПУШ потрібне розроблення нових науково-обґрунтованих підходів до забезпечення точності і якості деталей, що отримуються методом пневмоударного штампування рідиною та еластичним середовищем.

Розділ 2

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПНЕВМОУДАРНОГО ШТАМПУВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ

2.1. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПРОЦЕСІВ ПНЕВМОУДАРНОГО ШТАМПУВАННЯ РІДИНОЮ ТА ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

У випадку підготовки розділювальних і формотворчих операцій листового штампування реалізована технічна система пневмоударного штампування (ПУШ) зводиться до передачі накопиченої при розширенні газу енергії бойку, що взаємодіє згодом з передавальним середовищем (рідиною або поліуретаном). Збуджене імпульсне навантаження при цьому забезпечує формоутворення деталі по матриці (пуансону) [105].

Для заготівельно-штампувального виробництва при отриманні складно-рельєфних тонколистових деталей ПУШ розроблена структура технологічної системи «заготовка – технологічний процес – деталь» на основі відомого концептуального підходу [102, 114, 116, 123] побудови технологічних систем для імпульсних методів штампування (рис. 2.1).

ПУШ через особливості технічної системи «пневмоударний блок – технологічний блок» характеризується екологічністю, універсальністю, керованістю, високим рівнем механізації і реалізації різних схем штампування з можливістю широкого включення додаткових елементів інтенсифікації процесу формоутворення. У загальному випадку під процесом формоутворення будемо розуміти процес зміни форми і стану листової заготовки до кінцевого стану (складнорельєфної деталі) на основі застосованої базової технології і перетворень, а також використання необхідних додаткових перетворень (структури, властивостей поверхні тощо).

Визначальними для технологічного процесу пневмоударного штампування є зовнішні фактори імпульсного впливу і внутрішнього процесу формозміни і формоутворення [97, 125].

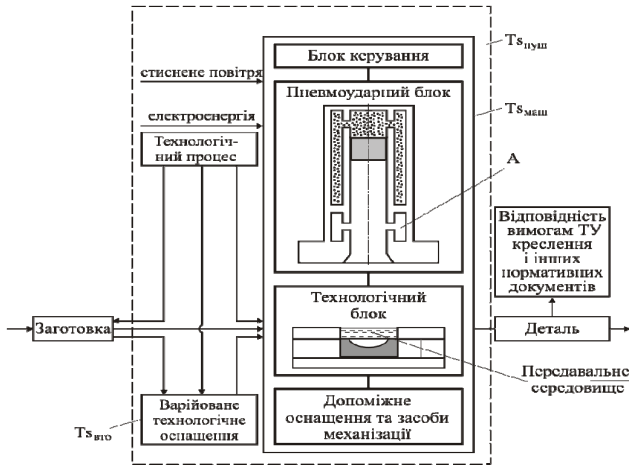


Рисунок 2.1 – Технологічна система пневмоударного штампування листових деталей $Ts_{пуш}$; $Ts_{маш}$ – технічна система – машина імпульсна пневмоударна; $Ts_{вто}$ – варійоване технологічне оснащення

Процес передачі енергії в технологічній системі ПУШ (див. рис. 2.1) можна поділити на два етапи: перетворення енергії стисненого повітря, накопиченого в акумуляторі пневмоударного блоку (ПУБ), в кінетичну енергію бойка і перетворення останньої в роботу деформування заготовки в технологічному блоці (ТБ) через передавальні середовища (рідину або поліуретан). Пневмоударне імпульсне джерело навантаження має такі основні характеристики: кінетична енергія удару бойка по середовищу, що передає; піковий тиск; тривалість імпульсу навантаження; форма імпульсу впливу; поверхня заготовки, що піддається силовому впливу; послідовність, циклічність і характер навантаження елементів заготовки за часом і місцем. Розрахунок енергетичних характеристик процесу описаний у роботах [114, 115].

До числа найбільш поширених способів здійснення зовнішнього впливу на пневмоударне джерело імпульсного навантаження (рис. 2.2) можна віднести: регулювання потрібної кінетичної енергії бойка; варіювання маси бойка (поз. 1); профілювання вхідної частини бойка (поз. 2 і 3); збільшення кількості імпульсів ударної дії за один цикл

роботи обладнання (поз. 4); варіювання співвідношення маси передавального середовища m_p над заготовкою до маси бойка m_b ($\alpha = m_p / m_b$) при ПУШ рідиною; тип передавального середовища (рідина, поліуретан тощо).

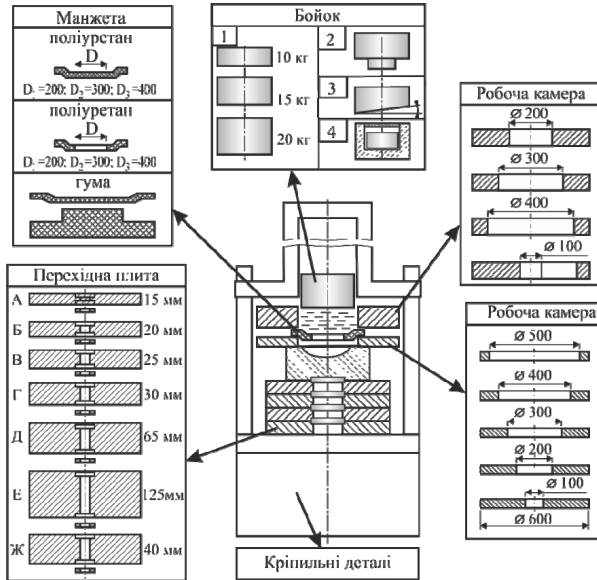


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема переналагодження для машин моделей Т-1324М та ТА1324М

Природно, що серед цілого ряду технологічних завдань може не виникнути питання про використання всього різноманіття зазначених чинників. Тому обмежуються урахуванням головних чинників, серед яких: конструктивно-технологічні особливості деталей, стан поверхні заготовки і оснащення, вид деформування, граничні характеристики енергоприводу (пнемоударного блоку), технологічного блоку та інших зовнішніх факторів, що дозволяють інтенсифікувати технологічні процеси.

Сутність ПУШ рідиною ґрунтується на ряді послідовних операцій перетворення енергії стисненого повітря в енергію удару бойка по

передавальному середовищу, яка згодом витрачається на роботу пластичного деформування заготовки.

Висока точність дозування прикладеної енергії в поєднанні з підвищенням несучої здатності робочого столу ТБ дають можливість розширити технологічні можливості системи пневмоударного штампування і суттєво підвищити параметри точності штампування складнорельєфних тонколистових деталей.

2.2. Обладнання ПУШ і основні технологічні схеми виконання операцій

Дослідження можливостей пневмоударного листового штампування з забезпечення параметрів точності і відпрацювання технології проводилося на базовому обладнанні і спрямовувалось на:

- розширення можливостей енергоблоку за рахунок варіювання маси бойка, форми бойка та кількості циклів навантаження;
- розширення можливостей технологічного блоку шляхом використання змінних елементів і вузлів робочої і допоміжної оснастки;
- збільшення енергоємності шляхом підвищення робочого тиску в акумуляторах в межах допустимих навантажень на конструкцію до 0,75 МПа за рахунок включення в комплекс підживлюючого повітряного компресора продуктивністю не менше 1,25 м³/год. з ресивером місткістю понад 0,5 м;
- підвищення машинної і технологічної гнучкості за рахунок створення переналаджуваного технологічного блоку.

В результаті були модернізовані: технічна система пневмоударного штампування гідросередовищем – Т-1324М і технічна система пневмоударного штампування еластичним середовищем – ТА-1324М. У цих системах введені плаваюча поверхня основи на яку встановлюються переналаджувані підштампові плити, а також введене регулювання зусилля притискання заготовок клиновим притискачем.

В табл. 2.1 та на рис. 2.3 і 2.4 представлені технічна характеристика, конструкція та загальний вид машини моделі ТА-1324М.

В табл. 2.2 та на рис. 2.5 представлені технічні характеристики, конструкція та загальний вид машини моделі ТА-1324М.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика машини Т-1324М

Максимальна енергія удару, кДж	40
Робочий тиск повітря в акумуляторі, МПа	0,12...0,63
Зусилля притискання, кН	600
Число ударів в циклі	1...10
Діаметр вихідного перетину камер, мм	250
Розміри зони під технологічне оснащення, мм	600 × 560 × 320
Діаметр ствола, мм	200
Довжина розгону бойка, мм	1700
Тривалість циклу, с	25
Габаритні розміри машини, мм	2600 × 2000 × 3630
Маса, кг	9000

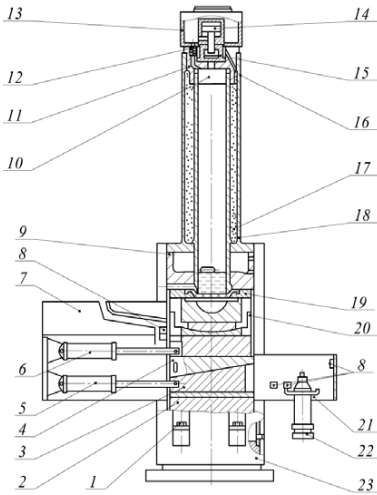


Рисунок 2.3 – Конструкція машини Т-1324М: 1 – анкерний болт; 2 – станина; 3 – клин; 4 – контрclin; 5, 6 – гідроциліндри; 7 – глушник; 8 – кінцеві вимикачі; 9 – робоча камера; 10 – бойок; 11, 19 – фланці; 12, 15 – клапани; 13 – кожух; 14 – пусковий механізм; 16 – цанга; 17 – ствол; 18 – акумулятор; 19 – манжета; 20 – контейнер з сферичною основою; 21 – напрямні; 22 – виштовхувач; 23 – шочи

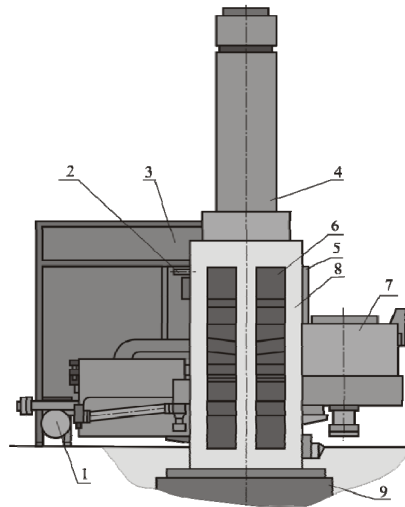


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд модернізованого обладнання моделі Т-1324М: 1 – дозатор; 2 – розводка; 3 – блок приводу; 4 – машина; 5 – електрошкафа; 6 – пневмоударний блок; 7 – технологічний блок; 8 – щока; 9 – фундамент

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики машини ТА-1324М

Максимальна енергія удару, кДж	40
Робочий тиск повітря в акумуляторі, МПа	0,12 ... 0,90
Діаметр ствола, мм	200
Діаметр вихідного перетину камер, мм	200
Хід бойка, мм	1700
Зусилля притискання, кН	600
Тривалість циклу, с	15
Розміри зони під технологічне оснащення, мм	∅300×150
Потужність електроприводу, кВт	0,16
Параметри живлячої пневмомережі:	
тиск, МПа	0,4 ... 0,63
Габаритні розміри машини, мм	1750×1400×3330
Маса преса, кг	4450

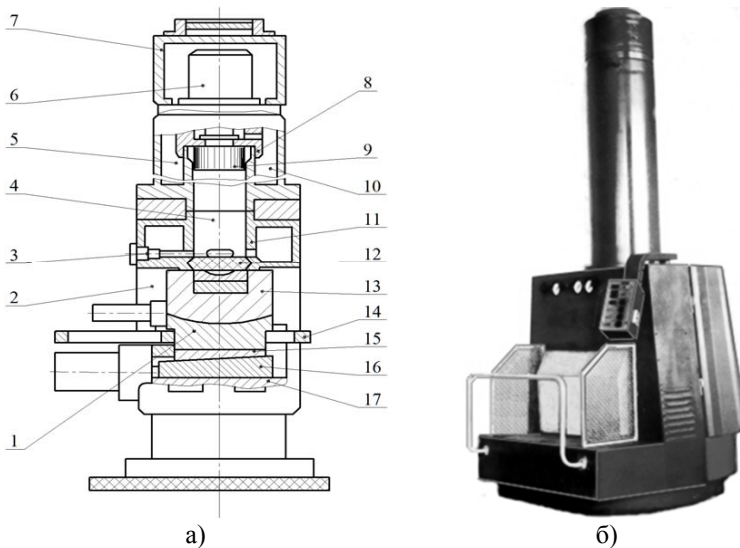


Рисунок 2.5 – Конструкція (а) та загальний вид (б) машини ТА-1324М:
 1 – основа сферичної опори; 2 – щока; 3 – дозатор; 4 – робоча камера;
 5 – енергетичний блок; 6 – механізм пуску; 7 – глушник; 8 – цанга; 9 – боек;
 10 – акумулятор; 11 – ствол; 12 – еластичне середовище (поліуретан);
 13 – контейнер з сферичною опорою; 14 – стіл; 15 – контрклин;
 16 – затискний клин; 17 – основа

Методом пневмоударного штампування рідиною доцільно виконувати різні операції: витягування з плоскої і просторової заготовки, роздавання труб і порожнистих заготовок, обтискання, формування, рельєфне карбування, розділові операції на плоских і просторових деталях, калібрування, складальні операції і тощо [117]. При цьому можливе поєднання різних операцій деформування. Основні схеми листоштампувальних операцій показані на рис. 2.6.

Методом пневмоударного штампування еластичним середовищем (рис. 2.7) доцільно виконувати наступні операції: неглибоке витягування, рельєфне формування, карбування, розділові, складальні і комбіновані операції.

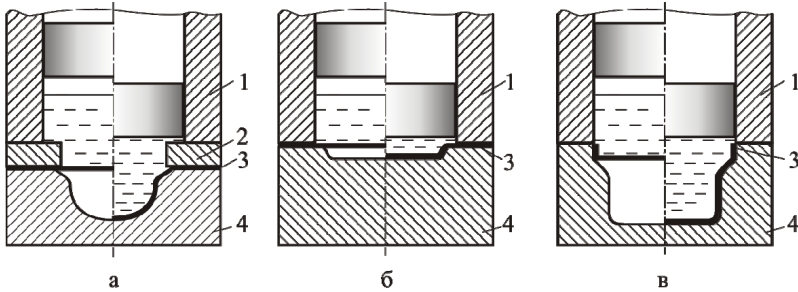


Рисунок 2.6 – Основні технологічні схеми пневмоударного штампування рідиною: а і б – витягування з плоскої і просторової заготовок; в – формування

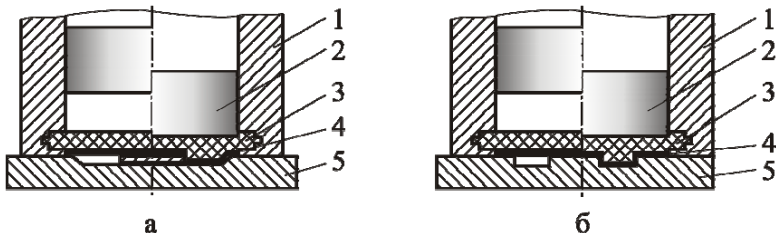


Рисунок 2.7 – Основні технологічні схеми штампування еластичним середовищем (поліуретаном): а – вирубування; б – пробивання; 1 – ствол; 2 – бойок; 3 – поліуретан; 4 – заготовка; 5 – матриця (шаблон)

При пневмоударному штампуванні доцільно застосовувати способи інтенсифікації процесів формоутворення, особливо для отримання складнорельєфних тонколистових деталей.

Основною перевагою методу ПУШ є можливість штампування виробів, які занадто складно виготовити без ручних доводочних робіт або неможливо отримати за допомогою пресового устаткування. Це вироби складного профілю, що виготовляються глибоким витягуванням, формуванням, роздаванням, високоточні деталі, деталі з важкодеформованих матеріалів, а також деталі з полірованих матеріалів без порушення їх поверхневої обробки.

Накопичений досвід експлуатації обладнання для пневмоударного штампування показав, що машини, для штампування рідким середовищем, доцільніше застосовувати для формозмінних операцій, а машини, які штамнують еластичним середовищем – для неглибокого витягування, рельєфного формування і розділювальних операцій.

Операція витягування є однією з найскладніших при всіх методах імпульсного штампування. Процес імпульсного витягування супроводжується значними переміщеннями елементів заготовки, що здійснюються з високими швидкостями. Залежно від конкретних умов витягування частка основних складових частин навантаження (хвильове, квазістатичне) в процесі деформування заготовки змінюється в широких межах [102, 126]. Надважливим є характер розподілу в часі деформуючого імпульсу тиску, але на процес формоутворення заготовки впливає також безліч технологічних параметрів: відношення маси рідини в робочій камері до маси бойка (параметр α), форма і конструкція бойка (суцільний або складений), ступінь витягування, форма і розмір робочої камери, радіус перетяжного ребра матриці, зусилля притискання, вид змащення та інші фактори впливу. Ці обставини значно ускладнюють як математичний опис процесу витягування, так і технологічні дослідження в порівнянні з іншими процесами імпульсного штампування. Однак такі технологічні переваги процесу як: можливість отримання деталей складної конфігурації, включно з матеріалами, які важко деформуються, виробів з підвищеною точністю та якістю поверхонь деталей, скорочення кількості переходів – визначили поширення процесу пневмоударного витягування рідиною. Дотепер найбільшого застосування у виробництві набула схема прямого витягування. Це пояснюється тим, що вона найбільш проста і легко здійсненна практично.

2.3. КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОБИВАННЯ-ВИРУБУВАННЯ ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Енергосилові можливості пневматичних імпульсних машин визначаються кінетичної енергією удару бойка по поліуретановій діафрагмі, її формою і розмірами, фізико-механічними властивостями поліуретану.

Пневматичні імпульсні машини ТА-1324М забезпечують еквівалентний статичний тиск до 120 – 150 МПа. Цього тиску достатньо для вирубування деталей товщиною до 3 мм з $\sigma_B \leq 250$ МПа, до 1,8 – 2,0 мм з $\sigma_B \leq 500$ МПа і до 1,2 – 1,5 мм з $\sigma_B \leq 750$ МПа.

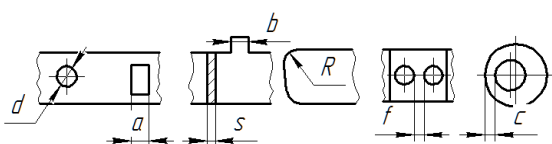
При пробиванні отворів енергосилові можливості машин ТА-1324М визначаються мінімальним відносним діаметром, що пробивається в заготовках з різноманітних матеріалів.

У табл. 2.3 наведені величини отворів, що пробиваються для різних марок і товщини матеріалів при тиску повітря на вході у ресивер $(4,0 - 4,2) \cdot 10^5$ Па, а в табл. 2.4 мінімальні значення геометричних параметрів деталей.

Таблиця 2.3 – Величини діаметрів отворів, що пробиваються для різних марок і товщини матеріалів при тиску повітря на вході в ресивер $(4,0 - 4,5) 10^5$ Па

Марка матеріалу деталі	Діаметрів отворів, що пробиваються, мм							
	Товщина матеріалу, мм							
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	1,8	2,0	2,5
АМцМ	3,6	4,8	5,8	7,0	9,0	11,0	12,0	15,0
Д16АМ	4,4	6,0	7,2	8,5	10,0	12,0	14,4	18,0
Д16АТ	7,5	10,0	12,0	14,4	18,0	-	-	-
Сталь 20	10,0	12,0	15,0	20,0	-	-	-	-
12Х18Н10Т	11,0	14,0	19,0	-	-	-	-	-
ОТ4	11,0	14,0	19,0	-	-	-	-	-
30ХГСА	12,0	15,0	20,0	-	-	-	-	-
У9А	14,0	18,0	22,0	-	-	-	-	-

Таблиця 2.4 – Мінімальні значення геометричних параметрів деталей



Матеріал	S , мм	Діаметр d , мм	Паз a , мм	Виступ b , мм	Радіус скруглення, R , мм	Пере- мичка f , мм	Ширина кільця c , мм
Ст1, Ст2, Ст3, 10, 20, 30, 45, 12Х18Н9Т , 12Х18Н10 Т	0,05	3,6	4,5	1,5	0,1	0,8	1,0
	0,1	3,8	4,8	1,8	0,2	0,9	1,2
	0,3	5,0	5,2	2,5	0,4	1,5	2,3
	0,5	5,5	6,0	3,0	0,7	2,0	3,0
	0,8	6,0	6,2	3,5	1,0	2,5	3,5
	1,0	7,0	7,0	4,0	1,2	3,0	4,0
	1,2	8,3	8,5	4,5	1,5	3,5	5,0
	1,5	11,5	11,5	5,2	2,3	4,2	6,5
	1,6	12,5	12,5	6,0	2,5	4,5	7,0
	1,8	15,0	15,0	7,0	3,5	5,0	9,0
2,0	18,0	18,0	8,0	4,0	6,0	10,0	
М1, М2, М3, Л63, ЛС59, А0, А5, А7, АМц, АМг	0,05	2,5	2,5	1,3	0,1	1,0	0,9
	0,1	2,8	2,8	1,8	0,2	0,9	1,2
	0,3	3,8	3,8	2,2	0,4	1,5	2,3
	0,5	5,5	5,5	3,2	0,7	2,0	2,8
	0,8	6,0	6,0	3,7	1,0	2,5	3,35
	1,0	7,0	7,0	4,0	1,25	3,0	3,8
	1,2	8,0	8,0	4,5	1,5	3,5	4,2
	1,5	9,0	9,0	5,0	2,4	4,2	4,8
	1,6	10,0	10,0	5,3	2,5	4,5	5,0
	1,8	12,0	12,0	6,5	3,0	5,0	6,0
2,0	14,0	14,0	7,0	3,5	6,0	8,0	
БрБ2, Д16Г, 60С2А, 65Г	0,05	2,5	2,5	1,5	0,1	0,8	1,0
	0,1	3,2	3,2	2,2	0,3	1,0	1,3
	0,3	3,8	3,8	2,8	0,5	1,5	2,3
	0,5	5,5	5,5	3,2	0,7	2,0	3,0
	0,8	6,0	6,0	3,7	1,0	2,5	3,5
	1,0	7,0	7,0	4,0	1,2	3,0	4,0
	1,2	8,0	8,0	5,0	1,5	3,5	5,0
	1,5	9,5	9,5	6,0	2,3	4,2	6,0
	1,6	12,0	12,5	7,0	2,5	4,5	7,0
	1,8	15,0	15,0	8,0	3,5	5,0	8,0
2,0	20,0	20,0	9,0	4,0	6,0	10,0	

У разі якщо не забезпечується пробивання отворів з малими відносними діаметрами в умовах серійного виробництва рекомендується встановлювати проміжний ресивер та додатковий компресор з номінальним тиском 10 МПа.

Технологічні можливості пневматичних імпульсних машин можуть бути підвищені шляхом цілеспрямованої зміни напружено-деформованого стану в зоні ріжучої кромки, наприклад за рахунок використання у штамповому оснащенні підпорів різної конструкції або використання бойка зі скошеним під кутом (5^0 – 10^0) торцем, які забезпечують послідовне прикладення навантаження і розділення матеріалу заготовки. В свою чергу це дозволяє отримувати більш якісну поверхню зрізання, а в деяких випадках і вищу точність отриманих виробів [86].

Розділові операції пробивання-вирубубвання економічно ефективно поєднувати з формотворними і калібрувальними операціями: формуванням, гнуттям, карбуванням, калібруванням тощо.

Визначення амплітудно-часових характеристик імпульсу тиску вимагає значних витрат і ставить підвищені вимоги до кваліфікації конструкторів і технологів. Тому рекомендується для розрахунків використовувати відомий для імпульсного обладнання методичний прийом, що дозволяє оцінити енергосилові показники за допомогою еквівалентного статичного тиску. Еквівалентний статичний тиск $q_{екв}$ оцінюється за результатом зіставлення енергосилових параметрів імпульсного обладнання і статичного тиску поліуретану на гідравлічному пресі $q_{ст}$ при досягненні однакових (еквівалентних) технологічних результатів при формуванні, вирубубванні-пробиванні та інших операціях.

В результаті обробки експериментальних даних отримана наступна залежність для ТА-1324:

$$q_{екв} = 250 \cdot q_{ст} \quad (2.1)$$

Ця залежність рекомендується тільки для орієнтовних розрахунків. Рекомендується кожному підприємству, яке має пневматичні імпульсні машини, здійснювати оцінку $q_{екв}$ на початку експлуатації машини, після її модернізації, після ремонту, при зміні розмірів і

властивостей поліуретанової діафрагми і в інших подібних випадках. Методика отримання залежностей $q_{екв}$ доволі проста і не трудомістка.

З використанням матриць з отворами діаметром 2 – 10 мм встановлюється залежність $q_{cm} = f(d/s)$ при пробиванні отворів в матеріалах товщиною 0,5 – 1,5 мм на пневматичній імпульсній машині, а потім залежність $q_{екв} = f(d/s)$ при пробиванні отворів на гідравлічному пресі або шляхом розрахунку q за формулою для пробивання круглих отворів (табл. 2.5).

Зіставивши значення $q_{екв}$ і q_{cm} для однакових значень d/s , отримують $q_{екв} = f(q_{cm})$. Слід звернути увагу на те, що особливого значення набуває точність експериментальних даних при максимальних значеннях q_{cm} . Витрати, пов'язані з цими експериментальними роботами, окупаються в результаті зниження помилок при проектуванні технологічних процесів і оснащення.

Розрахунок тиску стисненого повітря в ресивері пневматичних імпульсних машин в діапазоні $(1,7-4,5) \cdot 10^5$ Па проводиться за допомогою робочої характеристики (динамічне тарування):

$$q_{cm}' = \frac{q_{екв}}{285} \quad (2.2)$$

Тиск поліуретану, необхідний для виготовлення деталей, визначається найбільшою величиною тиску, необхідного для вирубубання зовнішнього контуру деталі або пробивання отворів, пазів і інших конструктивних елементів деталі, що мають найменші розміри.

Тиск, необхідний для пробивання отворів і вирубубання зовнішнього контуру, визначається за допомогою розрахункової моделі, яка наведена у табл. 2.5.

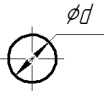

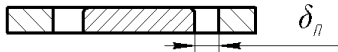
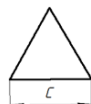
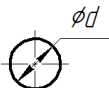
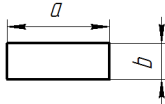
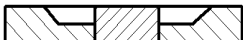


Залежності для розрахунку q при вирубубанні з опорними рамками містять один невідомий параметр δ (величина зазору між опорною рамкою і матрицею).

Параметр q при розробленні технологічного процесу визначається при оптимальній висоті вирубубного шаблону H :

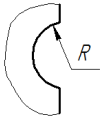
$$H = 2,5(1 + 0,01 \cdot \delta_{10})\sqrt{S}, \quad (2.3)$$

де S – товщина матеріалу заготовки, мм; δ_{10} – відносне подовження матеріалу після розриву, %.

Таблиця 2.5 – Розрахункові залежності для визначення необхідного тиску поліуретану для пробивання-вирубання

Пробивання	
Круглий отвір 	Прямокутний отвір або паз 
Без підпора	
$q = \frac{3,2 \cdot \sigma_B \cdot S}{d}$ при $d \leq 12S$ $q = \frac{2R \cdot \sigma_B \cdot S}{H(2R - H)}$ при $d \geq 12S$	$q = \frac{1,36 \cdot \sigma_B \cdot S}{b} \left(1 + \frac{b}{a}\right)$ при $d \leq 15S$ $q = \frac{\sigma_B \cdot S}{H}$ при $d \geq 15S$
З підпором $q = \frac{1,5 \cdot \sigma_B \cdot S}{\delta_n}$	
Трикутний отвір $q = \frac{6 \cdot \sigma_B \cdot S}{c}$	
Вирубання	
Круглий контур 	Прямокутний контур 
Без опорних рамок $q = \frac{\sigma_B \cdot S}{H}$ $H = 2,5(1 + 0,01\delta_{10})\sqrt{S}$	
З опорними рамками 	
$q = \frac{1,5 \cdot \sigma_B \cdot S}{\delta} \cdot K_\phi$	 $K_\phi = 1,0$ $K_\phi = 0,5$ $K_\phi = 0,7$
Тиск необхідний для вирізання опуклої ділянки контуру деталі 	$q = \frac{0,8 \cdot \sigma_B \cdot S}{H}$ при $R < 2H$
	$q = \frac{2R \cdot \sigma_B \cdot S}{H(2R + H)}$ при $R = (2 \dots 5)H$

Продовження таблиці 2.5

<p>Тиск необхідний для вирізання увігнутої ділянки контуру деталі</p> 	$q = \frac{0,8 \cdot \sigma_B \cdot S}{H}$ <p>при $R < 2H$</p>
	$q = \frac{2R \cdot \sigma_B \cdot S}{H(2R + H)}$ <p>при $R = (2 \dots 5)H$</p>

З умови мінімальної витрати матеріалу на вирубування, використовуючи модель розрахунку q , отримуємо:

$$\delta = \frac{1,5 \cdot \sigma_B \cdot S}{q_{\max}}, \quad (2.4)$$

де q_{\max} – максимальний тиск поліуретану, що створюється у машині. Приймемо його рівним 120 МПа.

З умови мінімуму витрат на експлуатацію обладнання:

$$\delta = \frac{1,5 \cdot \sigma_B \cdot S}{q}, \quad (2.5)$$

де q – де тиск необхідний для пробивання отвору, пазу, що мають найменші розміри (див. табл. 2.5).

При пробиванні отворів з підпорами:

$$q = \frac{1,5 \cdot \sigma_B \cdot S}{\delta_n}, \quad (2.6)$$

де δ_n – величина зазору між підпором та ріжучою кромкою отвору матриці.

Розрахунок розмірів заготовок рекомендується проводити відразу для всієї номенклатури деталей, що переводиться на пневматичні машини.

Це забезпечує можливість найбільш ефективної уніфікації розмірів заготовок з метою зниження витрат на виробництво деталей. Розміри заготовок залежать від форми і розмірів деталей, що вирубуються і поліуретанової діафрагми, кількості деталей, що одночасно виготовляються, їх взаємного розташування і припусків.

Необхідно звернути увагу на критерій «витрата штампувального матеріалу» оскільки поліуретанова діафрагма у ТА-1324 має круглу

форму, а заготовки які використовуються здебільшого прямокутної або квадратної форми в плані

Максимально припустимі розміри сторін квадратних заготовок знаходяться в межах від 141 до 200 мм.

Обрання розмірів квадратної заготовки проводиться залежно від зацікавленості підприємства в скороченні витрат штампувального матеріалу або в підвищенні продуктивності (при декількох деталях, що виготовляються одночасно) або розширенні номенклатури виготовлених деталей за рахунок виготовлення окремих деталей з габаритними розмірами до 140×140 мм у плані та діаметром 200 мм.

Процес вирубубання на еластичній матриці (рис. 2.8) можна поділити на такі етапи:

- відтискання і згинання припуску «*a*» коло гострої кромки під дією поліуретанової подушки до підштампової плити;
- защемлення частини припуску «*b*» з метою запобігання збігу припуску «*a*» до торця копіра-пуансона;
- одночасне розділення матеріалу по контуру копіра-пуансона під дією розподіленого навантаження на ділянці припуску «*c*» (назвемо ділянку активною частиною припуску).

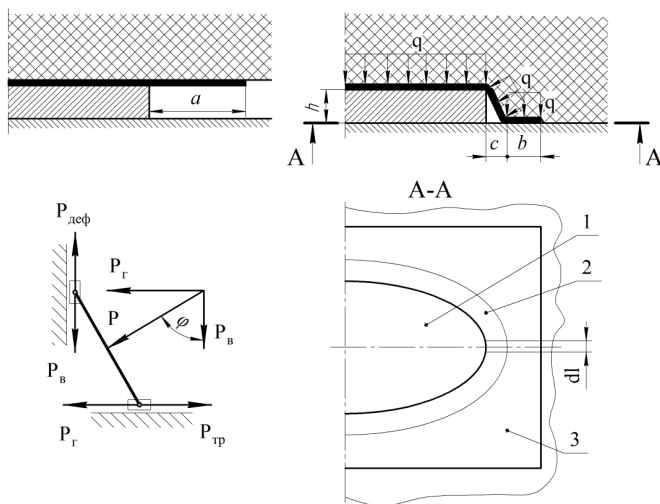


Рисунок 2.8 – Схема вирубубання деталі по контуру на еластичній матриці:

1 – копір-пуансон; 2 – активна площа; 3 – затиснена площа

З рис. 2.8 видно, що під дією вертикальної складової вектора тиску P_6 ($P_6 = P \cdot \cos \varphi = q \cdot c \cdot \cos \varphi$) відбувається поділ матеріалу, а під дією горизонтальної складової вектора тиску P_2 ($P_2 = P \cdot \sin \varphi = q \cdot c \cdot \sin \varphi$) – підтягування припуску до копіра-пуансона.

Урівноваження горизонтальної складової вектора тиску P_2 здійснюється за рахунок сил тертя між затисненою частиною припуску і поліуретановою подушкою.

Для визначення технологічних параметрів даного процесу виокремимо ділянку деформованого матеріалу.

Граничну умову розділення матеріалу на зазначеній ділянці можна виразити таким чином:

$$\left. \begin{aligned} q \cdot c \cdot \cos \varphi \, dl &= \sigma_g \cdot S \cdot K \cdot dl \\ q \cdot c \cdot \sin \varphi &= q \cdot b \cdot \mu \end{aligned} \right\}, \quad (2.7)$$

де S – товщина матеріалу, який вирубають, мм; K – коефіцієнт, що враховує складність деформації (згин, розтяг); q – тиск робочого середовища, МПа; μ – коефіцієнт тертя поліуретану; σ_g – межа міцності матеріалу.

Оскільки визначальною деформацією буде зріз на гострій кромці копіра-пуансона, то гранична умова буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} q \cdot c \cdot \cos \varphi \, dl &= \tau_{zp} \cdot S \, dl \\ q \cdot c \cdot \sin \varphi &= q \cdot b \cdot \mu \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

де τ_{zp} – допустиме напруження на зріз даного матеріалу.

Залежність затисненої частини припуску « b » від активної його частини « c » знайдемо з граничної умови:

$$b = c \cdot \sin \varphi / \mu \quad (2.9)$$

Отже, величину загального припуску « a » можна записати виразом:

$$a = c + c \cdot \sin \varphi / \mu \quad (2.10)$$

Величина $c \cdot \sin \varphi$ змінюється незначно, і для практичних розрахунків її можна прийняти постійною.

Як показали експериментальні роботи, мінімальна величина активної частини припуску дорівнює $c = \pi \cdot h/2$, що відповідає величині кута φ , рівній 45° .

Мінімальний загальний припуск складе:

$$a_{\min} = \frac{\pi \cdot h}{2} + \left(\frac{\pi \cdot h}{2} \cdot \sin 45^\circ \right) / \mu = \frac{\pi \cdot h}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}\mu} \right), \quad (2.11)$$

де h – висота копіра-пуансона, мм; μ – коефіцієнт тертя поліуретану по сталі (для поліуретану марки СКУ-7Л – $\mu = 0,7$).

Потрібний тиск для вирубання по контуру $q_{н.в.}$ виразиться з граничної умови (2.2):

$$q_{н.в.} = \frac{\tau_{зр} S P_{пер}}{F_{акт} \cdot \cos \varphi}, \quad (2.12)$$

де $P_{пер}$ – периметр деталі, мм; $F_{акт}$ – площа дії розподіленого навантаження, під дією якого відбувається розділення матеріалу, мм^2 .

Залежність розрахункового питомого тиску від величини припуску показана на рис. 2.9.

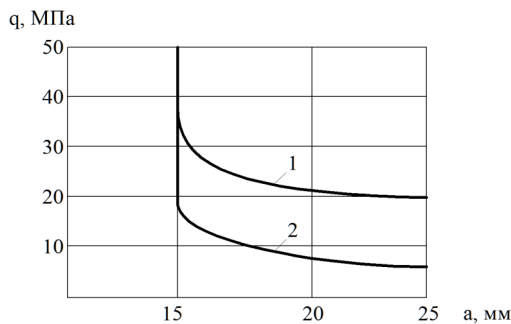


Рисунок 2.9 – Залежність потрібного тиску вирубання від величини припуску і товщини матеріалу:

1 – 12X18H10T, $S = 0,6$ мм; 2 – 12X18H10T, $S = 0,25$ мм

Слід зазначити, що при дуже тонких копірах-пуансонах вирубання не відбудеться – копір-пуансон заформується в матеріал заготовки, тобто процес пройде в зоні пластичних деформацій.

Процес високошвидкісного штампування включає такі етапи: вигин заготовки біля гострої кромки шаблону, зсув частин, що поділяються і вигин припуску з розтягуванням аж до розділення частин (рис. 2.10).

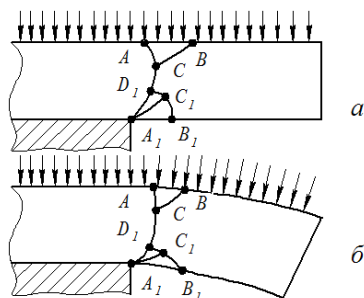


Рисунок 2.10 – Поле ліній ковзання на першому етапі розділення:
а – початковий момент, б – наступний за початковим момент

На першому етапі згинання поле ліній ковзання подібне полю при згинанні широкої смуги (рис. 2.10, а). Відмінністю є дія зосередженої сили уздовж контуру поділу внаслідок деякого відставання заготовки від площини шаблону [139].

Середнє нормальне напруження уздовж АВ буде $\sigma_{AB} = k - q$, а уздовж A_1B_1 $\sigma_{A_1B_1} = -k$ (тут k – опір матеріалу заготовки зрушенню, q – тиск середовища). Трикутні області поверхонь листової заготовки з'єднуються ізольованою лінією ковзання, якщо $k_{ABC} \neq k_{A_1B_1C_1}$ або мають спільну точку розриву напружень при $k_{ABC} = k_{A_1B_1C_1}$. Кут ізольованої кругової лінії ковзання визначимо із співвідношення:

$$\frac{q}{2k} + \varepsilon + \delta = 1, \quad (2.9)$$

де ε, δ – кути віялоподібної фігури $C_1A_1D_1$ і лінії D_1C відповідно.

Збільшення тиску середовища (q) веде до зниження значення суми $\varepsilon + \delta$, тобто до скорочення і відхилення області АВС в сторону припуску, випрямленню дуги D_1C (рис. 2.10, б).

Поле ліній ковзання, що реалізується на другому етапі розділення, показано на рис. 2.11, а. Уздовж контуру bc середнє напруження k , а всередині області abc напружений стан описується залежностями:

$$\sigma_\rho = 2k \ln \frac{\rho}{r}; \quad (2.10)$$

$$\sigma_\varphi = 2k \left(1 - \ln \frac{\rho}{r} \right), \quad (2.11)$$

де ρ, r – радіуси зовнішнього контуру і контуру, на якому знаходиться ділянка яка розглядається; $\sigma_\rho, \sigma_\varphi$ – радіальні і тангенціальні напруження в точці яка розглядається.

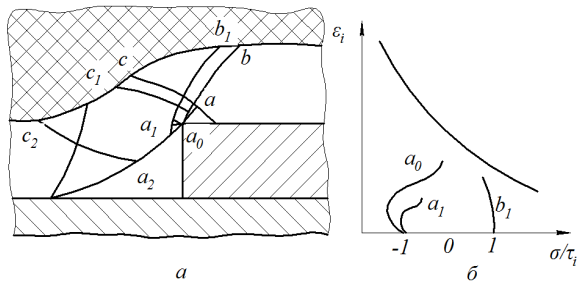


Рисунок 2.11 – Поле ліній ковзання, що реалізується на другому етапі (а) і накопичення інтенсивності деформації зсуву (б)

Напруження розтягування на ділянці bc переходять потім на ділянці c_1c_2 у стискальні. Через це поблизу точки b спостерігається найбільш жорстка схема напруженого стану, що характеризується показником $\sigma/\tau_i = 1$ (τ_i – інтенсивність дотичних напружень; $\tau_i = k$ на лініях ковзання).

Накопичення інтенсивності деформацій зсуву ε_i триває, як показано на рис. 2.11, б. На вторинних стадіях процесу пробивання в околиці точки b_1 (рис. 2.11, а) можлива поява тріщини руйнування, оскільки тут найбільш інтенсивно йде вичерпання ресурсу пластичності. Для малопластичних матеріалів, наприклад БрБ2Т, тріщина зароджу-

ється на поверхні заготовки в околиці точки b_1 і розвивається вздовж лінії ковзання b_1a_1 .

При розділенні пластичних матеріалів руйнування на ранній стадії не відбувається, так як в околиці точки b_1 $\varepsilon_i < \varepsilon_{i\text{дон}}$. Тут $\varepsilon_{i\text{дон}}$ – допустима інтенсивність деформації зсуву при $\sigma/\tau_i = 1$.

У міру проникнення шаблону в заготовку посилюється локалізація інтенсивності деформації у його кромки, тобто в околиці точки a_0 , а також уздовж лінії a_0b . Необхідно зауважити, що на цьому етапі, як і раніше, збільшення прикладеного тиску уздовж вс сприяє скороченню трикутної області abc і відхиленню її у бік припуску.

Зі збільшенням тиску q , зі співвідношення

$$\frac{q' - q}{2k} = \delta + \varepsilon, \quad (2.12)$$

видно, що на поверхні контакту заготовки з шаблоном зростає кривизна сторін трикутника abc , що свідчить про зниження радіуса заокруглення зрізу. Тріщина зароджується у кромки a_0 і розвивається вздовж a_0b , де інтенсивність деформації зсуву отримує найбільший приріст.

Таким чином, залежно від допустимої інтенсивності деформації зсуву може реалізуватися один з двох розглянутих механізмів руйнування, що призводять до характерної форми зрізу. На рис. 2.12 показані приклади зрізів деталей з пластичних (а) і малопластичних (б) матеріалів. Аналіз геометричної форми зрізів у різних матеріалів показав їх хорошу збіжність з передбаченими теоретично. Видно, що керування траєкторією тріщини руйнування шляхом зміни пластичних властивостей матеріалу обмежене.

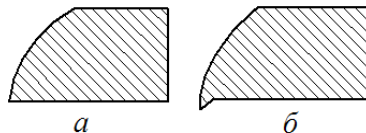


Рисунок 2.12 – Приклади форми зрізу деталей:
а – малопластичних матеріалів, б – пластичних матеріалів

Найбільш ефективними будуть шляхи, що призводять до зменшення стоншування заготовки в зоні вигину до моменту руйнування і зумовлюють доцільне спрямування тріщини або не одночасне прикладення навантаження по контуру заготовки, яку штамнують.

Проведені експериментальні дослідження процесу пневмоударного розділення листового металу еластичним середовищем дозволили встановити шляхи вдосконалення розділових операцій ПУШ, в основу яких покладене поліпшення геометричної точності поверхні зрізу при товщині заготовки до 3,0 мм. Перший напрям реалізується в схемах локалізації осередку пластичної деформації й керування траєкторією тріщини руйнування, відокремлення припуску при невеликих кутах його вигину і зміни схеми навантаження на припуск, який відділяють, а також за рахунок підвищення жорсткості еластичного середовища. У якості еластичного середовища використовувався поліуретан марки СКУ-ПФЛ-100.

Другий напрям – локалізація осередку пластичної деформації забезпечується технологічним оснащенням (рис. 2.13), яке при незначному ускладненні оснащення забезпечує послідовне відокремлення припуску. Цей шлях ефективний для виготовлення деталей вісесиметричної форми в плані.

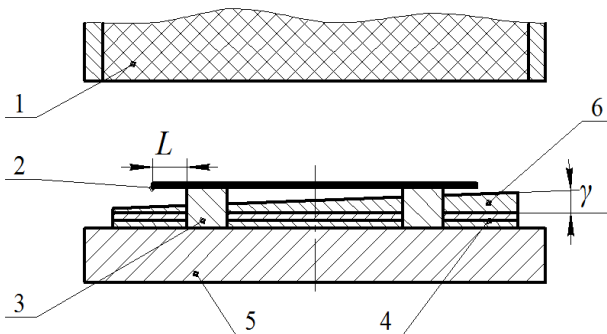


Рисунок 2.13 – Вирізний шаблон, зменшений за допомогою набору пластин:
 1 – поліуретан; 2 – заготовка; 3 – вирізний шаблон; 4 – набір пластин;
 5 – підштампова плита; 6 – скошена пластина;
 γ – кут скошування ($H_1=1,5 \cdot S$, $H_2=(3-4)S$)

Без ускладнення оснащення, локалізацію осередку пластичної деформації можна забезпечити при послідовному відокремленні припуску. Такий характер розділення створюється за рахунок послідовного збільшення тиску еластичного середовища уздовж контуру зрізу. Локалізація тиску забезпечує поділ припуску спочатку лише в одній зоні контуру деталі за рахунок скошеного торця еластичного середовища, що покращує якість і точність поверхні зрізання як при статичному, так і при динамічному навантаженні.

Третій напрям (найбільш ефективний та простий) було реалізовано за рахунок удару по поліуретану скошеного під кутом $5...10^{\circ}$ торця бойка, чим забезпечується послідовне навантаження заготовки (рис. 2.14). У цьому випадку розділення матеріалу заготовки відбувається послідовно по периметру розділення, де більше тиск і найбільш жорстка схема напружено-деформованого стану.

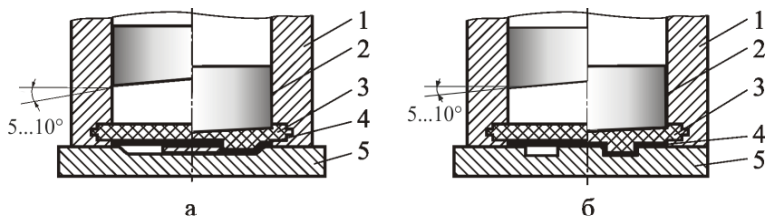


Рисунок 2.14 – Основні технологічні схеми штампування еластичним середовищем зі скошеним бойком (поліуретаном марок СКУ-7Л, СКУ-ПФЛ-100): а – вирубування; б – пробивання, 1 – ствол, 2 – бойок скошений під кутом, 3 – поліуретанова мембрана, 4 – заготовка, 5 – шаблон

Запропоновані і апробовані шляхи вдосконалення пневмоударного штампування бойком зі скошеним торцем, що забезпечує вирубування, пробивання деталей з листових мідних, алюмінієвих сплавів товщиною $0,3...3$ мм і маловуглецевої сталі товщиною $0,5...3$ мм. Шорсткість, що досягається на поверхні зрізання складає $Ra = 0,3...0,6$ мкм, а у випадку високоміцних матеріалів товщиною до $4...5$ мм шорсткість поверхні зрізання сягає $Ra = 0,6...1,0$ мкм.

2.4. КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПНЕВМОУДАРНОГО ВИТЯГУВАННЯ РІДИНОЮ

Основним параметром, що визначає весь технологічний процес витягування, є ступінь витягування.

Граничний ступінь витягування k_{cp} заготовки в умовах пневмоударного навантаження визначається відношенням:

$$k_{cp} = D_{z \max} / d_{вир}, \quad (2.13)$$

де $D_{z \max}$ – максимальний діаметр заготовки, витягування якої можна провести без руйнування за одне навантаження; $d_{вир}$ – діаметр виробу, що витягується.

Іншим параметром, що визначає ефективність і точність процесу витягування, є ступінь потоншення небезпечного перетині виробу. Імпульсні методи формоутворення мають ту перевагу, що завдяки високим швидкостям деформування потоншення може сягати 50 % і більше без руйнування матеріалів. Тому при визначенні технологічних схем витягування необхідно враховувати граничний ступінь витягування разом з радіальною деформацією ε_z в небезпечному перерізі заготовки.

Відомо, що небезпечним перетином при витягуванні виробу за прямою схемою є центр денця, де ε_z досягає свого максимуму, а при схемі витягування з приєднаною масою – радіус переходу між стінкою і денцем.

Найбільшого впливу на граничний ступінь витягування і якість виробів завдають такі фактори:

- стан поверхні і фізико-механічні властивості матеріалу заготовки;
- радіус заокруглення робочої кромки матриці, R_{nm} ;
- відносна товщина заготовки S/D_z ;
- швидкість навантажування заготовки;
- фрикційні властивості матеріалу матриці і заготовки;
- якість змащення;
- багатоударне штампування.

Параметричне рівняння для визначення дійсного граничного ступеня витягування має вигляд [127]:

$$k_{zp,0} = k_{zp,0} \cdot k_{\alpha} \cdot k_r \cdot k_s \cdot k_{mp} \cdot k_i, \quad (2.14)$$

де $k_{zp,0}$ – граничний ступінь витягування, отриманий експериментально в конкретних умовах; k_{α} , k_r , k_s , k_{mp} – коефіцієнти, що враховують вплив швидкості навантаження, радіуса заокруглення матриці, відносної товщини заготовки, наявності змашування і його якості; k_i – коефіцієнт інтенсифікації процесу.

Для більшості застосовуваних матеріалів ступінь витягування знаходиться в межах 1,60...2,15 (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Граничний ступінь витягування $k_{zp,0}$ низки конструкційних матеріалів при пневмоударному витягуванні

Матеріал	Витягування		Матеріал	Витягування	
	одно-ударне	дво-ударне		одно-ударне	дво-ударне
АМцМ	1,94*	2,0 – 2,03	ЭИ878	2,1	2,2 – 2,4
АМг6М	1,87	1,92 – 2,20	ЭИ402	1,97*	2,02 – 2,06
М1М	1,91*	1,96 – 2,00	12Х18Н10Т	2,03*	2,2 – 2,13
АМг3М	1,77	1,82 – 1,9	ЭИ894	2,02	2,1 – 2,15
Л62	1,94*	2,0 – 2,15	ЭП693ВД	1,95*	2,02 – 2,05
30ХГСА	1,45	1,52 – 1,60	ВТ1-0	1,78*	1,81 – 1,85
08кп	1,95*	2,0 – 2,2	ОТ4-1	1,6*	1,62 – 1,7
ЭИ659	1,49*	1,56 – 1,6	ОТ4	1,54*	1,58 – 1,65
Х13	1,92	1,97 – 2,15			

(*) – значення отримані у роботі [109]

Значенню граничного ступеня витягування відповідає тільки одне певне значення питомої енергії удару бойка, що забезпечує повне витягування заготовки. Цей діапазон зменшується зі збільшенням ступеня витягування і наближення його до граничного. Отже,

чутливість матеріалу до надлишкової енергії удару бойка зростає зі збільшенням ступеня витягування.

Технологічні можливості будь-якого методу обробки металів тиском визначаються властивостями матеріалу, конфігурацією деталі та можливостями енерговузла, забезпечення бойками різної форми і конфігурації.

Незалежно від виду передавального середовища технологічні можливості ПУШ визначаються як показниками штампувальної здатності матеріалів в умовах пневмоударного динамічного навантаження (тобто ступенем, максимальним ступенем деформації, енергією формоутворення) так і технічними характеристиками машин для здійснення необхідного формоутворення (рівнем і характером тиску, що розвивається, розміром вихідного перетину робочої камери, розмірами простору для розташування технологічного оснащення, максимальною енергією удару і тривалістю циклу).

Загального показника штампувальної здатності матеріалів для всіх технологічних операцій листового штампування для практичного прийняття рішень не існує. Тому для різних методів штампування для багатьох операцій деформування застосовують свої конкретні показники. Це ускладнює встановлення єдиного підходу до всього різноманіття технологічних операцій, що виконуються досліджуваним методом [128, 127].

Відносна маса бойка α (відношення маси рідини в робочій камері до маси бойка.) має однотипний характер впливу на граничний ступінь витягування для всіх досліджених матеріалів, що дозволяє враховувати цей вплив за допомогою поправкових коефіцієнтів k_α [109]. З огляду, що граничні ступеня витягування визначали при оптимальних значеннях $\alpha - 0,119$, приймемо значення k_α для цього випадку за одиницю, решта значень k_α відповідно дорівнюють:

α	0,177	0,226	0,654	1,822
k_α	0,96	0,94	0,915	0,88

Зменшення відносної маси бойка дозволяє не тільки збільшити граничний ступінь витягування заготовки, а й одночасно знизити рівень радіальних деформацій ε_r в небезпечному перерізі заготовки.

Змінення відносного радіуса заокруглення перетяжної кромки матриці викликає однакові змінення граничного ступеня витягування для всіх досліджуваних листових матеріалів, причому ця особливість спостерігається при різних значеннях α як для прямої схеми витягування, так і для витягування з приєднаною масою. Зважаючи на це з'являється можливість враховувати вплив радіуса r_m на граничний ступінь витягування заготовки за допомогою єдиного коефіцієнта k_r . При цьому $k_r = 1,0$ приймаємо для випадку $r_m = 4S$, так як при цьому значенні радіуса визначали граничні значення ступеня витягування k_{np} . Значення коефіцієнтів k_r складають:

r_m	$2S$	$4S$	$6S$	$8S$	$10S$
k_r	0,99	1,00	1,015	1,05	1,09

Змінення радіусу r_m позначається не тільки на ступені витягування, а й на величині і характері розподілу радіальних деформацій уздовж твірної виробів, що витягуються. Особливо помітний вплив радіус r_m справляє на радіальні деформації донної частини виробу, значення яких можна зменшити майже в три рази, збільшивши радіус r_m с $2S$ до $12S$. Збільшення радіусу r_m сприяє отриманню виробів з більш рівномірною товщиною стінки, причому при $r_m = (8...10)S$ максимальні деформації ε_3 не вищі за 0,20...0,25 і стають порівнянними з деформаціями при витягуванні в звичайних штампах.

Відносна товщина заготовки S/D_3 є основним технологічним параметром, що характеризує геометричні розміри заготовки. Вона визначає жорсткість заготовки, тиск, необхідний для витягування граничний ступінь витягування. Вплив цієї величини на граничний ступінь витягування при звичайному штамповому витягуванні відомий [129]. Але витягування тонколистових заготовок в умовах пневмоударного навантаження має ряд відмінних рис, які можуть помітно змінити характер впливу величини відносної товщини заготовки на граничний ступінь витягування [109, 130].

Відносна товщина заготовки S/D_3 також впливає на характер і величину змін максимальних радіальних деформацій в небезпечному

перерізі зразків (табл. 2.7). В якості критерію цих деформацій використовують відносне потоншення $\Delta S/S_0$, де ΔS – різниця між початковою і кінцевою товщиною матеріалу в небезпечному перерізі.

Таблиця 2.7 – Значення коефіцієнтів k_ε для різноманітних матеріалів

Відносна товщина заготовки, %	АМцМ, Д1АМ, М1М, М1Т, Л62, 12Х18Н10Т, ХН60ВТ, ЭП69ЗВД,	Сталі 08пс, 10кп, 08пс, ОТ4-1, ОТ4, ВТ1-0
2,6 – 2,0	1,01 – 1,00	1,09 – 1,08
2,0 – 1,5	1,00 – 0,97	1,08 – 1,05
1,5 – 1,0	0,97 – 0,92	1,05 – 1,00
1,0 – 0,6	0,92 – 0,87	1,00 – 0,95
0,6 – 0,4	0,87 – 0,84	0,95 – 0,92
0,4 – 0,2	0,84 – 0,82	0,92 – 0,90
0,2 – 0,1	0,82 – 0,80	0,90 – 0,88

Так як закономірність зміни максимальних радіальних деформацій ε_3 при різних умовах витягування однакова, то їх зміну можна описати простою апроксимуючою залежністю:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{3 \max} k_\varepsilon, \quad (2.15)$$

де $\varepsilon_{3 \max}$ – максимально можлива для матеріалу радіальна деформація, визначена в роботах [131, 132, 96]; k_ε – коефіцієнт, що враховує вплив співвідношення k/k_{cp} на ε_3 .

Значення коефіцієнта k_ε при різних значеннях k/k_{cp} складають:

k/k_{cp}	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6
k_ε	0,62	0,4	0,19	0,09	0,08

Запропонована методика дозволила встановити вплив структурних складових системи ПУШ на штампувальну здатність матеріалів. Встановлено, що використання ступінчастого або складеного бойка (рис. 2.2) дозволяє збільшити тривалість прикладання імпульсного навантаження, що сприятливо впливає на перебіг процесу деформації тонколистових деталей. Використання складеного бойка з рухомим внутрішнім елементом забезпечує двохударне прикладання навантаження, що дозволяє за один цикл роботи обладнання виконувати операцію витягування і операцію калібрування, що збільшує штампувальну здатність комбінованих операцій (витягування з пробиванням отворів, витягування з відбортуванням, витягування з роздаванням).

2.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. Встановлені основні принципи формування технологічної і технічної системи для виготовлення тонколистових деталей на основі використання пневмоударного джерела навантаження рідиною і еластичним середовищем та їх особливості для основних технологічних процесів формоутворення листових деталей (витягування, пробивання, вирубування).

2. Визначені раціональні межі застосування процесів ПУШ рідиною та еластичним середовищем.

3. На підставі встановлених показників енергосилових і технологічних можливостей пневмоударних процесів формоутворення визначені критерії ефективності та фактори, що впливають на перебіг процесів формоутворення при ПУШ рідиною та еластичним середовищем, що мають домінуючий вплив на штампувальну здатність та точнісні параметри процесу, головними з яких є:

- напружено-деформований стан матеріалу і граничний коефіцієнт штампувальної здатності при пневмоударному витягуванні рідиною;
- напружено-деформований стан матеріалу і відносні мінімальні діаметри отворів, що пробиваються еластичним середовищем;
- характеристики пневмоударних джерел навантаження;
- технологічні фактори (ступінь деформування, відносна маса бойка α , тип передавального середовища);
- форма рельєфу і конфігурація деталі, яка штампується.

4. Запропонований узагальнений критерій оцінювання ефективності процесу витягування ПУШ рідиною у вигляді параметричної залежності дійсного граничного ступеня витягування від основних параметрів процесу.

5. Встановлено, що зменшення відносної маси бойка α , збільшення відносної товщини заготовки і радіуса перетяжних ребер дозволяють підвищити граничний ступінь витягування та якісні характеристики деталей, які штампують.

6. Визначені критерії оцінювання енергосилових можливостей ПУШ еластичним середовищем та їх технологічні можливості при операціях пробивання-вирубубвання (розміри отворів, що пробиваються і деталей, які вирубуються, а також мінімальні розміри їх конструктивних елементів).

7. Встановлено, що використання бойків різної маси, конфігурації (перпендикулярний або скошений до осі бойка торець), конструкції (суцільний або складений з рухомим внутрішнім елементом) впливають на характер і форму навантаження заготовки, що дозволяє підвищити ефективність, точність і якість процесів ПУШ.

Розділ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗМІРНОЇ ТОЧНОСТІ ВИРОБІВ ПРИ ВИКОНАННІ РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ ПНЕВМОУДАРНИМ ШТАМПУВАННЯМ

3.1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПНЕВМОУДАРНОГО ВИРУБАННЯ-ПРОБИВАННЯ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Спосіб виготовлення листових деталей шляхом поділу матеріалу на штамповій оснастці, в якій в якості робочого середовища використовується поліуретан, полягає в тому, що заготовка у вигляді листа піддається фізичному впливу з боку жорсткого середовища (копір-матриця) і з боку еластичного середовища (поліуретан-пуансон), в результаті чого після відокремлення матеріалу заготовка приймає форму і розміри копір-матриці [133–137].

Оскільки поліуретан має більш високі фізико-механічні властивості ніж гума, то він здатний витримувати великі тиски, тому розділювальні операції еластичним пуансоном набувають нової якісної сторони [133].

У разі використання при ПУШ поліуретану, як передавального середовища, перевагу необхідно надавати виконанню наступних розділювальних операцій: пробивання, вирубування, обрубання, їх сполученням з формотворчими операціями (витягування, формування). В цьому випадку основна перевага методу – одночасність притискання та поділу металу по всьому контуру, що вирубується незалежно від його форми. Ця особливість, безсумнівно, сприяє отриманню більш якісної поверхні поділу, збільшенню точності одержуваних отворів [137].

Наявність еластичної матриці, величина і короткочасність прикладання імпульсного навантаження визначають специфічну схему напружено-деформованого стану (НДС) в процесі розділення. Вже в початковий момент прикладання навантаження відбувається певний прогин заготовки і незначне занурення ріжучої кромки в оброблюва-

ний матеріал. При подальшому русі заготовки НДС в зоні деформації весь час змінюється, тому стає доступним лише якісний аналіз цього стану до моменту руйнування.

Технологічні можливості вирубування-пробивання плоских деталей оцінюються допустимими розмірами і показниками якості деталей, що виготовляються, а також енергосиловими можливостями пневмоударного обладнання.

Максимальні габаритні розміри деталей, що вирубуються, визначаються формою і розмірами поліуретанової діафрагми, величинами припусків для виготовлення деталей. Наближено допустимі габаритні розміри штампованих деталей, що вирубуються на ТА-1324М, наведені у табл. 3.1.

Поліуретан СКУ-7Л дозволяє проводити вирубування при найбільш оптимальних тисках – в межах 200...250 МПа. В умовах такого тиску можна довести товщину копір-пуансонів до 1,5...3,5 мм і відповідно зменшити величину припусків на обрізання.

Таблиця 3.1 – Досяжні габаритні розміри штампованих деталей, що вирубуються на ТА-1324М

	Товщина деталі, мм						
	0,1	0,3	0,5	1.0	1,5	2	2,5
Максимальний габаритний розмір деталі, мм	192	191	190	185	179	170	163

Якість зрізання для матеріалів товщиною до 0,5 мм не поступається якості зрізання при вирубуванні на жорстких штампах. Якщо матеріал товщий, кромка деталі з боку, що контактує в процесі вирубування з еластичною матрицею, округляється. Радіус округлення залежить від механічних властивостей матеріалу, який вирубують і його товщини.

Вирубування по контуру здійснюється успішно, якщо дотримані дві основні умови:

а) питомий тиск, що створюється в контейнері, достатній для операцій розділення;

б) припуск, мінімальна величина якого залежить від висоти копіра-пуансона, обраний з урахуванням зміни розмірів заготовки в процесі виконання операції.

3.2. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ПОХИБОК ПРИ ПНЕВМОУДАРНОМУ ШТАМПУВАННІ ДЕТАЛЕЙ ЕЛАСТИЧНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ, ТОЧНІСТЬ ШТАМПУВАННЯ РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

У машинобудуванні виробничими похибками називають відхилення різного роду параметрів реальних деталей від номінальних даних, зазначених у кресленнях і технічних умовах.

Похибки які виникають при обробітку партії деталей, можна розділити на дві групи: випадкові (похибки переміщення, незакономірні) і систематичні, що викликають однакові відхилення всіх деталей в партії.

Більшість факторів, що викликають виробничі похибки, є чисто випадковими, особливо якщо їх віднести до виробничих партій. Дія ж систематичних факторів виявляється в зсуві всієї області розсіювання відхилень.

Причини, що викликають виробничі похибки при пневмоударному штампуванні чисельні і різноманітні.

До них відносяться:

1) похибки обладнання, як-то: недостатня жорсткість станин і фундаментів, порушення режиму змащення тощо;

2) похибки інструменту, такі як: зношування і недостатня жорсткість робочих елементів (матриця, пуансон), затуплення ріжучих кромок, неточності виготовлення базових, корпусних, тримачів, фіксаторів і робочих елементів;

3) неоднорідність матеріалу і конструктивні особливості заготовки деталей;

4) похибки виконавця, зокрема: при установленні і закріпленні штампового оснащення на столі преса, при фіксації заготовки або деталі в оснащенні.

До деталей з тонколистових матеріалів висуваються жорсткі вимоги щодо якості. Якість поверхні деталей суттєво впливає на їх надійність в процесі експлуатації.

За своїм виглядом і природою утворення дефекти на деталях, відштампованих в штампах з еластичною матрицею, можуть бути зведені до чотирьох основних груп:

- вм'ятини на поверхні деталі (відхилення від площинності);
- однобічне заокруглення кромки деталі;
- зависання відходу;
- відхилення від форми і розмірів.

Практика показує, що на величину дефектів, що спостерегаються одночасно впливають декілька факторів:

- 1) вид матеріалу і режими термічної обробки;
- 2) конструктивні особливості деталей (діаметри отворів, величина гострих кутів, величина радіуса заокруглення гострих і прямих кутів, величина перемички між отворами і кромками деталей, ширина пазів);
- 3) залишкові напруження після деформування;
- 4) технологічні умови виробництва (питомий тиск, тип інструменту та обладнання, схема вирубування-пробивання).

При використанні штампів з еластичною матрицею на поверхні деталей, відштампованих з листа, часто з'являються вм'ятини на кшталт дрібних точок.

Найдрібніші частинки, що утворюються в зоні розділення металу, занурюються у поверхню еластичної матриці. Оскільки питомий тиск матриці з поліуретану діє по всій поверхні деталі, яку вирубають, то ці дрібні частки залишають глибокий слід на поверхнях деталей.

Дефект легко усунути шляхом видалення сторонніх часток з поверхні еластичної матриці, площини бойка і копіра-пуансона м'якою щіткою.

Слід особливо зазначити – щоб уникнути вм'ятин, потрібно строго дотримуватися чистоти поверхні заготовок, еластичної матриці, копіра-пуансона і плоского бойка. В цьому випадку поверхня відштампованих деталей може бути навіть полірованою.

При вирубуванні або пробиванні листових деталей еластичним середовищем на стороні деталі, що стикається з цим середовищем, по периметру зрізу виникає радіусне заокруглення кромки.

На величину заокруглення кромки (утягування) впливають:

- 1) вид матеріалу і його стан;
- 2) товщина матеріалу;
- 3) конструкція копіра-пуансона.

Так як товщина заготовок, що вирубаються поліуретаном при ПУШ, на сьогоднішній день не перевищує 2,0...3,0 мм, то поділяти заокруглення кромки на величину утягування і величину радіуса цього

заокруглення не має сенсу [140]. Надалі обидва будемо називати загальним терміном «утягування».

Якщо пов'язати величину утягування кромки з межею міцності матеріалу, то можна помітити, що зі збільшенням останнього (σ_B) перша зменшується (табл. 3.2). У таблиці матеріали розташовані в порядку зростання величини відношення межі текучості до межі міцності σ_T/σ_B .

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта утягування кромки

Марка матеріалу	σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T/σ_B	k_y
Латунь Л69	60	240	0,25	0,800
Мідь М1, М2, М3	70	240	0,29	0,783
Латунь Л68	100	330	0,3	0,750
Бронза БрОЦ 4-3	110	360	0,3	0,750
Алюмінієвий сплав АМцМ	55	135	0,4	0,675
Алюмінієвий сплав АМД і АМД1	35	95	0,37	0,694
Бронза БрОЦС 4-4-2,5	130	310	0,42	0,658
Бронза Бр 5	160	380	0,42	0,658
Латунь ЛО62-1	180	380	0,47	0,619
Сталь 1Х18Н9Т	350	750	0,47	0,619
Латунь Л90	130	260	0,5	0,600
Сталь Х13, 3Х13	315	600	0,53	0,575
Бронза БрОФ 6,5-0,15	220	400	0,55	0,558
Сталь Э, ЭА, ЭАА	170	300	0,57	0,544
Магнієвий сплав МА1-М	120	210	0,57	0,544
Сталь 10Г, 2А, 25, ХГСА, 30ХГСНА	395	625	0,63	0,500
Сталь 08кп, 10, 15, 20	270	430	0,63	0,500
Магнієвий сплав МА2-1М	200	290	0,69	0,456
Магнієвий сплав МА8-М	190	260	0,73	0,425
Бронза БрАМц9-2	300	400	0,75	0,408
Алюмінієвий сплав АМц	135	165	0,82	0,365

Слід зазначити: за цим відношенням матеріали одного і того ж класу значно відрізняються один від одного. Наприклад, для латуні Л62 $\sigma_T/\sigma_B = 0,25$, а латуні Л90 – 0,5, для алюмінієвого сплаву АМцМ $\sigma_T/\sigma_B = 0,35 \dots 0,4$, а алюмінієвого сплаву АМцП – 0,75...0,8.

На величину утягування кромки, як уже було зазначено, впливає товщина заготовки, яку штамнують (S). При $S < 0,5$ мм цьому впливу значення не надають (воно занадто мало). Величина утягування кромки значно зростає зі збільшенням товщини заготовки за зазначену межу ($S > 0,5$ мм). Це показує залежність зміни величини k_y від σ_T/σ_B (рис. 3.1).

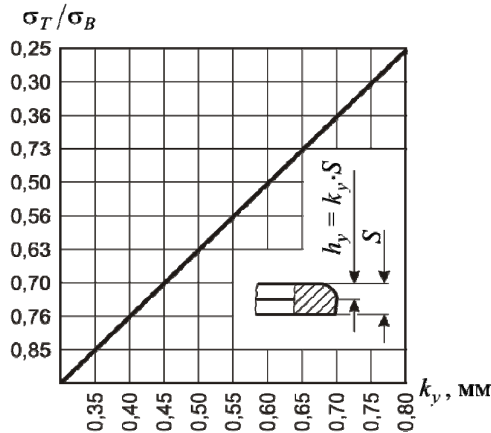


Рисунок 3.1 – Графік зміни коефіцієнта утягування кромки залежно від σ_T/σ_B

Висота копіра-пуансона мало впливає на величину утягування кромки деталі і в розрахунках її можна не враховувати.

Якщо в конструкції копіра-пуансона (рис. 3.2) враховано одночасне застосування периферійного шаблону, то величина утягування кромки буде меншою. Ця величина залежить від ширини щілини « c' » між копіром-пуансоном і периферійним шаблоном. Дослідження показали, що зі збільшенням щілини « c' » величина утягування зростає, але не більше ніж 25...30 % від загальної величини утягування при штампуванні деталі без периферійного шаблону.

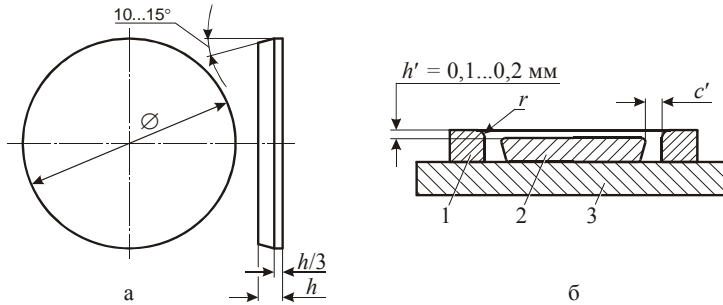


Рисунок 3.2 – Копіри-пуанسونи: а – простий; б – з периферійним шаблоном: 1 – периферійний шаблон; 2 – копір-пуансон; 3 – плита основи; c' – зазор між копір-пуансоном і опорним шаблоном; r – радіус кромки периферійного шаблону; h' – різниця висот копіра-пуансона і периферійного шаблону

Таким чином, розробляючи технологічний процес вирубування-пробивання деталей у штампах з еластичною матрицею, слід звертати увагу на два основні чинники, що впливають на величину утягування кромки – співвідношення σ_T/σ_B і товщини заготовки яка вирубасться.

Один з характерних дефектів, що знижує якість деталі, – це зависання відходу. Цей дефект можна попередити, якщо будуть дотримані (обрані):

- оптимальне співвідношення діаметра отвору d до висоти копіра-пуансона;
- відповідні вид матеріалу і його стан;
- хороший стан ріжучої кромки копіра-пуансона;
- вдала конструкція копіра-пуансона.

Якщо в деталях, що виготовляються в штампах з еластичною матрицею з поліуретану, наявні отвори, то обов'язково має бути витримана умова

$$d_{омв}/H_k \geq 2,5, \quad (3.1)$$

де $d_{омв}$ – діаметр отворів, мм; H_k – висота копіра-пуансона, мм.

При співвідношенні $d_{омв}/H_k \leq 2,5$ відбувається зависання відходу в отворах.

Практика застосування аналізованого методу показала, що при штампуванні за допомогою одного копіра-пуансона партії деталей обсягом до 1000 – 1800 деталей зависання відходу не спостерігалось.

Отримання правильної форми деталі з розмірами згідно до креслень (особливо складних по конфігурації) – основне завдання в проектуванні технологічного процесу і виготовленні деталі.

Відхиленнями від форми і розмірів вирубуваної деталі можуть бути:

- неправильність геометричних форм деталі (замість кола – еліпс, замість квадрата або прямокутника – паралелепіпед, теж відноситься і до отворів);

- потоншення (утягування) в перемичках між отворами і між отвором і зовнішнім контуром деталі;

- невідповідність розмірів в пазах деталей і на її виступах розмірам, зазначеним в кресленні;

- кутовий зсув елементів понад допустимий;

- невідповідність розмірів зовнішнього та внутрішнього контурів деталі розмірам, зазначеним в кресленні.

Від того, наскільки повно і правильно будуть визначені причини відхилення від форми і розмірів деталі, залежить якість штампованих деталей.

На точність форми і розмірів деталей, що виготовляються пневмоударним штампуванням з еластичними матрицями впливають:

- 1) вид і стан матеріалу;
- 2) точність виготовлення копіра-пуансона за формою і розмірами;
- 3) конструкція копіра-пуансона;
- 4) стан поверхні копіра-пуансона і поліуретану;
- 5) співвідношення конструктивних елементів деталей (мінімальна перемичка між отворами і зовнішнім контуром деталі, яка штампується, ширина пазів і виступів деталі, яка штампується).

Слід особливо зазначити, що відхилення форми як внутрішнього, так і зовнішнього контуру деталі від заданої кресленням пов'язане з порушенням точності виготовлення копіра-пуансона, так як практика впровадження показала, деталь, яку штамнують, за розмірами і формою повністю відповідає копіру-пуансону. Малопластичні матеріали добре зберігають форму і розміри, що надаються їм при

штампуванні. Вони майже не схильні до утягування в місцях перемичок між отворами і між отворами і зовнішнім контуром деталі та на вузьких виступах. Пластичні ж матеріали, навпаки, сильно схильні до цього явища, через що деталі, які штампують, часто відбраковуються. Для пластичних матеріалів повинна бути витримана умова $a/S \geq 6$, де a – перемичка між отворами і зовнішнім контуром деталі. Для деталей з малопластичних матеріалів співвідношення $a/S \geq 3$.

Зменшення перемичок при вирубуванні деталей з отвором, близько розташованим до зовнішнього контуру деталі, або при вирубуванні кільцевих деталей найчастіше відбувається у силу того, що зусилля, необхідні для вирубування зовнішнього і внутрішнього контурів деталі, неоднакові і значно відрізняються один від одного.

Величина зношування копіра-пуансона і пробивної матриці у кожному конкретному випадку визначалася нами експериментальним шляхом.

Вирубний копір-пуансон знаходиться у контакті з поверхнею заготовки на ділянці висотою h , яка за експериментальними даними становить – $0,3S$.

При вирубуванні і пробиванні без притискання матеріалу розміри контурів, що вирубуються і пробиваються змінюються не тільки за рахунок зношування ріжучих елементів, але і у результаті відпружинювання матеріалу деталей.

Залежно від стану і товщини матеріалу отримується різне його відпружинювання. Чим менш міцний матеріал, тим менші абсолютні значення відхилень вирубаних деталей від номінальних розмірів виробів.

Зі збільшенням відносної товщини металу S/D максимальне значення похибок зменшується.

Вплив анізотропії металу на поверхню при вирубуванні-пробиванні полягає в тому, що механічні властивості його у різних напрямках пробивання не однорідні: у поздовжньому напрямку прокатки показники міцності нижче ніж у поперечному напрямку, а пластичні показники, навпаки, вище. Це справляє певного впливу на пружні деформації і на відхилення розмірів вирубаних деталей від номінального діаметра виробу.

При цьому слід зазначити, що в зв'язку зі складністю визначення величини внутрішніх напружень, що викликані анізотропією, вплив її на результуючу точність штампування вивчено вкрай недостатньо.

На точність штампування певний вплив мають коливання розмірів заготовки по ширині і товщині: перші призводять до того, що перемички між деталями, що вирубують і по краях смуги виявляються неоднаковими, що призводить до спотворення форми деталей і розсіюванню розмірів; другі призводять до досить значних коливань деформацій.

За своїм характером вище перелічені похибки слід віднести до випадкових похибок.

Похибки пов'язані з неточністю фіксації і базування, виникають у разі використання фіксації заготовок за трафаретами або упорів без додаткового примусового притискання до базових поверхонь. В даному випадку числове значення похибок базування не повинне перевищувати поле допуску на розміри контурів заготовки, за якими здійснюється фіксація. Похибку базування слід враховувати, як випадкову похибку, яка підпорядковується закону нормального розподілу.

Похибки пов'язані з впливом залишкових напружень після деформування при ПУШ, як показали проведені експериментальні дослідження [141] незначні.

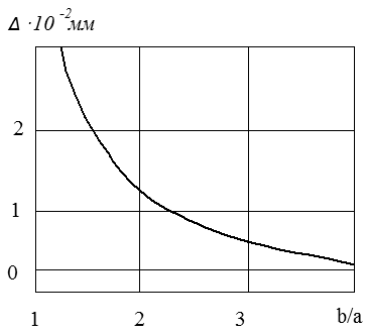


Рисунок 3.3 – Зміна діаметру пробитого отвору Δ залежно від відношення b/a

При цьому інтенсивність спотворення діаметра монотонно знижується при збільшенні відношення b/a (b – ширина смуги, a – діаметр отвору), а при $b/a > 4$ спотворення розмірів, що розглядається прямує до постійного теоретичного значення. Збільшення діаметру пробитого отвору Δ уздовж осі смуги залежно від відношення b/a показано на рис. 3.3.

Також визначені причини виникнення виробничих похибок їх характер та ступінь впливу на розмірну точність відштампованих деталей. У табл. 3.3 представлений класифікатор виробничих похибок, що виникають при виконанні операцій вирубкування-пробивання ПУШ.

Таблиця 3.3 – Класифікація виробничих похибок

Причини похибки	Характер похибки	Ступінь впливу
Пружне повернення матеріалу деталі	систематична	істотна
Зношування робочих частин	систематична	домінуюча
Неточність виготовлення оснащення	випадкова	незначна
Неточність фіксації заготовки (деталі)	випадкова	незначна
Анізотропія матеріалу заготовки	систематична	незначна
Розсіювання розмірів за габаритами і товщиною матеріалу	випадкова	істотна
Наявність залишкових напружень	систематична	незначна
Затуплення ріжучих кромek робочих частин	систематична	істотна

Методика дослідження

В основу прийнятої методики дослідження покладено статистичний метод, що базується на застосуванні законів математичної статистики і теорії ймовірностей. При цьому методі дослідження виробничих похибок штампування листових деталей висновки можуть бути достовірними і об'єктивними, якщо вони ґрунтуються на великій кількості дослідів і спостережень.

Істотна перевага цього методу полягає в тому, що він дозволяє визначити більш точно кінцеві похибки, що є сумою випадкових і систематичних похибок. В основі статистичного методу лежить отримання і аналіз кривих розподілу виробничих похибок.

Виробничі похибки за своєю суттю є величинами випадковими, підпорядкованими загальним законам теорії ймовірностей і математичної статистики, через що вивчення виробничих похибок слід вести

саме статистичними методами. За загальноприйнятою методикою спочатку будуються діаграми спостережень за показниками точності деталей, встановлюється їх тип, визначаються основні фактори що впливають на параметри точності, а згодом визначається сумарний вплив усіх виявлених факторів на параметри точності виробів штампування.

Так, як при пневмоударному штампуванні економічно доцільні партії деталей знаходяться в межах 500 – 5000 штук, діаграма точності складається з вибірок обсягом 150 штук, які відбираються з кожних 1000 відштампованих деталей. Діаграми показників точності будувалися для кожного типу штампового оснащення. Для цього визначалися середні значення величини відхилень розмірів деталей в вибірках (тобто середні значення вибірок).

Розміри відштампованих деталей вимірювалися на інструментальному мікроскопі УІМ-21ПК, шорсткість поверхні зрізання визначалася на блискучому паску і на поверхні сколювання за допомогою мікроскопа МІС-11 і профіломера-профілографа моделі 252, величина задилок – мікрометром і оптиметром, що забезпечило точність вимірів до 1 мкм, відхилення від площини – за допомогою індикаторів на повіркових плитах.

Як заготовки для дослідження застосовувався листовий матеріал марок: сталь 08кп, алюмінієвий сплав АМг-М, сталь 12Х18Н10Т. Ці листові матеріали широко застосовуються у промисловості для виробів, що виготовляються штампуванням.

Товщина матеріалу змінювалася в діапазоні: від 1 до 3 мм.

Хімічний склад матеріалу, що штампувався встановлювався згідно сертифікату постачальника. Крім того, вибіркового контролю на хімічний склад піддавали одну-дві заготовки з кожної партії деталей. З заготовок, які пройшли контроль за хімічним складом, вирізалися зразки для механічних випробувань.

Для виключення з розгляду систематичних і випадкових похибок, що не пов'язані безпосередньо зі змінами під час виготовлення партії деталей, та мають сталу величину протягом процесу, при сталості його параметрів, вирубання-пробивання проводилось при одному встановленні штампового оснащення, а значення відхилень визначались відносно центра групування миттєвої вибірки, яка відбиралась починаючи з першої виготовленої деталі.

Для додаткової перевірки характеру розподілу розмірів для визначення «миттєвого» розподілу і для генеральної сукупності відбираються вибірки в обсязі 100 штук. В першому випадку шляхом послідовного зняття деталей, що виготовляються на штамповому оснащенні, а в другому з усієї партії за принципом випадкового відбору, тобто після ретельного перемішування всіх відштампованих деталей.

Для встановлення стійкості процесу, визначалися наступні його характеристики: зміщення центру групування $2l_a$ і його відносна величина $\lambda_a = l_a/\sigma_0$, а також незбереження сталості розсіювання $2l_e$ або його відносна величина $\lambda_e = l_e/\sigma_{cp}$, де $l_e = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$, σ_0 – значення параметра розсіювання.

Згідно з викладеною вище методикою були проведені експериментальні дослідження по виявленню впливу зношування різального інструменту (матриць, пуансонів) на характеристики точності процесу вирубання-пробивання при використанні скошеного бойка.

Дослідження проводилися при штампуванні деталей у виробничих умовах розмірами $\varnothing 30, 50, 70, 90$ мм.

Допуски габаритних розмірів деталей задані конструкторською документацією в межах 9 – 11 квалітетів точності. Допуски на товщину листа відповідали стандартам на матеріал.

За якісний критерій зношування штампа приймалися висота задирки на кромці деталі, що вирубасться або отвору, що пробивасться рівна 0,2 мм.

Штампове оснащення (копір-пуансон, або матриця при пробиванні отвору) розроблялось відповідно до положень, викладених у розділі 3.1.

При встановленні величини зношування копір-пуансонів і матриць користувалися лінійним методом вимірювання, тобто відхиленням фактичних розмірів ріжучих частин від їх початкових значень. Вимірювання величини зношування матриць і копір-пуансонів проводилися на інструментальному мікроскопі. Контроль зношування ріжучих частин штампа і висоти задирки проводився через кожні 1000 штук відштампованих деталей.

Результати дослідження параметрів точності деталей при виконанні операцій вирубування-пробивання ПУШ скошеним бойком

Випробування та дослідження виконувались у виробничих умовах експериментального виробництва ХНДІТМ (м. Харків). Для порівняння показників якості виробів, які отримуються при використанні скошеного бойка, з виробами, які отримуються бойком з перпендикулярним торцем, скористаємось результатами досліджень [118, 142].

Матриці і копір-пуанسونи були виготовлені зі сталі У8А з наступною термообробкою до твердості HRC 56-62. В процесі випробувань періодично виконували перешліфовування копір-пуансона, доки не усувався задирок на деталях. У табл. 3.4 [142] наведені результати досліджень зміни висоти задирок при виконанні операцій вирубування-пробивання залежно від кількості відштампованих деталей, а у табл. 3.5 аналогічно для скошеного бойка.

Таблиця 3.4 – Величина задирок на відштампованих деталях, мкм

Матеріал	Товщина матеріалу	Кількість відштампованих деталей, тис. шт.									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Висота задирок, мкм									
АМг-М	1,5	14	16	32	36	50	60	72	-	-	-
Сталь 12Х18Н10Т	1,5	35	58	75	90	115	129	147	-	-	-
Сталь 08кп	2	20	38	48	52	72	89	100	123	129	154
	3	60	78	96	104	120	132	148	164	180	210

Таблиця 3.5 – Величина задирок на деталях відштампованих за допомогою бойка зі скошеним торцем, мкм

Матеріал	Товщина матеріалу	Кількість відштампованих деталей, тис. шт.									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Висота задирок, мкм									
АМг-М	1,5	7	11	19	26	35	40	45			
Сталь 12Х18Н10Т	1,5	27	39	65	67	95	109	117			
Сталь 08кп	2	24	28	40	42	51	69	79	83	103	115
	3	47	55	73	85	103	111	117	131	139	147

Таблиця 3.6 – Відхилення розмірів відштампованих деталей \hat{X} , мкм

№ вибірки	Діаметр деталей, мм										
	30	50	90	30	30	50	90	30	70	50	90
	Сталь 08кп							АМг-М, S = 1,5 мм		12Х18Н10Т, S = 1,5 мм	
	S = 2 мм			0,5 мм	S = 3 мм						
1	16	27	36	13	24	33	45	9	13	23	42
2	17	29	39	13	23	35	45	10	13	24	43
3	15	32	40	15	25	39	50	9	14	36	49
4	18	30	39	12	30	38	53	10	13	33	50
5	19	34	40	13	31	41	48	11	16	36	64
6	17	32	44	15	29	38	52	12	15	39	69
7	19	30	43	14	33	40	54	11	17	40	69
8	25	32	46	15	35	38	55	12	16	41	74
9	24	36	42	18	33	42	51	13	18	48	77
10	27	34	47	16	36	45	56	14	19	53	83

Таблиця 3.7 – Відхилення розмірів відштампованих деталей при використанні бойка зі скошеним торцем \hat{X} , мкм

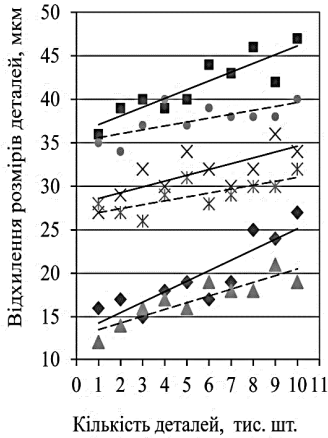
№ вибірки	Діаметр деталей, мм										
	30	50	90	30	30	50	90	30	70	50	90
	Сталь 08кп				Сталь 08кп, S = 3 мм			АМг-М, S = 1,5 мм		12Х18Н10Т, S = 1,5 мм	
	S = 2 мм			0,5 мм							
1	12	28	35	12	22	33	42	9	14	29	43
2	14	27	34	10	23	31	44	8	13	27	46
3	16	26	37	15	23	35	45	9	13	31	44
4	17	29	40	12	26	36	45	9	15	32	48
5	16	31	37	13	23	34	48	8	16	29	51
6	19	28	39	15	27	38	45	9	14	34	51
7	18	29	38	14	24	39	46	10	16	36	54
8	18	30	39	13	26	37	49	11	15	34	53
9	21	30	38	12	28	38	51	9	16	37	54
10	19	32	40	14	30	41	49	11	15	41	51

Виходячи з отриманих результатів (див. табл. 3.4 – 3.7) побудовані діаграми, які характеризують параметри точності процесів вирубування-пробивання пневмоударним штампуванням (рис. 3.4). На представлених точкових діаграмах показані середні значення відхилень діаметральних розмірів у миттєвих вибірках залежно від кількості відштампованих деталей, при використанні бойка з торцем перпендикулярним вісі та бойка з торцем, що скошений під певним кутом до його вісі. З графіків добре видно, що зі збільшенням кількості відштампованих деталей відбувається збільшення відхилень розмірів від їх номінальних значень. Це збільшення пов'язане з зношуванням робочих елементів (копір-пуансонів і матриць).

Отримані залежності можуть бути апроксимовані лінійною функцією. В межах штампування партії деталей до 8 – 10 тис. шт. майже відсутній період припрацювання, а також не спостерігається період прискореного зношування, які мають місце при штампуванні на спеціальному оснащенні.

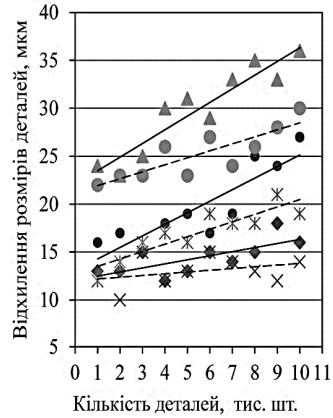
Це можна пояснити специфікою процесу пневмоударного штампування, що відрізняється високими швидкостями деформування і застосуванням в якості одного з робочих елементів (матриці або пуансона) еластичного деформуючого середовища (поліуретану). При цьому розміри копір-пуансонів зменшуються, а розміри матриць збільшуються. Абсолютні ж величини відхилень не залежать від виду операцій, їх величини як при вирубуванні, так і при пробиванні, практично однакові в кожній з узятих вибірок. Аналогічний характер має процес ПУШ у якому використовується боек з скошеним торцем.

Процес ПУШ при виконанні розділювальних операцій відрізняється від процесів виготовлення деталей в спеціальних штампах де розмір виробів при вирубуванні збільшується, а при пробиванні отворів зменшується тим, що в залежності від геометричних параметрів схеми навантаження змінюється напрямок зміни розмірів. При виконанні пробивних операцій в спеціальних штампах відхилення розмірів на 20...30 % більше ніж при вирубуванні [18, 119].



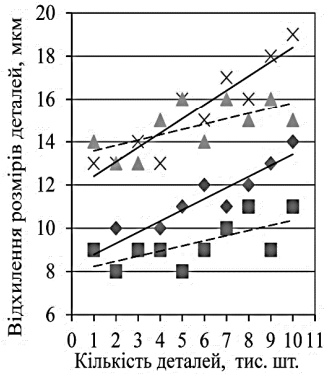
◆ D=30мм × D=50мм
 ■ D=90мм ▲ D=30 мм (ск.б.)
 ✖ D=50 мм (ск.б.) ● D=90 мм (ск.б.)

а)



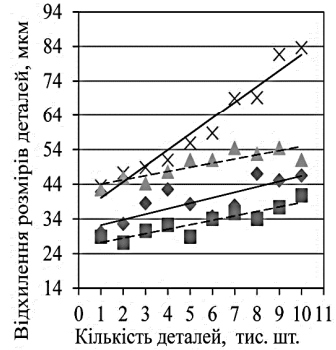
◆ s=0,5 мм ● s=2 мм
 ▲ s=3мм × S=0,5 мм (ск.б.)
 ✖ S=2 мм (ск.б.) ● S=3 мм (ск.б.)

б)



◆ D=30мм × D=70мм
 ■ D=30 мм (ск.б.) ▲ D=70 мм (ск.б.)

в)



◆ D=50 мм × D=90 мм
 ■ D=50 мм (ск.б.) ▲ D=90 мм (ск.б.)

г)

Рисунок 3.4 – Розташування центрів миттєвих вибірок відхилень діаметральних розмірів залежно від кількості відштампованих деталей:

а) сталь 08кп ($S = 2$ мм); б) сталь 08кп ($D = 30$ мм);

в) алюмінієвий сплав АМг-М ($S = 1,5$ мм); г) сталь 12Х18Н10Т ($S = 1,5$ мм);

(ск. б.) – скошений бойок

На рис. 3.5 та рис. 3.6 представлені залежності величини задирок від кількості відштампованих деталей для двох типів бойків. При штампуванні партій деталей в межах 10 тис. шт. ці залежності можна вважати лінійними.

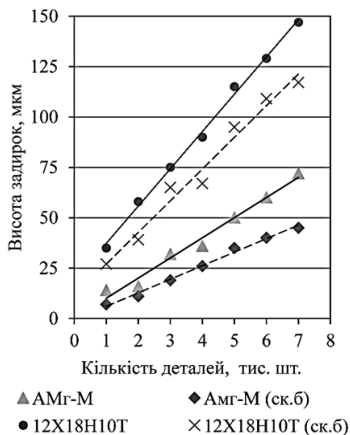


Рисунок 3.5 – Висота задирок при штампуванні деталей $S = 1,5$ мм: сталь 12X18H10T, АМг-М

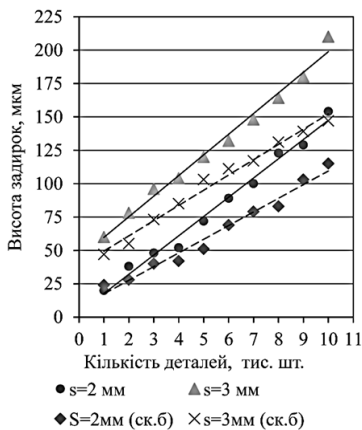


Рисунок 3.6 – Висота задирок при штампуванні деталей зі сталі 08кп

Шорсткість поверхні зрізання відштампованих деталей для сталі товщиною 2...3 мм перебуває в межах 3,2...3,4 (на паску) і 6,3...12,8 (на сколі) і в кількісному відношенні не залежить від кількості відштампованих деталей. У процесі штампування відбувається тільки її якісна зміна, що виражається в деякому згладжуванні розміру поверхні зрізання (блискучий пасок).

Товщина матеріалу, який штамнують, істотно впливає на характер і шорсткість поверхні зрізання. На рис. 3.7 показана зміна висоти блискучого паска залежно від товщини металу, який штамнують. У всіх випадках на поверхні поділу спостерігалися (табл. 3.8) дві чітко окресленні зони: блискучий пасок (зона зрізання) з невеликим заокругленням в кутах; конічна шорстка поверхня (зона сколювання).

Шорсткість поверхні зрізання від товщини матеріалу практично не залежить. При товщині 1,0 – 1,5 мм шорсткість поверхні по блискучому паску перебувала в межах 3,0 – 7,9; при товщині 2,0 – 3,0 мм в межах 3,2 – 8,4.

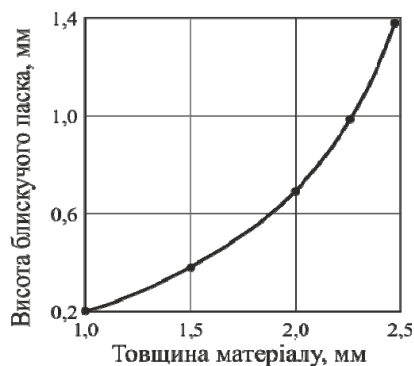


Рисунок 3.7 – Зміна висоти блискучого паска залежно від товщини матеріалу

Таблиця 3.8 – Шорсткість поверхні зрізання відштампованих деталей

Матеріал	Товщина	параметр шорсткості, R_a	
		пасок	скол
Сталь 08кп	2	3,2...6,3	6,3...10,8
	3	6,3...8,4	8,4...12,8
АМг-М	1,5	0,8...1,6	1,6...6,3
Сталь 12Х18Н10Т	1,5	0,9...2,3	1,6...6,3

Висота паска залежить від товщини матеріалу S , що наочно демонструється графіком (див. рис. 3.7). При цьому зі збільшенням товщини понад 2,0 мм висота блискучого паска S_{bl} значно зростає. У той же час величина відносної величини S/S_{bl} зі збільшенням товщини зменшувалася. Для $S = 1,0$ мм вона становила 5,0; $S = 1,5$ мм – 3,75; $S = 2,0$ мм – 2,5; $S = 3,0$ мм – 2,1.

У міру затуплення ріжучих кромek копір-матриці (копир-пуансона) якість поверхні в зоні зрізання погіршувалася.

Інші параметри точності, такі як площинність, відхилення від паралельності в процесі пневмоударного штампування не зазнають

значних змін і за своєю величиною знаходяться в межах: кут сколювання $3^\circ \dots 5^\circ$, прогин деталі – $(0,01 \dots 0,04)$ мм.

Одним з основних факторів, що в умовах пневмоударного штампування визначає зношування копір-пуансонів та домінуючим чином впливає на параметри точності деталей, є марка матеріалу для його виготовлення.

В процесі роботи ріжучі кромки інструменту піддаються змінанню під впливом багаторазово повторюваних ударних навантажень, внаслідок чого з'являються залишкові напруження і деформації, які позначаються на конфігурації і точності відштампованих деталей.

Таким чином, для нормальної роботи інструменту необхідно, щоб він був виготовлений зі сталі, здатної чинити опір великому тиску і ударам та мав високу зносостійкість і зберігав гострі ріжучі кромки без затуплення і викришування якомога довше.

На рис. 3.8 показана зміна зношування копір-пуансона залежно від кількості відштампованих деталей. З рисунка видно, що при штампуванні деталі діаметром $\varnothing 50$ мм зі сталі 08кп товщиною $S = 3$ мм зношування копір-пуансона при виготовленні його зі сталі X12MФ в 1,6 рази менше в порівнянні зі сталлю У8А.

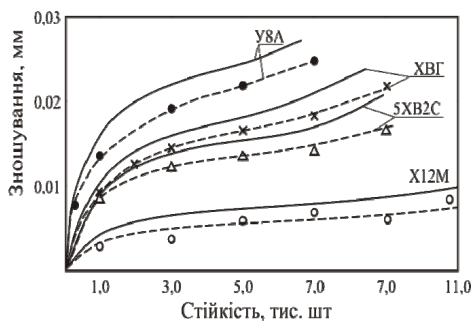


Рисунок 3.8 – Зміна величини зношування копір-пуансона (до перешліфовування) залежно від кількості відштампованих деталей $\varnothing 50$ мм при штампуванні зі сталі 08кп, товщиною 3 мм (---) – бойок зі скошеним торцем

Слід зазначити, що при виготовленні копір-пуансона зі сталі У8А вже після штампування 6,0 тис. деталей, необхідне його перешліфовування, так як величини задирок по периметру деталі досягають свого критичного значення [34].

Аналізуючи діаграми зміни середніх значень миттєвих вибірок (див. рис. 3.4) нескладно пересвідчитись, що в процесі зношування робочих частин штампа середнє значення \bar{X} у кожній наступній вибірці збільшується. Таким чином, під час процесу вирубування-пробивання спостерігається монотонне зміщення центру групування і збільшення розсіювання розмірів. Центр групування визначається як середнє арифметичне всіх дійсних розмірів деталей в вибірці.

При вивченні впливу зношування робочих елементів штампового оснащення на параметри точності штампування показники відхилення розмірів деталей знімалися для кожного нового елемента, а згодом після першого, другого і третього перешліфовування.

Для характеристик розподілу випадкової величини необхідно знати середнє арифметичне значення вибірок з генеральної сукупності \bar{X} , що характеризує розсіювання випадкової величини біля центру групування, а також чисельне значення середньоквадратичного відхилення σ і розмахи відхилень R , які показують наскільки тісно згруповані можливі значення випадкової величини біля центру групування. При нормальній точності процесу розмах генеральної сукупності, що допускається R_0 може дорівнювати δ , тобто $R = X_{\max} - X_{\min} = \delta$, $\sigma_0 = \delta/6$.

З теорії вибірок [144] відомо, що якщо генеральна сукупність має нормальний розподіл, то і розмах R вибірок з цієї сукупності і середньоквадратичне відхилення σ_R будуть пов'язані з параметрами розподілу генеральної сукупності наступними співвідношеннями:

$$\bar{R} = \alpha_n \cdot \sigma_0; \sigma_R = T_n \cdot \sigma_0, \quad (3.2)$$

де α_n і T_n – коефіцієнти, що залежать від обсягу вибірки n .

Тому коливання значень розмахів вибірок лежить в межах, віддалених від \bar{X} на відстані $\pm 3\sigma_R$.

На рис. 3.9 представлена точкова діаграма зміни положення центру групування миттєвих вибірок залежно від кількості відштампованих деталей. На рис. 3.10 представлені діаграми спостережень за $\bar{\sigma}$ і \bar{R} .

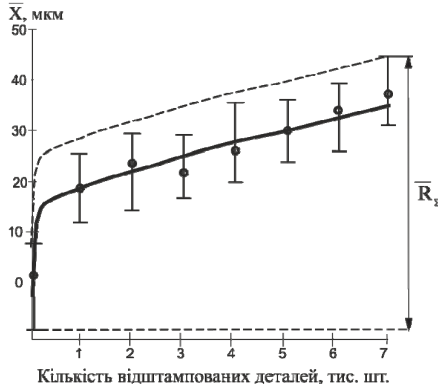
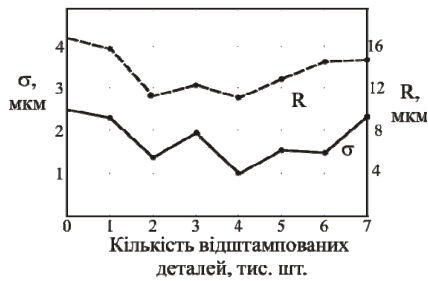
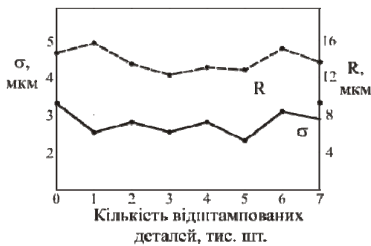


Рисунок 3.9 – Зміна положення центру групування миттєвих вибірок \bar{X} залежно від кількості відштампованих деталей, матеріал сталь 08кп, $D = 90_{-0,1}$, $S = 2$ мм



а)



б)



в)

Рисунок 3.10 – Діаграми зміни параметрів $\bar{\sigma}$ і \bar{R} для операції вирубання:
а – $S = 1,0$ мм, $D = 90_{-0,1}$ мм; б – $S = 2,0$ мм, $D = 90_{-0,1}$ мм;
в – $S = 3,0$ мм, $D = 90_{-0,1}$ мм

Аналіз діаграм для спостережень за \bar{X} , $\bar{\sigma}$ і \bar{R} дозволив встановити, що процес вирубування-пробивання із застосуванням пневмоударного штампування, є стійким за розсіюванням, тобто дисперсія випадкових похибок $\bar{\sigma}^2$ в часі змінюється незначно, а середнє значення \bar{X} закономірно змінюється в часі.

Встановлення впливу перешліфовування копір-матриць (копір-пуансонів) при виконанні операцій вирубування-пробивання проводилося за наступною методикою.

Вибірки обсягом 185 деталей відбиралися з встановленого копір-пуансона (матриці) послідовно. Для усунення з розгляду похибок, що пов'язані з етапом припрацювання опорну вибірку відбирали починаючи від 500 відштампованої деталі. Після чого виконувалось перешліфовування. Вибірки після перешліфовування відбирались після відштампування 50 деталей. Товщина матеріалу, який штампується 1,0; 2,0; 3,0 мм. Марка матеріалу: сталь 08кп.

Отримані при дослідженні дані зведені у табл. 3.9 та представлені на рис. 3.11.

Таблиця 3.9 – Вплив перешліфовування копір-пуансона на \bar{X} і $\bar{\sigma}$

Розмір деталі, мм	Товщина, мм	Кількість перешліфовувань	Обсяг проби, n , шт	\bar{X} , мкм	$\bar{\sigma}$, мкм
$D = 90_{-0,1}$	1,0	1	85	18,7	1,69
		2	85	22,6	1,75
		3	85	27,7	1,83
$D = 90_{-0,1}$	2,0	1	85	34,1	1,86
		2	85	38,5	1,75
		3	85	42,9	2,23
$D = 90_{-0,1}$	3,0	1	85	44,7	3,19
		2	85	49,1	3,23
		3	85	53,8	3,29

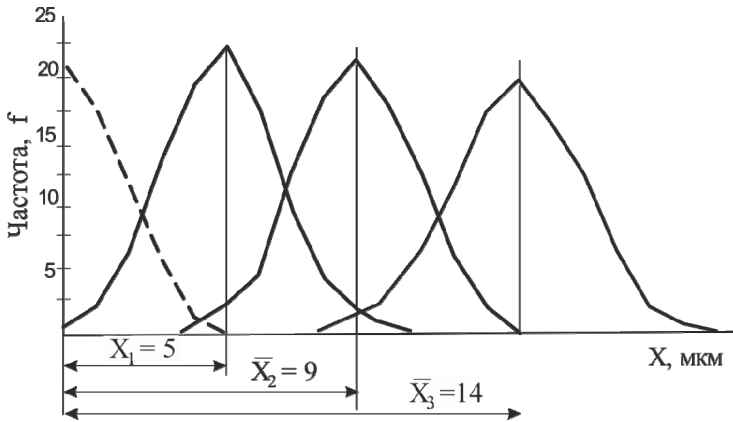


Рисунок 3.11 – Вплив перешліфовування копир-матриці на розсіювання розмірів при вирубванні деталі $D = 90_{-0,1}$ мм, товщиною 1 мм

Аналізуючи графіки можна зробити наступні висновки. Вплив перешліфовування копир-матриці (пуансона) при вирубванні-пробиванні позначається переважно на зміщенні центру групування. Це пояснюється деяким зниженням стійкості ріжучих елементів в процесі перешліфовування. Зсув центру групування перебуває в прямій залежності від числа перешліфовувань.

Так якщо після першого перешліфовування зміщення становило 5 мкм, то після другого перешліфовування воно відповідно становило 9 мкм, а після третього – 14 мкм (див. рис. 3.11).

На розсіювання розмірів при перешліфовуванні істотно впливає товщина матеріалу, який штампують (рис. 3.12). Зі збільшенням товщини матеріалу при кожному наступному перешліфовуванні збільшується зміщення центру групування і інтервал розсіювання розмірів. Як видно з графіків, зміщення центру групування \bar{X} пропорційне товщині матеріалу. Таке інтенсивне зміщення центру групування пояснюється прискореним зношуванням ріжучих частин зі збільшенням товщини металу.

Так само істотно впливають на величину \bar{X} механічні властивості матеріалу, який штампують.



Рисунок 3.12 – Змінення положення центру групування \bar{X} залежно від кількості перешліфовувань і товщини матеріалу

Проведені експерименти дозволяють зробити висновок про те, що характер розподілу похибок миттєвих вибірок для всіх перешліфовувань залишається постійним і відповідає закону нормального розподілу. Але невелика кількість деталей отримана відразу після перешліфовування буде мати збільшене поле розсіювання внаслідок повторного припрацювання копіру.

В процесі виконання розділювальних операцій методом пневмодарного штампування виникають не тільки похибки лінійних розмірів деталей, але і похибки форми, пов'язані з вигином деталей в процесі штампування.

Отримані результати наведені у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Вплив товщини матеріалу і геометричних розмірів на вигин деталі при вирубуванні для скошеного бойка

Товщина металу, мм	Вигин деталі, мм				Обсяг проби, шт.
	$D = 30$ мм	$D = 50$ мм	$D = 70$ мм	$D = 90$ мм	
1,0	0,12	0,12	0,14	0,15	175
1,5	0,07	0,07	0,08	0,12	175
2,0	0,04	0,05	0,06	0,07	175
3,0	0,02	0,02	0,03	0,03	175

Аналіз побудованих за результатами дослідження графіків дозволив встановити, що при роботі без притискання і гострих ріжучих кромках вирішальний вплив на вигин деталей справляє товщина матеріалу і лінійні розміри деталей, які штамнують (рис. 3.13).

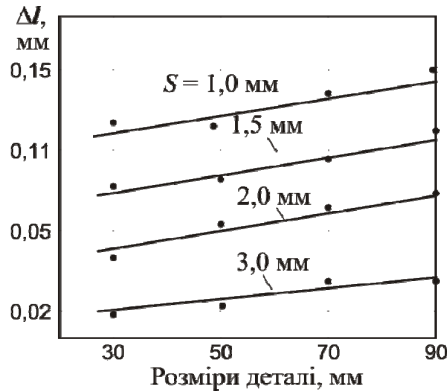


Рисунок 3.13 – Вплив товщини матеріалу і геометричних розмірів на вигин деталі при вирубуванні зі скошеним бойком

Ці величини пов’язані між собою по відношенню до стріли прогину деталі зворотною залежністю. Зі збільшенням геометричних розмірів, при однаковій товщині матеріалу, відхилення від площинності збільшуються і, навпаки, зі збільшенням товщини матеріалу при інших рівних умовах неплоскостність зменшується.

Застосування притискання дозволяє зменшити стрілу прогину деталі залежно від товщини матеріалу у 2,0 – 2,5 рази.

Вивчення впливу геометричних розмірів деталей і товщини матеріалу, який штамнують, на характер розсіювання розмірів і закон розподілу похибок проводилось шляхом побудови кривих розподілу миттєвих вибірок.

У табл. 3.11 наведені результати дослідження впливу товщини матеріалу і геометричних розмірів величин \bar{X} , $\bar{\sigma}$, \bar{R} при вирубуванні партії деталей зі сталі 12Х18Н10Т на вирубному копії зі сталі 12ХМФ з використанням скошеного бойка. Розмір партії 1000 шт.

Таблиця 3.11 – Параметри розсіювання відхилень \bar{X} , $\bar{\sigma}$, \bar{R}_Σ при вирубуванні партії деталей обсягом 1 тис. шт. різної товщини і діаметра зі сталі 12X18H10T

Товщина матеріалу S, мм	D, мм	\bar{X} , мкм	$\bar{\sigma}$ мкм	\bar{R}_Σ мкм
1	30	8,8	4,4	17,9
1	50	16,6	5,2	26,5
1	70	28,1	5,7	33,6
1	90	31,0	6,3	38,3
2	30	20,8	4,9	34,1
2	50	37,0	5,4	47,9
2	70	44,3	6,1	57,6
2	90	49,8	6,8	63,2
3	30	33,6	5,9	61,7
3	50	54,4	6,4	78,5
3	70	69,2	7,2	89,4
3	90	80,8	7,7	96,3

З метою виключення впливу домінуючого фактора зношування копір-пуансона, а також таких випадкових факторів, як похибки, пов'язані з переточуваннями ріжучих елементів, дослідження проводилися на одному блоці при встановлених нових копір-пуансонах.

Розміри діаметрів відштампованих деталей 30, 50, 70, 90 мм забезпечувались шляхом послідовної заміни матриць. Розміри заготовок по товщині змінювались в межах 1,0 – 3,0 мм.

Вирубний зазор між копіром і опорною рамкою підібраний таким чином, щоб поверхні зрізання отримувалась максимально наближеної форми до циліндричної.

Обсяг 6 проб становив 175 деталей, що послідовно знімалися з штампа безпосередньо після встановлення нової копір-матриці. За результатами розрахунку середнього значення відхилення розмірів партії деталей побудовано криві зміни розташування центру групування розсіювання розмірів партії деталей відносно центру початкової (опорної) вибірки (рис. 3.14, рис. 3.15).

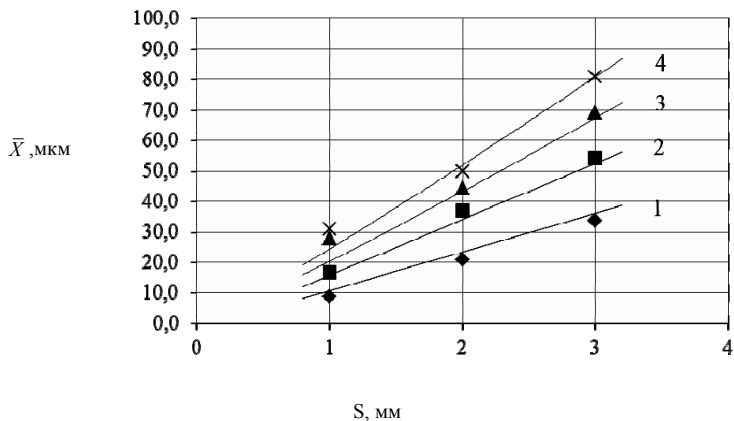


Рисунок 3.14 – Зміна середнього значення відхилень для поля розсіювання розмірів партії відштампованих деталей залежно від їх товщини S :
 1 – $D = 30$ мм; 2 – $D = 50$ мм; 3 – $D = 70$ мм; 4 – $D = 90$ мм

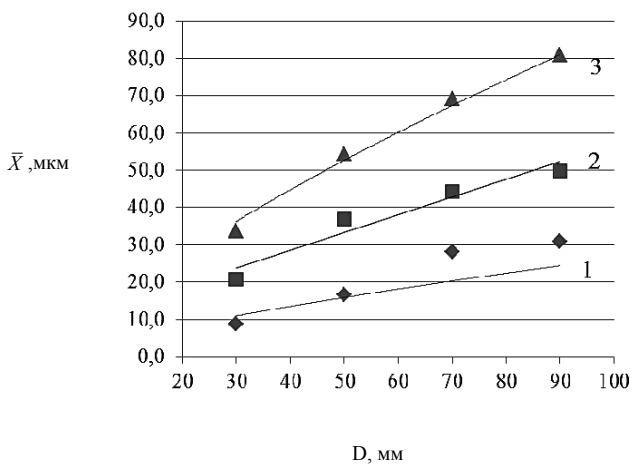


Рисунок 3.15 – Зміна середнього значення відхилень для поля розсіювання розмірів партії відштампованих деталей залежно від діаметра D деталей:
 1 – $S = 1,0$ мм; 2 – $S = 2,0$ мм; 3 – $S = 3,0$ мм

Аналіз графіків показав, що між положенням центру групування відхилень розмірів деталей, товщиною матеріалу та номінальним розміром існує залежність.

Зі збільшенням розмірів деталей в межах 30 – 90 мм положення центру групування відхилень розмірів деталей зміщується приблизно на 110 %.

Вплив випадкових факторів, пов'язаних з геометрією і товщиною матеріалу деталей, які штампують, відображається для нових штампів граничним законом розподілу (так званим «миттєвим розподілом») дуже близьким до нормального закону Гауса, що дозволяє для визначення меж розсіювання розмірів деталей користуватися правилом 6σ .

Вплив зношування відхилення розмірів, проявляється нерівномірно і в умовах пневмоударного штампування може бути розділений на три періоди: припрацювання, нормального і прискореного змінення зміщення центру групування розмірів.

Так при вирубіванні партії деталей $\varnothing 90$ мм, товщиною 2 мм, зі сталі 08кп, без перешліфовувань копіра-пуансона, зміщення центру групування в період припрацювання складало: 35,5 мкм; в період нормального зношування – 11 мкм; а період прискореного зношування – 13 мкм.

При пневмоударному штампуванні деталей зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 1,5 мм, $\varnothing 30$ мм через специфічні особливості матеріалу (підвищену в'язкість, високу межу міцності) спостерігається дещо інша картина. В період припрацювання зміщення становило 17 мкм, а в періоди нормального і прискореного зношування і зміщення центрів групування були рівні і становили 33,3 мкм кожен, тобто практично період уповільненого зношування інструменту перейшов в прискорений.

Аналіз діаграм точності дозволив встановити, що процес ПУШ з використанням бойків з перпендикулярним і скошеним під певним кутом до вісі торцем при виконанні розділювальних операцій вирубівання-пробивання є статично стійким за розсіюванням, тобто випадкові похибки в часі змінювалися незначно, а середнє значення \bar{X} закономірно змінювалося в часі.

3.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ПОХИБОК РОЗМІРІВ ВІДШТАМПОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

Закон розподілу виробничих похибок відображає найголовнішу умову виникнення цих похибок. При цьому істотно те, в який саме сукупності деталей або виробів розглядаються похибки: в окремо виготовленій партії або в загальній масі продукції при змішуванні декількох партій; при однорідності виробничих умов виготовлення окремих партій або при природному у виробництві деякому різноманітті цих умов і тощо.

Пневмоударне штампування для виконання розділювальних операцій застосовується в умовах дослідного, індивідуального, дрібносерійного і серійного виробництв при виготовленні партії від 500 до 5000 деталей. Як правило, такі партії штампуються одноразово на одному копір-пуансоні без зняття оснащення з преса до повного закінчення роботи над всією партією. Перешліфовування робочих частин штампа проводиться під час профілактичних оглядів і ремонтів в проміжках між роботою.

Тому при дослідженні закону розподілу виробничих похибок розглядалася сукупність деталей в окремо виготовленій партії. Як зазначалося вище, дослідження проводилися в виробничих умовах машинобудівного підприємства.

Розподіли відхилень виробничих похибок для деталей однієї партії характеризується такими параметрами:

- 1) величиною поля розсіювання всіх деталей в партії;
- 2) характером розподілу відхилень в цьому полі;
- 3) положенням центру групування відхилень і їх розсіюванням щодо заданого значення;
- 4) співвідношенням між величинами поля розсіювання і поля допуску.

Вирішення цього завдання проводилося вибіркоким методом. При цьому прийнято таку послідовність:

- складається таблиця розподілу спостережень в вибірці;
- будується емпірична крива розподілу;
- обчислюються статистичні характеристики розподілу;
- визначається за зовнішнім виглядом практичної кривої розподі-

лу до якого теоретичного розподілу наближається емпірична крива розподілу;

– оцінюється наближеність емпіричного розподілу до передбачуваного теоретичного.

Для встановлення закону розподілу відхилення виробничих похибок при пневмоударному штампуванні були проведені дослідження над шістьма найменуваннями деталей, три з яких отримувались вирубуванням, а в трьох інших випадках пробивались отвори.

З аналізу виробничих похибок, що виникають при штампуванні деталей із застосуванням пневмоударного штампування впливає, що серед джерел виникнення виробничих похибок є домінуючий фактор, а саме, знос ріжучих кромek копір-пуансона (матриці), який пов'язаний функціонально залежністю з терміном експлуатації штампа.

Вивчення впливу домінуючого фактора (зношування матриць і пуансонів) на відхилення розмірів відштампованих деталей виконувалось шляхом аналізу діаграм точності операції вирубування-пробивання.

Діаграми точності досить повно відображають вплив домінуючого фактора, так як проби для їх побудови знімалися зі штампів послідовно, через певні проміжки часу, відповідні одній тисячі відштампованих деталей.

Як видно з графіків, розміри деталей партії, що виготовляється в одиницю часу змінюються лінійно. Апроксимаційна залежність при виготовленні партії деталей після 500 і до 10000 штук може бути представлена рівнянням прямої лінії.

З теорії ймовірностей, впливає, що при наявності домінуючого фактора, який рівномірно змінюється в часі серед джерел, що викликають виробничі похибки, розсіювання відхилень однієї виробничої партії має підкорятися закону рівної ймовірності [119].

При інтервалі змін випадкової величини x від a до b рівняння диференціальної функції розподілу або щільності ймовірності буде мати наступний вигляд:

$$f(x) = 1/(b-a), \quad (a \leq x < b). \quad (3.3)$$

Інтегральна функція рівномірного розподілу виражається таким рівнянням для $a < x < b$

$$F(x) = \int_a^x f(x) dx = \int_a^x \frac{dx}{b-a} = \int_a^0 \frac{dx}{b-a} + \int_0^x \frac{dx}{b-a} = \frac{x-a}{b-a}. \quad (3.4)$$

Поряд з домінуючим фактором, яким є зношування робочих елементів штампа, є низка виробничих похибок випадкового характеру, що мають істотний вплив на закон розподілу похибок деталей, які штампують.

Вивчення характеру розподілу випадкових виробничих похибок проводилось методом кривих «миттєвого» розподілу.

Для побудови кривих «миттєвого» розподілу вибірка обсягом 200 – 250 штук відбиралася з деталей знятих зі штампа послідовно, що дозволило практично усунути вплив домінуючого фактора.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що при пневмоударному штампуванні розподіл випадкових виробничих похибок у миттєвих вибірках підкоряється закону нормального розподілу.

Щільність ймовірності або диференціальна функція розподілу випадкової величини безперервного типу, що підкоряється закону нормального розподілу, виражається у формі:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.5)$$

де x – змінна випадкова величина; $f(x)$ – щільність ймовірності; σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини x від \bar{X} ; \bar{X} – середнє значення величин x , e – основа натурального логарифма.

Інтегральний закон нормального розподілу виражається в загальному вигляді наступною формулою:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.6)$$

Якщо випадкова величина x дотримується закону нормального розподілу, то вірогідно, що вона може приймати будь-які числові значення в межах $\pm\infty$.

Для практичного використання закону нормального розподілу обмежимо зону розсіювання випадкової величини межами $\bar{X} \pm 3\sigma$, тобто в межах 6σ .

Таким чином, закон розподілу похибок деталей, які штампують, являє собою композицію розподілу похибок за законом рівної ймовірності і нормальним законом [145].

З теорії ймовірностей відомо, що якщо випадкова величина є сумою незалежних випадкових величин, кожна з яких підпорядковується своєму закону розподілу, то закон розподілу суми може бути знайдений за законами розподілу доданків.

Якщо відомо, що щільність розподілу x дорівнює $f(x)$, а щільність розподілу y дорівнює $f(y)$, то щільність розподілу суми $f(z)$ знаходиться рішенням наступного інтеграла:

$$f(z) = \int_0^{\infty} f(x)f(z-x)dx = \int_0^{\infty} f(y)f(z-y)dy, \quad (3.7)$$

де $z = x + y$, звідки $y = z - x$ та $x = z - y$;

$$f(y) = f(z-x) = 1/(b-a),$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-y-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.8)$$

де в показнику при e величина x замінена на $x = z - y$.

Щільність ймовірності композиції розглянутих законів розподілу буде дорівнювати:

$$f(z) = \int_a^b f(y)f(z-y)dy = \frac{1}{b-a} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(z-y-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dy. \quad (3.9)$$

Тут інтервал береться від a до b , так як відрізняється від нуля тільки в цьому інтервалі $a < y < b$.

Вводимо підстановки:

$$y = z - \bar{x} + t\sigma; \quad dy = \sigma \cdot dt; \quad \frac{z - y - \bar{x}}{\sigma} = -t; \quad (3.10)$$

$$\frac{a - y + \bar{x}}{\sigma} = t_1; \quad \frac{b - z + \bar{x}}{\sigma} = t_2$$

Тоді рівняння набуде вигляду:

$$f(z) = \frac{1}{b-a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{-t^2/2} dt = \frac{1}{b-a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\int_0^{t_2} e^{-t^2/2} dt - \int_0^{t_1} e^{-t^2/2} dt \right] \quad (3.11)$$

Інтеграл $\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^t e^{-t^2/2} dt = \Phi(t)$ носить назву нормованої функції

Лапласа і його значення для різних t наводяться в таблицях. Тоді остаточно отримаємо:

$$f(z) = \frac{1}{b-a} \cdot [\Phi(t_2) - \Phi(t_1)] = \frac{1}{b-a} \cdot \left[\Phi\left(\frac{b-z+\bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-z+\bar{x}}{\sigma}\right) \right] \quad (3.12)$$

Так як середнє значення x дорівнює \bar{X} , а для y дорівнює $\bar{y} = (b-a)/2$, то середнє значення для закону композиції буде:

$$\bar{z} = \bar{x} + \bar{y} = \bar{x} + (b-a)/2. \quad (3.13)$$

Дисперсія закону композиції:

$$\bar{\sigma}_z^2 = \bar{\sigma}_x^2 + \bar{\sigma}_y^2 = \bar{\sigma}_x^2 + \frac{(b-a)^2}{12}. \quad (3.14)$$

Отримані результати показали, що закон розподілу похибок розмірів при ПУШ являє собою поєднання законів нормального розподілу і рівномірного розподілу (рівної ймовірності).

Аналітичне визначення середнього значення відхилень для поля розсіювання розмірів партії деталей

Ідеально налаштованим технологічним процесом з погляду економичності прийнято вважати такий, при якому поле відхилень розмірів партії деталей відштампованих на одному наборі штампового оснащення без підлатування співпадає з полем допуску встановленим

конструкторськими вимогами. Тому важливо мати інформацію про основні показники, які характеризують розсіювання розмірів партії деталей. Одним з цих показників є середнє значення відхилень для поля розсіювання розмірів партії деталей.

В результаті дослідження впливу різних чинників на показники точності деталей, які отримують при пневмоударному штампуванні, встановлено, що розсіювання розмірів при виконанні операцій вирубування-пробивання знаходиться в залежності від геометричних розмірів деталі і товщини матеріалу, який штамнують.

Визначення залежності для оцінювання середнього значення відхилення розмірів \bar{X} партії деталей при вирубуванні-пробиванні виконувалось за результатами вище наведених експериментів. Як приклад розглянемо процес вирубування партії деталей обсягом 1 тис. шт. різної товщини і діаметра зі сталі 12X18H10T при використанні скошеного бойка, та копіра-пуансона виготовленого зі сталі X12MF (див. табл. 3.11). Такий обсяг партії обраний спираючись на граничний ресурс роботи копіра-пуансона без перешліфовувань.

Для полегшення визначення функціональної залежності між змінними величинами дані експериментів представлені у вигляді графіків.

При графічній побудові залежності між змінними величинами \bar{X} , S та D виконуємо нижченаведені дії.

Спочатку розглянемо одну з незалежних змінних, як параметр і побудуємо відповідне йому сімейство кривих $\bar{X} = f(D)$ (див. рис. 3.14). Аналогічно для другої незалежної змінної побудуємо сімейство кривих $\bar{X} = f(S)$ (див. рис. 3.15).

Графіки побудовані в рівномірних шкалах прямокутної системи координат. Обраний масштаб, однаковий за обома осями координат, дозволяє уникнути можливих спотворень при побудові, що особливо важливе при визначенні за графіком виду апроксимаційної функції, яка відповідає залежності між змінними величинами.

Зіставлення отриманих результатів довело, що змінні величини \bar{X} , S та D пов'язані між собою пропорційною залежністю.

Порівняння отриманих графіків з різними кривими, рівняння яких відомі, дозволило визначити тип функції яка відповідає функціональній залежності між експериментальними даними.

Серед різноманіття видів рівнянь з трьома змінними тільки одна група, а саме – рівняння виду:

$$y = ax^n z^m, \quad (3.15)$$

при позитивних значеннях коефіцієнта a і при будь-яких значеннях показників ступеня m та n дають при побудові в рівномірній системі координат паралельні між собою лінії як в сімействі по x , так і в сімействі по z .

Нескладно побачити, що побудова графіків за результатами експериментів в логарифмічній сітці не змінює прямолінійної залежності між змінними і паралельності прямих, а лише змінює їх нахил по відношенню до осей координат.

Для нашого випадку рівняння можна представити в такому вигляді:

$$\bar{X} = aS^n D^m, \quad (3.16)$$

де \bar{X} – математичне очікування середнього значення відхилень розмірів x , мкм; S – товщина матеріалу, який штампують, мм; D – діаметр деталі, мм; a – постійний коефіцієнт; n і m – показники ступеня.

Значення величин \bar{X} , S і D відомі, отже, нашим завданням є знаходження за результатами спостережень найбільш ймовірних значень коефіцієнтів a , n і m .

Найбільш ймовірні значення коефіцієнтів рівнянь прийнятого виду можуть бути отримані за допомогою методу найменших квадратів.

Принцип найменших квадратів стверджує, що найімовірніше значення параметрів будуть такі, при яких сума квадратів відхилень буде найменшою, тобто

$$\sum_{i=1}^{i=n} [y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)]^2 = \min \quad (3.17)$$

Розглядаючи тут a_0, a_1, \dots, a_m як незалежні змінні і прирівнюючи нулю часткові похідні від лівої частини по цим змінним, отримаємо $m+1$ рівнянь з $m+1$ невідомими.

Зіставлення і рішення цієї системи доволі просте в тому випадку, коли функція $f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$ лінійна щодо параметрів.

У нашому випадку перетворимо рівняння (3.16) в лінійне шляхом логарифмування

$$\lg \bar{X} = \lg a + n \lg S + m \lg D. \quad (3.18)$$

Позначивши $\lg \bar{X} = y$, $\lg a = A$, $\lg S = x$, $\lg D = z$ отримаємо рівняння в формі

$$y = A + nx + mz. \quad (3.19)$$

$$\sum_{i=1}^{i=k} [y_i - (A + nx_i + mz_i)]^2 = \min. \quad (3.20)$$

Диференціюючи суму квадратів за A , m , n і прирівнюючи нулю похідні отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dA} &= \sum_{i=1}^{i=k} [y_i - (A + nx + mz)]^2 = -2 \sum_{i=1}^{i=k} [y_i - (A + nx_i + mz_i)] = 0; \\ \frac{d}{dn} &= \sum_{i=1}^{i=k} [y_i - (A + nx + mz)]^2 = -2 \sum_{i=1}^{i=k} [y_i x_i - (A + nx_i + mz_i) x_i] = 0; \\ \frac{d}{dm} &= \sum_{i=1}^{i=k} [y_i - (A + nx + mz)]^2 = -2 \sum_{i=1}^{i=k} [y_i z_i - (A + nx_i + mz_i) z_i] = 0. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Звідки

$$\begin{aligned} k \cdot A + n \sum_{i=1}^{i=k} x_i + m \sum_{i=1}^{i=k} z_i &= \sum_{i=1}^{i=k} y_i; \\ A \sum_{i=1}^{i=k} x_i + n \sum_{i=1}^{i=k} x_i^2 + m \sum_{i=1}^{i=k} x_i z_i &= \sum_{i=1}^{i=k} y_i x_i; \\ A \sum_{i=1}^{i=k} z_i + n \sum_{i=1}^{i=k} x_i z_i + m \sum_{i=1}^{i=k} z_i^2 &= \sum_{i=1}^{i=k} y_i z_i. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Це лінійна система рівнянь нормальної форми, k – кількість експериментів, для нашого випадку $k = 12$.

Дані необхідні для вирішення системи рівнянь при визначенні коефіцієнтів A , m і n , наведені в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Дані для визначення коефіцієнтів A , m , n

$\sum_{i=1}^{i=12} x_i$	$\sum_{i=1}^{i=12} x_i^2$	$\sum_{i=1}^{i=12} z_i$	$\sum_{i=1}^{i=12} z_i^2$	$\sum_{i=1}^{i=12} y_i$	$\sum_{i=1}^{i=12} y_i x_i$	$\sum_{i=1}^{i=12} y_i z_i$	$\sum_{i=1}^{i=12} x_i z_i$
3,113	1,273	20,926	36,876	18,344	5,220	32,347	5,428

Після підстановлення отриманих даних в рівняння маємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$12A + 3,113 n + 20,926m = 18,569;$$

$$3,113 A + 1,273 n + 5,428 m = 5,220;$$

$$20,926 A + 5,428n + 36,876 m = 32,347.$$

Вирішуємо отриману систему нормальних рівнянь за допомогою визначників третього порядку.

Згідно отриманого рішення $A = -0,0062$; $n = 1,0878$; $m = 0,7291$.

Виконаємо потенціювання A і отримаємо $a = 0,9858$.

Підставимо отримані значення у формулу (3.16) отримаємо апроксимаційну залежність середнього значення (математичного очікування) величини \bar{X} :

$$\bar{X} = 0,9858 \cdot S^{1.0878} D^{0.7291},$$

або з достатньою для практичного застосування точністю приймаємо

$$\bar{X} = 0,986 \cdot S^{1.09} D^{0.73} \quad (3.23)$$

Аналогічно були отримані результати для вирубування на копірі-пуансоні зі сталі У8А деталей зі сталі 08кп ($a = 0,4632$; $n = 1,021$; $m = 0,689$). Аналіз на відтворюваність результатів показав, що дану модель можна використовувати для приблизного оцінювання, оскільки в умовах значних випадкових відхилень характеристик матеріалів копіра-пуансона та заготовки результати відрізнялись від прогнозованих у межах до 15 %. Тому при практичних розрахунках при призначенні допусків на відповідні розміри виробів та робочих елементів штампного оснащення необхідно враховувати як отримане значення так і його поле відхилень.

Параметри точності деталей при вирубуванні-пробиванні ПУШ

Показники якості плоских деталей визначається за двома групами критеріїв:

- критерії, що визначають форму поверхні поділу і точність розмірів деталей;
- критерії, що визначають мінімальні розміри деталей і їх конструктивних елементів.

Дослідження геометрії поверхні поділу пробитих отворів, виконані з використанням макрошліфів, показали, що поверхня поділу має дві чітко окреслені області.

З боку середовища, яке деформує (поліуретану) в пробитих отворах спостерігається пластично деформована ділянка (рис. 3.16). У діаметральному перетині ця ділянка має криволінійну форму. З боку матриці спостерігається конічна або циліндрична поверхня руйнування (ділянка руйнування).



Рисунок 3.16 – Форма поверхні поділу в деталі при пробиванні ПУШ отворів залежно від відносного діаметра:

- 1 – поверхня пластично деформованого матеріалу;
- 2 – поверхня руйнування (сходу)

Ділянка руйнування має шорстку поверхню, тому що утворюється за рахунок тріщин при сколюванні, що зароджуються біля ріжучої кромки матриці. Висота мікронерівностей залежить від величини зернистості структури матеріалу і знаходиться в межах $Ra 5 - Ra 20$ мкм.

У перетині пластично деформованої поверхні металу з поверхнею руйнування спостерігається найбільша шорсткість поверхні поділу. Це пояснюється тим, що зона утворена шляхом розриву шарів металу, які контактують з середовищем, яке деформує, при виході тріщин сколювання на поверхню заготовки.

За аналогією з пробиванням отворів в інструментальних штампах геометрія поверхні поділу круглих пробитих отворів в діаметральному перетині оцінюється наступними показниками: h_y – вертикальне утягування; l_y – горизонтальне утягування; β – кут нахилу поверхні руйнування; ($\Delta_o = d_0 - d_m$) – показник точності розмірів як різниця між діаметрами отворів в деталі d_0 і матриці d_m .

При пробиванні круглих отворів в заготовках з металевих матеріалів які мають $\sigma_B = (200 - 600)$ МПа, форма поверхні поділу істотно залежить від d/S . При $d/S < 14...21$ кут негативний, а при $d/S > 14...21$ кут β позитивний. Форма поверхні руйнування близька до циліндричної при $d/S = 14...21$. У широкому діапазоні вертикальні і горизонтальні утягування змінюються в порівняно невеликих межах $l_y = (0,8 \dots 1,3) S$, $h_y = (0,4 - 0,5) S$.

Вплив d/S на форму поверхні руйнування визначається тим, що зі зміною d/S відбувається зміна опору деформації відходів і їх напружено-деформованого стану в зоні ріжучої кромки штампа. При $d/S > 14...21$ деформований стан поблизу поверхні руйнування – зсув, суміжний з розтягуванням. Напрямок тріщин сколювання значною мірою залежить від напружень розтягу, які діють з боку відходу. При $d/S < 14...21$ деформований стан – зсув, суміжний із стисненням. У цьому діапазоні форма поверхні поділу визначається співвідношенням згинальних моментів, напружень стиску і ріжучих сил. Деформований стан поблизу поверхні руйнування близький до зсуву тільки у вузькому діапазоні $d/S = 14...21$. У цьому діапазоні поверхня руйнування близька до циліндричної форми поверхні поділу, що отримується при пробиванні отворів в інструментальних штампах з двома жорсткими формотворними елементами (пуансоном і матрицею).

Форма поверхні поділу залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, що пробивається. З підвищенням пластичності матеріалу заготовок збільшуються значення h_y і l_y . Наочно вплив пружних властивостей матеріалу заготовки на форму поверхні поділу видно за формою пробитих отворів у швидкорізальній сталі Р18 та у свинцю – в матеріалах, що мають діаметрально протилежні властивості за показниками пластичності. При пробиванні Р18 коефіцієнти h_y і l_y близькі до нуля, а при пробиванні свинцю $l_y = 2\delta$, а h_y близький до одиниці.

При вирубуванні зовнішнього контуру деталей з опорними рамками, форма поверхні поділу визначається відносним зазором (δ/S) між опорною рамкою і ріжучою кромкою матриці, фізико-механічними властивостями матеріалу заготовки і розмірами деталей, що вирубуються. Найбільш значимі перший і другий фактори. Залежність форми поверхні поділу при вирубуванні круглих деталей від δ/S і фізико-механічних властивостей матеріалу якісно аналогічна залежності форми поверхні поділу при пробиванні круглих отворів від d/S . При збільшенні δ/S також змінюється напружено-деформований стан поблизу поверхні руйнування і форма поверхні поділу.

При $\delta/S < 8 \dots 15$ деформований стан – зсув, суміжний із стисненням, кут β негативний, при $\delta/S > 8 \dots 15$ деформований стан – зсув, суміжний з розтягуванням, кут β додатній. Форма поверхні поділу близька до циліндричної при $\delta/S = 8 \dots 15$.

Розміри пробитих отворів відрізняються від розмірів отворів матриць у зв'язку з наявністю систематичних і випадкових похибок. Систематичні похибки найбільш істотно залежать від відношення d/S і фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки. На рис. 3.17 наведена залежність $d_0 - d_m = \Delta_0$, з якої випливає, що зі збільшенням d/S знак Δ_0 змінюється з мінуса на плюс. Це означає, що розміри пробитих отворів при $d/S < 14 \dots 21$ менше розмірів отворів матриці, а при $d/S > 14 \dots 21$ навпаки більше.

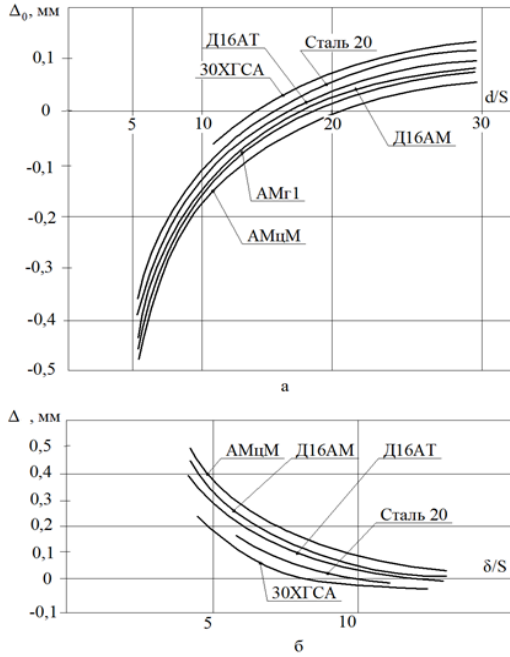


Рисунок 3.17 – Систематичні похибки розмірів пробитих отворів і зовнішнього контуру деталей [114]: а – при пробиванні отворів; б – при вирубуванні

Характер залежностей Δ_0 від d/S в цих двох інтервалах різний. При малих значеннях $d/S < 14 \dots 21$ і пробиванні круглих отворів величини Δ_0 на порядок більше, ніж при $d/S > 14 \dots 21$.

Зазначені закономірності Δ_0 при $d/S = 14 \dots 21$ вказують на наявність фактора, який істотно змінюється при цих значеннях d/S . Цим фактором є кут нахилу поверхні руйнування β , який значною мірою визначає форму поверхні поділу і закономірності зміни Δ_0 в широкому діапазоні d/S . При негативних значеннях β значення Δ_0 також негативне, тому що вимірювання діаметра пробитого отвору проводиться в зоні перетину поверхонь руйнування і пластично деформованої поверхні.

Таким чином, в інтервалі $d/S < 14 \dots 21$ точність пробитих отворів залежить від форми поверхні поділу і визначається процесами

пластичного деформування і напрямком тріщин сколювання при відокремленні відходу.

Точність пробитих отворів при $d/S > 14...21$ не залежить від форми поверхні поділу (кут додатній). Розміри пробитих отворів вимірюються в площині заготовки, що контактує з матрицею. Поділ матеріалу по цій площині відбувається на початковій стадії деформування відходів до появи тріщин сколювання. Збільшення розмірів пробитих отворів по відношенню до розмірів матриць є наслідком пружних переміщень деталі після відокремлення відходів.

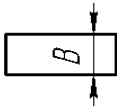
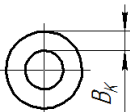
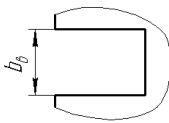
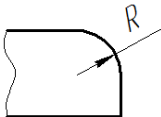
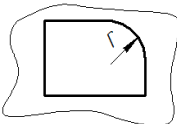
Точність розмірів деталей по зовнішньому контуру залежить від величини відносного зазору δ/S , розмірів деталей, що вирубуються і фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки. Найбільш вагомим чинником, який визначає точність деталей, що вирубуються є δ/S . У зв'язку з тим, що при $\delta/S < 8...15$ кут β негативний, розміри вирубаних деталей більше відповідних розмірів копіра-пуансона.

Внаслідок пружних деформацій деталі після відокремлення відходу при $\delta/S > 8...15$ розміри вирубаних деталей менше розмірів матриць. При вирубуванні зміна форми поверхні поділу і Δ досягається шляхом зміни зазору δ .


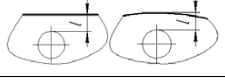
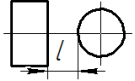
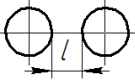
Підвищення точності отворів, що пробиваються досягається за рахунок коригування розмірів отворів матриці з метою компенсації систематичної похибки Δ_0 і за рахунок керування процесом деформації відходів шляхом установки підпорів. При пробиванні отворів з підпором при $d/S > 14...21$ напружено-деформований стан в зоні поверхні поділу буде залежати від величини відносного зазору між підпором та різальною кромкою (δ_n/S).

Зі зменшенням δ_n/S зменшуються радіальні напруження розтягу. Установлення підпорів дозволяє отримати негативні і близькі до нуля значення Δ_0 , змінювати форму поверхні поділу. Точність розмірів пробитих отворів і вирубування зовнішнього контуру деталей з металевих матеріалів обмежується квалітетами, наведеними у табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Досяжні параметри точності і граничні розміри деталей та їх конструктивних елементів

Показники			Значення	
Досяжні параметри точності	при $S = 2 \dots 3$ мм,	$d / S > 14 \dots 21 ; \delta / S > 8 \dots 15$	8-12 квалітет	
		$d / S < 14 \dots 21 ; \delta / S < 8 \dots 15$	12-14 квалітет	
	при $S < 1$ мм,	$d / S > 14 \dots 21 ; \delta / S > 8 \dots 15$	7-12 квалітет	
		$d / S < 14 \dots 21 ; \delta / S < 8 \dots 15$	10-12 квалітет	
Граничні розміри деталей та їх конструктивних елементів			Матеріали деталей	
			АМцМ Д16АМ	Д16АТ Сталь 20
Ширина деталі	прямокутної		(5-7)S	(4-6)S
	кільцевої (шайби)		(3-5)S	(3-4)S
Ширина	виступу		(4-6)S	(3,5-5)s
	пазу		(4-6)S	(5-6)S
Радіус заокруглення	по зовнішньому контуру деталі		(0,1-0,5)S	(0,2-0,6)S
	по внутрішньому контуру деталі		(1-2)S	(1-2)S

Продовження таблиці 3.13

Пере- мички	між зовнішнім контуром деталі і отвором		(6-7)S	(5-6)S
			(3-5)S	(3,5-5)S
	між отворами		(4-6)S	(3,5-6)S
			(4-5)S	(3,5-5)S

Зі зменшенням δ_n / S зменшуються радіальні напруження розтягу. Установлення підпорів дозволяє отримати негативні і близькі до нуля значення Δ_0 , змінювати форму поверхні поділу. Точність розмірів пробитих отворів і вирубування зовнішнього контуру деталей з металевих матеріалів обмежується квалітетами, наведеними у табл. 3.13.

В табл. 3.14 наведені дані про точність контурів при вирубуванні та пробиванні для різних матеріалів. Крім цього необхідно враховувати: конструкцію та стан штампового оснащення.

Для досягнення більш високої якості поверхні поділу при пробиванні, вирубуванні неметалічних матеріалів можна використовувати металеві супутники, наприклад тонколистову сталь.

До критеріїв, що визначають мінімальні розмір деталей і їх конструктивні елементи, відносяться мінімальні розміри круглих і прямокутних деталей, виступів, пазів, перемичок і радіусів заокруглень тощо (див. табл. 3.13).

Зазначені критерії віднесені до показників якості деталей, тому що при виготовленні деталей і їх конструктивних елементів з розмірами, меншими мінімально допустимих, виникають різні види браку: спотворення форми деталей та їх елементів, розриви деталей по перемичках, обриви матеріалу, який штампують, в кутах отворів тощо.

Таблиця 3.14 – Точність пластин при вирубуванні з різноманітних матеріалів

Матеріал	Величина сумарної похибки, мм/квалітет, при інтервалах розмірів			
	20...60	60...100	100...150	150...200
Сталь 10кп, Сталь 08кп, Дюр- алюміній, АМг6	$\frac{0,036}{7} \dots \frac{0,068}{8...9}$	$\frac{0,06}{8...9} \dots \frac{0,120}{10}$	$\frac{0,075}{8...9} \dots \frac{0,130}{10}$	$\frac{0,100}{9} \dots \frac{0,150}{10}$
Латунь ЛС59-1-0, Бронза БрАЖ9-4	$\frac{0,047}{8...9} \dots \frac{0,075}{10}$	$\frac{0,072}{8...9} \dots \frac{0,118}{10}$	$\frac{0,088}{8...9} \dots \frac{0,160}{10}$	$\frac{0,172}{8...9} \dots \frac{0,190}{10}$
Сталь Э12	$\frac{0,100}{10} \dots \frac{0,132}{11}$	$\frac{0,142}{10} \dots \frac{0,200}{11}$	$\frac{0,177}{8...9} \dots \frac{0,232}{11}$	$\frac{0,212}{10} \dots \frac{0,278}{12...13}$

Ці види браку деталей виникають в тому випадку, якщо порушується рівновага сил, що утримують деталь або її конструктивний елемент від пластичної деформації в площині матриці, і зусиль розтягу, що діють з боку відходу. Якщо в процесі вирубування, пробивання деталей сили, які утримують деталь і їх конструктивні елементи від пластичної деформації в площині матриці, більше зусиль розтягу, то розміри деталей і їх конструктивних елементів достатні, брак виключений.

Як приклад розглянемо визначення мінімальної ширини прямокутного виступу деталі. На рис. 3.18, а наведено прямокутний виступ деталі розмірами a_e і b_e . Виступ деталі притискається до матриці в процесі його вирубування поліуретаном тиском, що дорівнює q . У місці виступу опорна рамка має прямокутний паз. Між опорною рамкою і виступом виконаний рівномірний за шириною зазор, рівний δ .

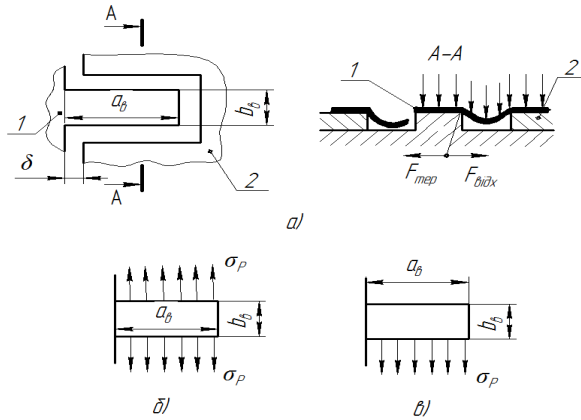


Рисунок 3.18 – Схеми визначення мінімальних розмірів прямокутних виступів деталей: а – розташування матриці з прямокутним виступом (1) і частини опорної рамки (2); б – розрахункова схема при рівності σ_p ; в – розрахункова схема при неодновременному відокремленні відходу

На початкових етапах вирубування (до відокремлення відходу) зусилля розтягування, що діють на протилежних боках виступу, рівні за величиною і протилежно спрямовані (рис. 3.18, б).

Вирішальний вплив на допустиму ширину виступу має процес відокремлення відходу.

При одночасному відокремленні відходу по протилежних сторонах виступу матриці вигину виступу деталі не відбувається.

Його ширина в цьому випадку обмежується подвійним горизонтальним утягуванням ($2l_y$), тому що при ($b_s < 2l_y$) товщина деталі стає менше товщини заготовки. Якщо відокремлення відходу відбувається неодноразомно по контуру виступу матриці (рис. 3.18, а), то виникає несприятливий розподіл зусиль, що діють на виступ деталі. Зусилля, що розтягують з боку частини відходу, що відділилася дорівнюють нулю. Зі сторони, відходу, що не відділилася діють напруження розтягу (σ_p), рівномірно розподілені за товщиною заготовки в зоні різальної кромки (рис. 3.18, б)

Неодноразомне відокремлення відходу по периметру виступу матриці відбувається через неоднакову гостроту її різальних кромок,

нерівномірність зазору δ при недостатній енергії удару коли інерційні сили відходу малі. Зазначені причини неодночасності відокремлення відходу дозволяють рекомендувати для досягнення мінімальних розмірів b_e забезпечення рівномірності δ по контуру, контроль за станом ріжучих кромek матриці та їх своєчасне заточування, збільшення енергії удару пневматичних імпульсних машин.

Для визначення мінімальної ширини прямокутного виступу деталі обрана схема консольної балки (див. рис. 3.18, в) з рівномірно розподіленим навантаженням q .

Величина зусилля, що діє на виступ деталі з боку частини відходу, що невідокремлена ($F_{\text{відх}}$) визначається наступним виразом:

$$F_{\text{відх}} = \sigma_p \cdot \Pi_{\text{відх}}, \quad (3.24)$$

де $\Pi_{\text{відх}}$ – площа перерізу відходу в зоні ріжучої кромки;

$$\Pi_{\text{відх}} = b_e (S - h_y), \quad (3.25)$$

де h_y – вертикальне утягнення.

Візьмемо σ_p рівним межі текучості матеріалу та використовуючи вираз (3.25), отримаємо:

$$F_{\text{відх}} = \sigma_T \cdot b_e (S - h_y). \quad (3.26)$$

Вигину балки перешкоджають сили тертя $F_{\text{тер}}$, пропорційні $q_{\text{відх}}$ і коефіцієнту тертя $\mu_{\text{тер}}$ між заготовкою (деталлю) і матрицею, площі виступу Π_e :

$$F_{\text{тер}} = \mu_{\text{тер}} \cdot q_{\text{відх}} \cdot \Pi_e, \quad (3.27)$$

де $q_{\text{відх}}$ – тиск поліуретану в момент відокремлення відходу.

В інженерних розрахунках значення $q_{\text{відх}}$ приймаються рівними, тиску поліуретану, що необхідний для вирубування деталі при статичному деформуванні заготовки.

Пружні деформації вигину прямокутного виступу деталей (консольної балки) припускають отримання деталей з точністю, що відповідає 12–14 квалітетами. При наявності пластичних деформацій вигину виступу деталі бракуються.

Таким чином, граничний стан консольної балки – перехід від пружної до пластичної деформації. Для зазначеного граничного стану консольної балки з використанням виразів (3.24) – (3.27) визначена мінімальна величина b_g :

$$b_g = 0,5 \sqrt{\left(\frac{3 \cdot \mu_{мер} \cdot q \cdot a_g^2}{\sigma_T \cdot S}\right)^2} + 6 \cdot a_g^2 - \frac{1,5 \cdot \mu_{мер} \cdot q \cdot a_g^2}{\sigma_T \cdot S}. \quad (3.28)$$

Ця залежність показує, що $b_{g \min}$ є функцією шести чинників, значимість яких змінюється зі збільшенням a_g . Ефект опору вигину виступу (консольної балки) превалює за значимістю над ефектом від дії сил тертя при малих значеннях a_g (наприклад, $a_g < 5$ мм).

При великих значеннях a_g (наприклад, $a_g > 60$ мм) основний вплив на b_g мають сили тертя, і, відтак, фактори, що їх визначають $\mu_{мер}$, q , малозначущим виявляється опір вигину прямокутного виступу.

Фактори $\mu_{мер}$, q є технологічними, з метою досягнення найменших значень b_g їх значення збільшують за рахунок підвищення тиску стисненого повітря в ресивері, за рахунок відомих способів збільшення $\mu_{мер}$, наприклад знежирення поверхонь заготовок і матриць.

Фізична сутність процесів, що визначають мінімальні розміри інших конструктивних елементів деталей, близька до описаної вище фізичної сутності процесів, що визначають b_g . Так, наприклад, мінімальна величина різних типів перемичок деталей обмежується значенням $2l_y$ при одночасному відокремленні відходів.

При неодночасному відокремленні відходів припустимі розміри перемичок розраховуються з використанням розрахункових схем, які представляють перемички у вигляді балок постійного або змінного перерізу, що затиснені по кінцях і навантажені рівномірно розподіленим навантаженням q .

Значення мінімальних розмірів деталей і їх конструктивних елементів при неодночасному відокремленні відходів завжди більше,

ньому при їх одночасному відокремленні. Виникає невизначеність у встановленні технологічних можливостей пневматичних імпульсних машин щодо запропонованих критеріїв. Крім того, в деяких випадках мінімальні розміри деталей і їх конструктивних елементів обмежуються міцністю матриць. Зазначена невизначеність розкривається в кожному конкретному випадку. Якщо забезпечуються умови одночасності відокремлення відходів, то мінімальні розміри деталей і їх конструктивних розмірів визначаються величиною не менше ($2l_y$). Однак в умовах серійного виробництва розрахунки розглянутих показників якості деталей не завжди економічно виправдані, внаслідок їх трудомісткості.

При підборі номенклатури деталей для пневматичних імпульсних машин рекомендується використовувати найпростіші співвідношення між мінімальними розмірами деталей, їх конструктивних елементів і товщиною заготовки (S).

Ці співвідношення представлені в табл. 3.13 та табл. 3.14. Вони отримані в результаті експериментальних досліджень і збирання статистичних даних.

Досяжні параметри точності розмірів відповідно до представлених даних при вирубуванні «на провал» залежить від номінального розміру (до 300 мм), товщини матеріалу (0,1...3 мм) при використанні бойків з перпендикулярним до вісі торцем знаходиться у межах 11...16 квалітету точності, а при використанні бойків зі скошеним торцем – 7...13 квалітету точності; в тих самих умовах при пробиванні отворів точність їх розмірів знаходиться відповідно у межах 12...15 та 10...14 квалітетів точності.

3.4. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. Виявлені особливості пневмоударних процесів пробивання-вирубування листових деталей еластичним середовищем та на їх основі запропоновані і апробовані конкретні рішення з вдосконалення процесів за рахунок локалізації осередку пластичної деформації і керування траєкторією послідовного відокремлення припуску заготовки, а також послідовності прикладання імпульсного ударного

навантаження в зоні розділення матеріалу заготовки за рахунок застосування у обладнанні бойка зі скошеним торцем.

2. Встановлено, що домінуючими факторами, що впливають на точність деталей при ПУШ є похибки зношування копір-пуансона (матриці), похибки розсіювання розмірів за габаритами і товщиною деталі, а також анізотропія матеріалу заготовки, неточність фіксації заготовки (деталі) та залишкові напруження у деталі після деформування. Виконана класифікація виробничих похибок розмірів деталей при виконанні операцій розділення та встановлені основні причини виникнення цих похибок, їх характер та ступінь впливу.

3. Експериментально встановлено тип діаграм точності процесів вирубаня-пробивання скошеним бойком та визначено сумарний вплив усіх домінуючих факторів на точність вирубування - пробивання ПУШ. Також встановлено, що в міру зношування інструмента спостерігається монотонне зміщення центру групування і збільшується розсіювання розмірів, а також присутні три періоди зношування ріжучих елементів штампа: уповільнений, нормальний і прискорений. При цьому до появи на поверхні деталі задирки зміщення центру групування йде повільно і досить рівномірно. В процесі пневмоударного штампування зміна розмірів деталей як при вирубуванні, так і при пробиванні відбувається в бік збільшення систематичної похибки і залежить від параметрів схеми навантаження. Для деталей з різних матеріалів це відхилення знаходиться в межах 0,03...0,25 від товщини матеріалу.

4. Встановлено, що між величиною зміщення центру групування розсіювання розмірів деталей та товщиною матеріалу і геометричними розмірами деталей існує наближена до лінійної степенева залежність, а закон розподілу розсіювання розмірів являє собою поєднання законів нормального розподілу і рівномірного розподілу (рівної ймовірності). Аналітично визначено середнє значення розсіювання розмірів деталей \bar{X} .

5. Встановлено, що застосування бойка зі скошеним торцем призводить до зменшення інтенсивності зношування копір-пуансонів та зменшення розсіювання розмірів партії деталей отриманих на одному копір-пуансоні, а також, що одним з основних факторів, що

визначає зношування копір-пуансонів в умовах ПУШ, та має домінуючий характер впливу на параметри точності деталей є матеріал з якого він виготовлений. Такі параметри точності деталей як відхилення від площинності та паралельності в процесі ПУШ не зазнають значних змін і за своєю величиною знаходяться в межах: кут сколювання 3 – 5, прогин деталі (0,01 – 0,04) мм.

7. Встановлено критерії для розділювальних операцій ПУШ, що визначають форму поверхні розділення та точність розмірів деталей, а також конфігурації і мінімальні розміри деталей та їх конструктивних елементів. Точність розмірів відштампованих деталей при вирубуванні на провал залежить від номінального розміру (до 300 мм) і товщини матеріалу (0,1...3 мм) знаходиться у межах 8...16 квалітету точності при використанні бойків з перпендикулярним до вісі торцем, а при використанні бойків зі скошеним торцем – 7...14 квалітету точності; показники шорсткості поверхні зрізання низькоміцних матеріалів знаходяться в межах $Ra = 0,3...0,6$ мкм, а у випадку високоміцних матеріалів $Ra = 0,6...1,0$ мкм.

Розділ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗМІРНОЇ ТОЧНОСТІ ВИРОБІВ ПРИ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ВИТЯГУВАННЯ ПНЕВМОУДАРНИМ ШТАМПУВАННЯМ

Витягування є процесом перетворення плоскої заготовки у порожнисту деталь будь-якої форми (або подальша зміна її розмірів), в більшості випадків циліндричної форми у витягувальних матрицях, де процес відбувається з потоншенням матеріалу в зоні деформування.

Процес витягування плоскої заготовки є одним з найскладніших у операціях як звичайного, так і імпульсного штампування. Процес пневмоударного витягування, як і інші імпульсні методи витягування (вибухове, електрогідравлічне та магнітоімпульсне) ускладнюється високою швидкістю деформування і, відповідно, виникненням значних інерційних сил, які протидіють переміщенню фланця деталі, що витягується.

В процесі витягування кільцева частина заготовки перетворюється в циліндр діаметром d і висотою h . Так як обсяг металу при витягуванні не змінюється, то при повному витягуванні циліндра висота деталі h більше ширини кільцевої частини b і становить:

$$h = b \frac{D + d}{2d} = b \frac{k + 1}{2}, \quad (4.1)$$

де $k = D/d$ – ступінь витягування, D – діаметр заготовки; d – діаметр деталі.

Витягування відбувається за рахунок пластичної деформації, що супроводжується зміщенням значного об'єму металу заготовки збільшуючи висоту деталі. При значному ступені деформації і при невеликій товщині металу зміщений обсяг є причиною утворення гофрів і складок. Для запобігання утворенню дефектів форми застосовується притискання заготовки складкоутримувачем.

Поряд із зусиллям притискання на процес витягування впливають радіуси заокруглення в місцях сполучення поверхонь. Від радіусу

заокруглення робочої кромки матриці залежить величина напружень, що виникають в матеріалі, який штампують, а отже і кількість витяжних операцій, ймовірність обривів, гофрів, потоншень матеріалу (різновтовщинності), особливо в частині сполучення циліндричної ділянки з дном.

При виконанні операції витягування деталей з фланцем методом ПУШ зазвичай виконується по жорсткій матриці і формоутворення відбувається з потоншенням заготовки. Як пуансон використовується рідина. Притискання заготовки до матриці забезпечується притискним кільцем.

Характерною можливістю ПУШ рідиною при формотворчих операціях є використання однієї і тієї ж матриці, як для основного штампування, так і для операцій калібрування.

Формування параметрів точності деталей, що виготовляється витягуванням, зумовлене багатьма параметрами форми і технології виготовлення деталі: ступенем витягування; механічними властивостями матеріалу, який штампують; геометричними параметрами деталі, що виготовляється; відносною товщиною заготовки; тертям на матриці; точністю і якістю поверхні заготовки; конструкцією і точністю матриці; зношеністю матриці; технологічним процесом виготовлення деталі тощо.

Відомо, що точність розмірів деталей при витягуванні з потоншенням визначається, як і в випадку інструментального штампування систематичними і випадковими похибками. Систематичні похибки можна визначити заздалегідь і виключити їх вплив на точність розмірів. Випадкові похибки зазвичай виключити неможливо, але з врахуванням особливостей процесу пневмоударного витягування з потоншенням можна звести їх вплив до найменшої величини.

4.1. Вплив основних конструктивно-технологічних чинників на якість штампування деталей витягуванням

Керування перебігом процесу формоутворення тонколистових деталей для досягнення необхідних показників якості, форми, геометрії і точності розмірів деталей, що штампують, збільшення при цьому граничних коефіцієнтів штампувальної здатності матеріалу, досяга-

ється доступними при проектуванні і реалізації процесу конструктивно-технологічними заходами. Підвищення стійкості також дозволяє знизити процент бракованих деталей (гофри на фланці і хвилястість на поверхні штампування) (рис. 4.1), що виникає в процесі деформування.



Рисунок 4.1– Характерний брак виробів при високошвидкісному витягуванні тонколистових деталей (хлопуни, гофри на фланці і нерівномірне утягування матеріалу)

Ефективність пневмоударного штампування рідиною оцінювали за допомогою загальноприйнятих показників штампувальної здатності, що визначають весь технологічний процес по виду деформування заготовки [97] і ступеня потоншення в найбільш небезпечному перерізі.

Експериментально підтверджено [109], що найбільший вплив на граничні показники штампувальної здатності при пневмоударному штампуванні мають властивості матеріалу заготовки, властивості її поверхні, схема процесу деформування, швидкість деформування, геометрія матриці або пуансона, величина контактного тертя і прийоми інтенсифікації, що застосовуються. При переході до іншого виконання обладнання, використовуючи наведений показник (4.1), можна оцінити напрямок зміни процесу, а отже, здійснювати керування ним. Відпрацювання методики оцінювання ефективності здійснювали для випадку процесу ПУШ витягуванням.

Граничний ступінь витягування конструкційних матеріалів. Експерименти показали, що найбільший вплив на граничний ступінь витягування і якість виробів мають такі фактори: стан поверхні і фізико-механічні властивості матеріалу заготовки; радіус заокруглення робочої кромки матриці; відносна товщина заготовки; швидкість

навантажування заготовки (параметр α); фрикційні властивості матеріалу матриці і заготовки; якість змачення; технологічна схема виконання операції.

Перелічені фактори одноманітно впливають на всі матеріали, що використовуються, а загальний ступінь більш за усе залежить від пластичних властивостей матеріалів.

Однак підвищення пластичних властивостей матеріалів при збільшенні швидкості деформації, з одного боку, і виникнення додаткових динамічних напружень, з іншого – впливають на граничний ступінь витягування зворотним чином. Тому його експериментальне визначення в певних умовах пневмоударного навантаження представляє безперечний інтерес.

Значення граничного ступеня витягування визначали побудовою графіків штампувальної здатності [112] для двох схем витягування – вільного одноударного та вільного двоударного. В експериментах використовували циліндричну робочу камеру 2 (рис. 4.2, а) с внутрішнім діаметром 50 мм. Обсяг води в камері становив $176 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, маса бойка 1 – 1,471 кг, що відповідає параметру $\alpha = 0,119$. Витягування циліндричних стаканчиків проводилася в матрицю 7 діаметром $d_m = 30$ мм. Радіус заокруглення витяжного змінного кільця 6 становив $4S$.

Двоударне витягування здійснювалось за допомогою спеціального складеного бойка (рис. 4.2, б), який має рухомий вкладиш, що дозволяє виконувати подвійний удар за один цикл роботи обладнання.

Для експериментів використовували круглі заготовки з відносною товщиною $0,014 \leq S/D_3 \leq 0,02$ з матеріалів АМцМ, Д1АМ, М1М, АМг3М, АМг6М, Л62, ЭИ659, ЭИ878, 12Х8Н10Т, ВЖ98, ЭП693ВД і з відносною товщиною $0,006 \leq S/D_3 \leq 0,012$ з матеріалів – сталей 08кп, 08пс, 10кп, ЭИ894 та ВТ1-0, ОТ4, ОТ4-1. Заготовки перед витягуванням ретельно змачували. Діаметр заготовок які витягувались складав 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 мм.

В результаті експериментів встановлювали енергію удару, при якій відбувається повне витягування (якщо це можливо) або руйнування заготовки, граничний діаметр заготовки, яку витягують під час одноразового навантаження і відповідне йому значення граничного ступеня витягування $k_{сп.0}$.

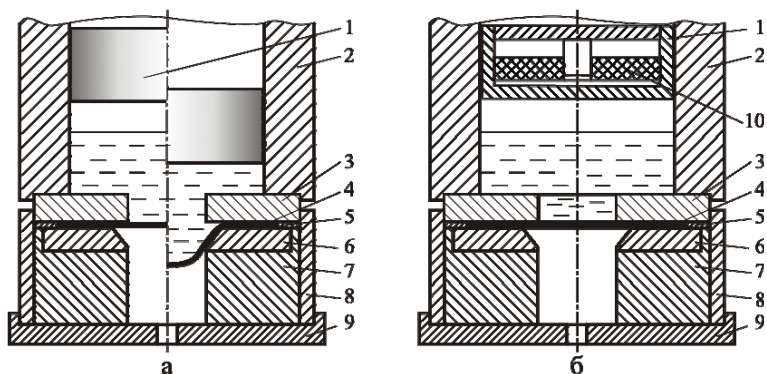
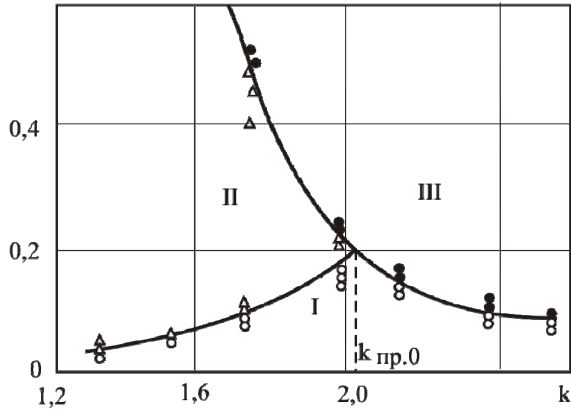


Рисунок 4.2 – Експериментальне оснащення для витягування рідиною:
 а – вільне; б – вільне зі складеним бойком: 1 – бойок; 2 – робоча камера;
 3 – притискач; 4 – заготовка; 5 – центрувальна шайба; 6 – витяжне змінне кільце;
 7 – матриця; 8 – обойма; 9 – притискна плита; 10 – рухомий вкладиш

Отримані криві штампувальної здатності матеріалу ДІАМ при вільному витягуванні і матеріалу АМцМ при витягуванні з складеним бойком показані на рис. 4.3 [112].

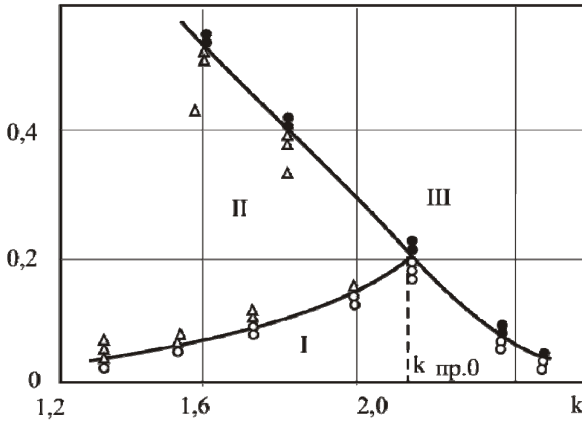
Визначено межі трьох характерних ділянок. Ділянка I визначає такі співвідношення питомої енергії удару бойка W_{num} і початкових ступенів витягування k , при яких можна отримати тільки неповне витягування. Ділянка II визначає такі співвідношення цих величин, при яких відбувається повне витягування заготовки, а ділянка III характеризується тим, що при будь-якому значенні ступеня витягування заготовка руйнується. Загальна для всіх трьох областей точка на кривих штампувальної здатності відповідає граничному ступеню витягування $k_{zp,0}$. Значенню граничного ступеня витягування відповідає тільки одне певне значення питомої енергії удару бойка, що забезпечує повне витягування заготовки, в той час як будь-якому іншому ступеню витягування (менше граничного) відповідає діапазон значень питомої енергії удару бойка, при якому також забезпечується повне витягування заготовки.

$W_{\text{штг}}, \text{МДж/м}^2$



а

$W_{\text{штг}}, \text{МДж/м}^2$



б

Рисунок 4.3 – Графіки штампувальної здатності:

а – матеріалу ДІАМ при вільному витягуванні,

б – матеріалу АМцМ при вільному витягуванні зі складеним бойком;

I, II - неповне і повне витягування, III - руйнування заготовки;

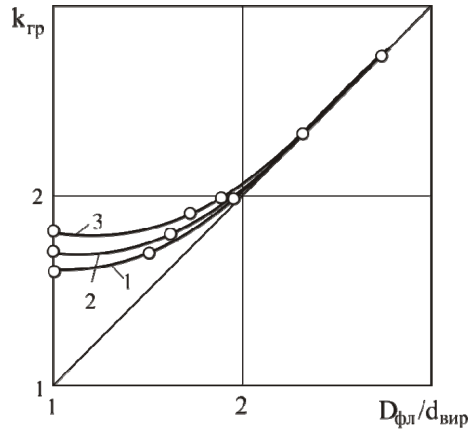
○, △, ● - зразки витягнуті відповідно: частково, повністю і зруйновані

Цей діапазон зменшується зі збільшенням ступеня витягування і наближення його до граничного, отже, чутливість матеріалів до надлишкової енергії зростає із збільшенням ступеня витягування.

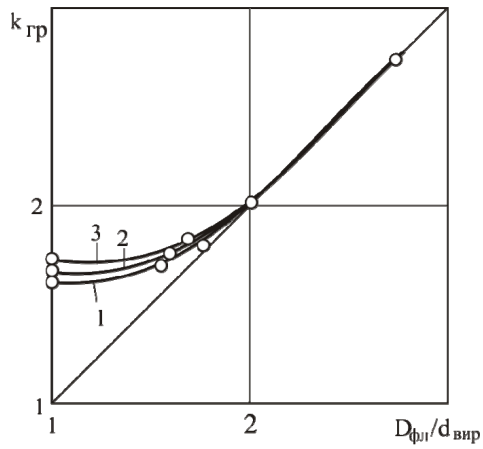
Як показали дослідження, зі збільшенням швидкості деформування ступінь витягування зменшується [112], отже, здійснення процесу деформування заготовки декількома імпульсами дозволить збільшити ступінь витягування (див. табл. 2.6), так як швидкість деформування в цьому випадку знижується.

Процес пневмоударного витягування при багаторазовому навантаженні зручно розглянути на циліндричних деталях з фланцем. Такий процес досить добре характеризується значеннями граничних ступенів витягування k_{ep} залежно від відносного діаметра залишкового фланця стаканчика $D_{фл}/d_{вир}$ і кількості імпульсів навантаження заготовки. Оскільки це завдання аналогічне завданню визначення штампувальної здатності матеріалів при пневмоударному витягуванні з фланцем, що відрізняється лише характером навантаження заготовки, то в експериментах використовували таке ж оснащення, що і при визначенні штампувальної здатності матеріалів при витягуванні деталей з фланцем. Методика проведення експериментів відрізнялася лише характером навантаження заготовки.

Партію заготовок певного діаметра піддавали витягуванню, при цьому енергію удару підбирали таким чином, щоб заготовка до руйнування витримувала 1, 2 (за допомогою складеного бойка) і 3, 4, 5 ударів (за допомогою повторних ударів) в тій же матриці, причому в кожному випадку деформація заготовок досягала максимально можливого рівня, тобто заготовка перебувала на межі руйнування. Отримані результати представлені у вигляді кривих штампувальної здатності, які визначають зв'язок між відносним діаметром фланця, кількістю імпульсів деформування і граничним ступенем витягування (рис. 4.4). Ці криві дозволяють визначити граничні ступеня витягування, допустимі при витягуванні деталей з фланцем та без фланця, залежно від відносного діаметра фланця виробу, радіуса заокруглення матриці і кількості імпульсів навантаження.



а



б

Рисунок 4.4 – Криві штампувальної здатності сталі 08кп при витягуванні в матрицю: а – $r_m = 2$ мм; б – $r_m = 1$ мм; 1, 2, 3 – 1-, 3- та 5-кратне навантаження

Аналіз отриманих залежностей показує, що при пневмоударному витягуванні граничний ступінь витягування деталей як з фланцем, так і без фланця суттєво залежить від кількості імпульсів навантаження заготовки, причому ця залежність більше позначається на процесах витягування у матрицях, в яких відношення $r_m/d_m < 0,1$. Зменшення радіусу ребра матриці призводить до зменшення граничних ступенів витягування при одноударному і двоударному витягуванні. Наприклад, при витягуванні стаканів зі сталі 08кп в матрицю з $r_m = 2$ мм граничні ступеня витягування (для випадку повного витягування) за один удар $k_{np} = 1,7$; за три удари – 1,78, за п'ять ударів – 1,83 (збільшення k_{np} на 10,2 %), в той час як при витягуванні в матрицю з $r_m = 1$ мм ці величини відповідно становили 1,6; 1,66 і 1,7 (збільшення k_{np} на 10,02 %). Встановлено, що кількість імпульсів навантаження заготовки впливає лише на процес витягування, перехід від процесу витягування до процесу формування не залежить від числа імпульсів навантаження заготовки і до того ж діапазону, що і при одноударному витягуванні виробів з фланцем.

Як показали експериментальні дослідження, при двоударному витягуванні (2–5 разове навантаження) збільшується граничний ступінь витягування на 8–10 %. При цьому значення граничних ступенів витягування зростають прямо пропорційно кількості імпульсів навантаження. Також при використанні багаторазового навантаження зменшується величина потоншення в небезпечних перерізах готового виробу. При цьому радіальні деформації в центрі зразків зменшуються на 20 - 25 %.

Для визначення точності і якості виготовлення поверхні трубних переходів напівсферичної форми обрані два розміри: зовнішній діаметр в області екватора півсфери D і внутрішній діаметр в області стикування d у денцевій частині. До цих розмірів пред'являються основні вимоги. При інструментальному штампуванні ці розміри в подальшому піддаються механічному обробленню різанням. У виготовлених трубних переходах значення діаметрів D і d вимірювалося з точністю до 0,01 мм в двох взаємно-перпендикулярних напрямках – уздовж і впоперек напрямку прокатування. Усереднені результати вимірювань наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розміри виготовлених деталей

	Матеріал	S_0 , мм	Ступінь витягування	D , мм	d , мм	$\Delta_{D_{\max}}$, мм	% D	$\Delta_{d_{\max}}$, мм	% d
Одноударне витягування	АМцМ	2,94	1,8	189,53	59,74	-0,47	0,25	-0,26	0,43
		$\pm 0,15$		189,61	59,65	-0,39	0,21	-0,35	0,58
	М1М	3,07	1,7	189,65	59,63	-0,35	0,18	-0,27	0,45
	12Х18Н10Т	$\pm 0,13$		189,72	59,57	-0,28	0,15	-0,33	0,55
Двоударне витягування	АМцМ	2,97	1,9	189,49	59,71	-0,51	0,27	-0,29	0,48
		$\pm 0,11$		189,57	59,48	-0,43	0,23	-0,22	0,37
	М1М	2,94	1,95	189,96	59,95	-0,09	0,05	-0,07	0,12
		$\pm 0,15$		189,99	60	-0,08	0,04	-0,05	0,08
	12Х18Н10Т	3,07	1,9	189,98	59,95	-0,07	0,04	-0,1	0,17
		$\pm 0,13$		190,01	59,96	0,05	0,03	-0,08	0,13
	2,97	2,0	189,97	59,94	-0,1	0,05	-0,09	0,15	
	$\pm 0,11$		189,94	59,98	-0,06	0,03	-0,05	0,08	

Крім діаметрів D і d тут наведені їх максимальні відхилення від номінального значення $\Delta_{D_{\max}}$ і $\Delta_{d_{\max}}$ відповідно, а також товщина вихідного листа S_0 . Як видно з табл. 4.1, точність ПУШ рідиною достатньо висока, так як відхилення вимірюваних діаметрів не перевищує для одноударного 0,5 мм а для двох ударного 0,1 мм. Для деталей таких розмірів в довідниках з холодного штампування [131, 50] наводяться допустимі відхилення за діаметром більше ($\pm 0,4 - 0,9$ мм) від отриманих відхилень (0,05 – 0,1 мм) під час двохударного штампування.

Якість поверхні відштампованих пневмоударним методом виробів визначається тільки якістю поверхні вихідного матеріалу. Шорсткість вихідних листових матеріалів вимірювали цифровим профілометром Абрис ПМ7М. Середня шорсткість листів коливалася від $R_a = 0,63$ до $R_a = 0,94$ мкм. Шорсткість поверхонь отриманих виробів знаходиться в аналогічних межах. Візуальне дослідження інших матеріалів підтверджує висновок, що якість поверхні виробів отриманих пневмоударним методом визначається тільки станом вихідної заготовки.

Проведені дослідження показали, що пневмоударний метод штампування повністю задовольняє вимогам, що пред'являються за точністю і якістю.

4.2. ВПЛИВ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ПЕРЕБІГ ПРОЦЕСІВ ПНЕВМОУДАРНОГО ВИТЯГУВАННЯ

Вплив відносної маси бойка на граничний ступінь витягування.
Відносна маса бойка α – це відношення маси рідини m_p в робочій камері до маси бойка m_b .

Вплив цього фактора на процес витягування виявляється в зміні граничного ступеня витягування и радіальних деформацій ε_3 в центрі заготовки.

Вимірювання параметра α визначали експериментальним шляхом [117], варіюючи масу бойка. При цьому використовували бойки масою 0,0935; 0,269; 0,771; 0,995 та 1,471 кг і робочу камеру з постійною масою рідини 0,176 кг, що відповідає значенням $\alpha = 1,822$; 0,654; 0,228; 0,177 та 0,119. Дослідження проводили на матеріалах АМцМ, Д1АМ, М1М і сталі 08кп товщиною 1 мм. Отримані в результаті експериментів значення граничних ступенів витягування дозволили побудувати залежності $k_{сп} = f(\alpha)$ для кожного з досліджених матеріалів (рис. 4.5), з яких видно, що $k_{сп}$ зі

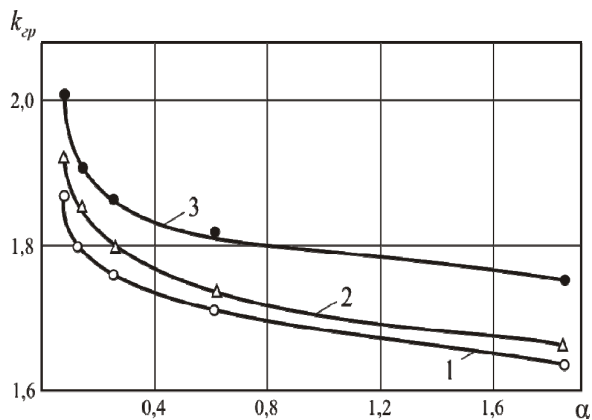


Рисунок 4.5 – Залежність граничного ступеня витягування від відносної маси бойка: 1 – Д1АМ; 2 – М1М; 3 – сталь 08кп

збільшенням α для всіх досліджуваних матеріалів зменшується. Особливо помітний вплив α на граничний ступінь витягування в порівняно вузькому діапазоні його значень від 0,119 до 0,226. Таким чином, для отримання виробів з високими ступенями витягування необхідно зменшувати відносну масу бойка. Однак збільшення вихідного значення маси бойка обмежується помітним зниженням швидкості його удару і внаслідок цього – втратою ефективності процесу [114]. Встановлено, що при діаметрах циліндричних бойків пневмоударних пресів 180...220 мм зменшення значень α нижче 0,20 неприпустиме, так як при швидкостях удару бойка об рідину 5...10 м/с вона легко витісняється крізь радіальний зазор між бойком і стволом пневмоударного блоку. Це явище знижує ефективність процесу і може призвести до удару бойка по штамповому оснащенню [128].

При створенні обладнання завжди доводиться знаходити компромісне рішення – або оснащувати машини змінними бойками різної маси, або створювати спеціальні пристрої, що дозволяють змінювати α без переналадження преса. Так як в існуючих моделях машин співвідношення маси рідини і бойка не завжди постійне, то залежності (див. рис. 4.5) мають практичне значення і дозволяють визначити граничний ступінь витягування різних матеріалів залежно від значень α .

Відносна маса бойка має однаковий характер впливу на граничний ступінь витягування для всіх досліджених матеріалів, що дозволяє враховувати цей вплив за допомогою поправкових коефіцієнтів k_α . З огляду, що граничні ступеня витягування визначали при оптимальних значеннях $\alpha = 0,119$.

Зменшення відносної маси бойка дозволяє не тільки збільшити граничні ступеня витягування заготовки, а й одночасно знизити рівень радіальних деформацій ε_r в небезпечному перерізі заготовки (рис. 4.6).

Величина його впливає на граничний ступінь витягування заготовки, ступінь деформацій по перетину деталі і стійкість заготовки до гофрування.

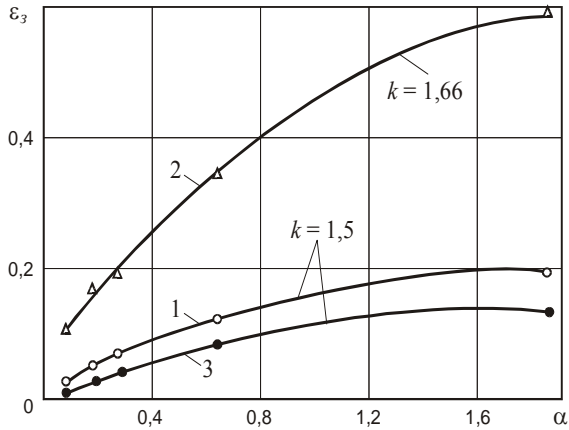


Рисунок 4.6 – Залежність максимальної радіальної деформації ϵ_3 від відносної маси бойка α : 1 – Д1АМ; 2 – М1М; 3 – сталь 08кп

Вплив радіусу перетяжної кромки матриці на процес пневмоударного витягування. Радіус перетяжної кромки матриці r_m є основною конструктивною характеристикою технологічної оснастки.

При цьому збільшення r_m дозволяє підвищити граничний ступінь витягування, зменшити деформації і забезпечити виготовлення якісних деталей з гнучкістю $\lambda = d / \delta \geq 200$ (d, δ – діаметр і товщина стінки виробу відповідно), але в той же час знизити стійкість заготовки до утворення гофрів.

Виходячи з цього очевидно, що існують деякі оптимальні значення радіусів заокруглення матриці.

Вплив радіусу r_m на процес витягування визначали за зміною граничного ступеня витягування k_{sp} . Для зміни радіусів заокруглення матриці використовували змінні витяжні кільця, які забезпечували діапазон зміни радіуса r_m від $2S$ до $12S$. Граничні ступеня витягування при змінному радіусі визначалися побудовою графіків штампувальної здатності.

За результатами досліджень побудовано залежності граничних ступенів витягування k_{sp} – від відносного радіуса матриці r_m/S для різних матеріалів (рис. 4.7), з яких випливає, що найбільше зростання

граничного ступеня витягування спостерігається в діапазоні $r_m/S = 6 \dots 10$. При збільшенні радіуса заокруглення матриці до $12S$ збільшення граничного ступеня витягування сповільнюється, що можна пояснити початком процесу утворення гофрів на фланці заготовки.

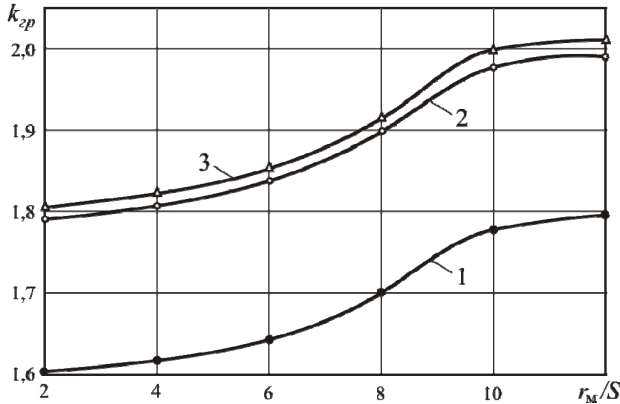


Рисунок 4.7 – Залежність граничного ступеня витягування від відносного радіуса заокруглення матриці:
1 – М1М; 2 – сталь 08кп; 3 – 12Х18Н10Т

Утворення гофрів є в переважній більшості випадків неприпустимим, тому $r_m = 10S$ для заготовок з співвідношенням $S/D_3 < 0,0125$ є верхньою межею при здійсненні процесу ударного витягування рідиною.

Зміна радіуса r_m позначається не тільки на ступені витягування, а й на величині та характері розподілу радіальних деформацій уздовж твірної виробів, що витягуються. Особливо помітний вплив радіус r_m справляє на радіальні деформації донної частини виробу, значення яких можна зменшити майже в три рази, збільшивши радіус r_m з $2S$ до $12S$.

Збільшення радіусу r_m сприяє отриманню виробів з більш рівномірною товщиною стінки, причому при $r_m = (8 \dots 10)S$ максимальні деформації ε , не вищі за $0,20 \dots 0,25$ і стають порівнянними з деформаціями при витягуванні в звичайних штампах.

Також на підставі експериментів зі штампування деталей з гнучкістю $150 < \lambda < 1000$ була отримана напівемпірична залежність відносного радіуса заокруглення перетяжного ребра матриці ($\bar{R}_{np} = R_{np}/\delta$):

$$\bar{R}_{np} = (0,375 \cdot k_0 - 0,5)\lambda, \quad (4.2)$$

що встановлює зв'язок зі ступенем витягування $k_0 = D_0/d$ (D_0 – діаметр заготовки) та гнучкістю λ .

Графік залежності (4.2) наведено на рис. 4.8. Точками показані значення \bar{R}_{np} , що збігаються зі значеннями, рекомендованими практикою листового штампування [131]. Графік $\bar{R}_{np} = f(k_0; \lambda)$ може слугувати номограмою для визначення оптимальних радіусів заокруглення перетяжних ребер при відомих значеннях початкового ступеня витягування k_0 і гнучкості λ . Експерименти показали, що гофри на поверхні, що виникають при штампуванні зі збільшеними в порівнянні з традиційно прийнятими радіусами заокруглення, не перевищують гранично допустимі значення при їх усуненні в умовах двохвісного розтягування.

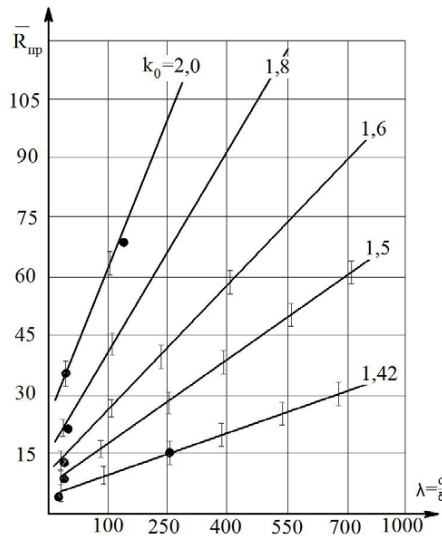


Рисунок 4.8 – Рекомендовані значення оптимальних радіусів заокруглення перетяжних ребер

Відносна висота гофру:

$$\bar{h} = \frac{h}{b} = 0,1 + \left(\frac{k_0}{k_\phi} \right)^2 \cdot (k_0 - 1) \leq 1,2, \quad (4.3)$$

де h, b – максимальна висота і ширина гофру на поверхні деталі, k_ϕ – ступінь витягування фланця, $k_\phi = D_0/D_\phi$ (D_0, D_ϕ — діаметри заготовки до і після витягування).

На рис. 4.9 показані деталі типу напівсфера, відштамповані з заготовок АМц товщиною 0,5 мм діаметром 300 мм ($\lambda = 600$). Потоншення відштампованих деталей не перевищувало 20 %.

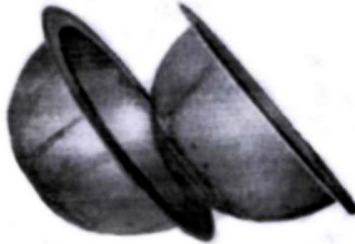


Рисунок 4.9 – Деталі типу «напівсфера» відштамповані методом пневмоударного штампування рідиною

Глибина штампування напівфабрикату, як показали експерименти, може бути знайдена за формулою:

$$f_n = f / (k_r + \Delta), \quad (4.4)$$

де f – глибина деталі, k_r – технологічний коефіцієнт $k_r \leq 1,25$, Δ – експериментальний коефіцієнт $\Delta = 1,04 \div 1,1$.

Отримані залежності (4.2) – (4.4) дозволяють прогнозувати техпроцес ПУШ тонкостінних якісних деталей за допомогою штучного регулювання величиною радіусів заокруглення перетяжних ребер в матриці і швидкості деформування при ПУШ.

Вплив відносної товщини заготовки на процес пневмоударного витягування. Відносна товщина заготовки S/D_3 є основним технологічним параметром, що характеризує геометричні розміри заготовки. Вона визначає жорсткість заготовки, тиск, необхідний для витягування граничну ступінь витягування. Вплив цієї величини на граничний ступінь витягування при звичайному штамповому витягуванні відомий [131, 50]. Але витягування тонколистових заготовок в умовах пневмоударного навантаження має ряд відмінних рис, які можуть помітно змінити характер впливу величини відносної товщини заготовки на граничний ступінь витягування.

Кількісний та якісний аналіз впливу величини відносної товщини заготовки на граничний ступінь витягування проводили шляхом побудови кривих штампувальної здатності. В експериментах використовували матриці діаметрами 10, 15, 20, 30, 50, 80, 160 мм та заготовки з матеріалів сталь 08кп, 12Х18Н10Т, ВТ1-0, ОТ4-1 товщиною 0,5 мм, що дозволило отримати діапазон варіювання відносної товщини заготовки від 0,001 до 0,03.

Так як закономірність зміни максимальних радіальних деформацій ε_3 при різних умовах витягування однакова, то їх зміну можна описати простою апроксимуючою залежністю [129]:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{3\max} k_\varepsilon, \quad (4.5)$$

де $\varepsilon_{3\max}$ – максимально можлива для матеріалу радіальна деформація, визначена в роботах [131, 96, 125]; k_ε – коефіцієнт, що враховує вплив співвідношення k/k_{zp} на ε_3 .

Значення коефіцієнта k_ε при різних значеннях k/k_{zp} складають:

k/k_{zp}	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6
k_ε	0,62	0,4	0,19	0,09	0,08

Радіус перетяжної кромки матриці прийнятий 4S. Залежність граничного ступеня витягування k_{zp} від відносної товщини заготовки показана на рис. 4.10 з якого видно, що залежно від значення S/D_3 граничний ступінь витягування може збільшуватися більш ніж на 20 %. Цю обставину слід враховувати при проектуванні технологічних

процесів. Враховувати цей вплив можна за допомогою коефіцієнтів k_s (табл. 4.2) [117].

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнтів k_s для різноманітних матеріалів

Відносна товщина заготовки, %	АМцМ, АД1, АМг5М, АМг6М, Д1АМ, М1М, М1Т, Л62, 12Х18Н10Т, ЭИ402, ЭИ100, ЭИ878, ЭИ703, ЭИ894, ЭП693ВД, сталі 08кп, 10кп	Сталі 08пс, 30ХГСА, ЭИ712, ЭИ659; ВТ1-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ1-00
2,6 – 2,0	1,01 – 1,00	1,09 – 1,08
2,0 – 1,5	1,00 – 0,97	1,08 – 1,05
1,5 – 1,0	0,97 – 0,92	1,05 – 1,00
1,0 – 0,6	0,92 – 0,87	1,00 – 0,95
0,6 – 0,4	0,87 – 0,84	0,95 – 0,92
0,4 – 0,2	0,84 – 0,82	0,92 – 0,90
0,2 – 0,1	0,82 – 0,80	0,90 – 0,88

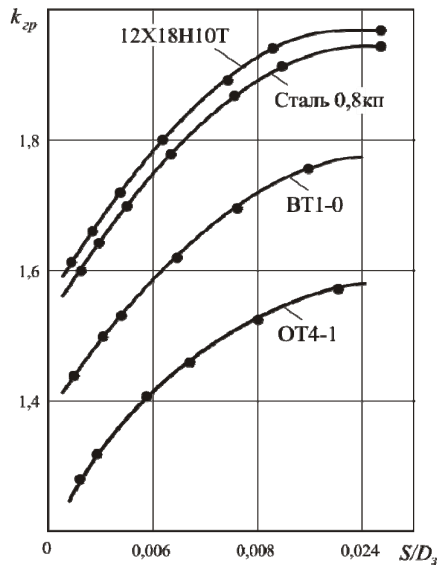


Рисунок 4.10 – Залежність граничного ступеня витягування від відносної товщини заготовки для різних матеріалів

Відносна товщина заготовки S/D_s також впливає на характер і величину змін максимальних радіальних деформацій в небезпечному перерізі зразків. В якості критерію цих деформацій використовують відносне потоншення $\Delta S/S_0$, де ΔS – різниця між початковою і кінцевою товщиною матеріалу в небезпечному перерізі. З залежності потоншення центру заготовки від ступеня витягування k (рис. 4.11) видно, що характер зміни відносного потоншення однаковий для всього діапазону відносної товщини заготовки. Однакове і його максимальне значення. Максимальне потоншення досягається при витягуванні заготовок граничного розміру, який змінюється відповідно до значень граничного ступеня витягування. Таким чином, потоншення залежить тільки від того, наскільки близько ступінь витягування заготовки наближається до граничного значення. Цей висновок підтверджується залежністю потоншення від відносного ступеня витягування k/k_{ep} (рис. 4.12), де k_{ep} – граничний ступінь витягування, який можна отримати в цих умовах [147].

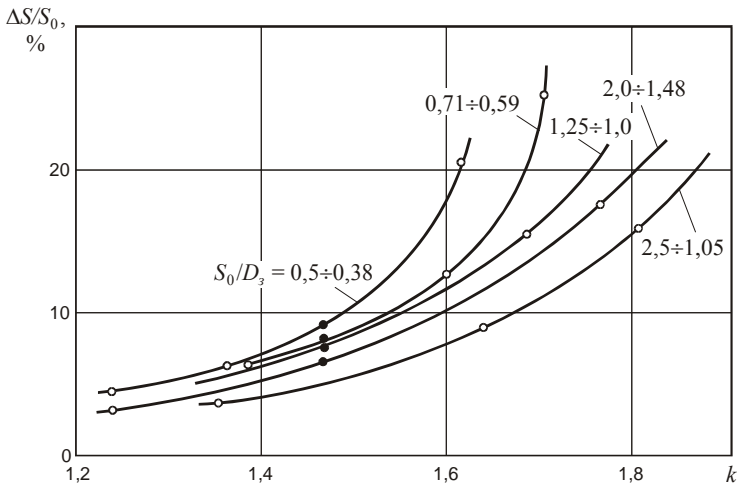


Рисунок 4.11 – Залежність відносного потоншення в центрі зразка від ступеня витягування при різних відносній товщині заготовки

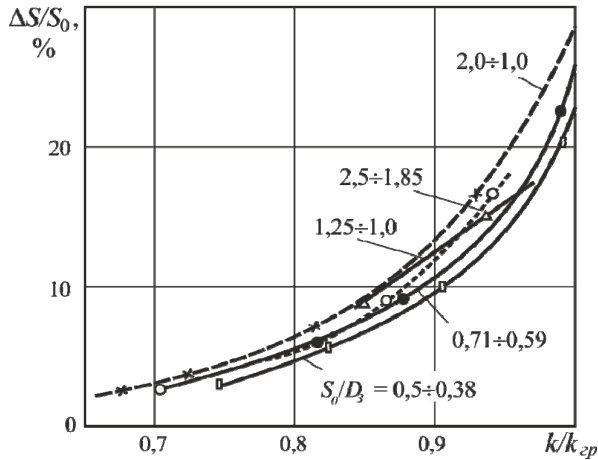


Рисунок 4.12 – Залежність потоншення в центрі зразка від відносного ступеня витягування при різних відносній товщині заготовки

Вплив змащування на процес пневмоударного витягування. На підвищення продуктивності праці і зниження браку деталей, що витягуються при пневмоударному штампуванні значний вплив має змащування матеріалу. Варто зазначити, що при цьому одночасно повинні враховуватися конструкція технологічного оснащення, швидкість витягування, характеристика листового матеріалу, а також фізико-хімічні властивості змащувальної речовини.

В імпульсних методах штампування обрання оптимального змащування ускладнено тим, що необхідно враховувати вплив швидкості деформування на ефективність дії змащування, так як при підвищенні швидкості вимоги до міцності змащувальної плівки підвищуються. Змащування має утворювати розділовий шар, що перешкоджає безпосередньому контакту виробу зі штампом і зменшує опір тертя поверхонь, що ковзають одна по одній.

Змащувальні матеріали при високому тиску повинні мати хорошу міцність плівки і стійку в'язкість. Крім того, при пневмоударному штампуванні змащування з заготовки може потрапляти в робочу рідину (масло, емульсія) установки для ударного штампування, тому

при обранні виду змащування необхідно враховувати, щоб воно не забруднювало робочу рідину.

Експериментально встановлено, що змащування без наповнювачів не дає достатньої міцності плівки і порівняно легко витискається.

Найкращими є змащування з великим вмістом наповнювачів (крейди, тальку, графіту) що знижують коефіцієнт тертя в 2 – 3 рази, підвищують стійкість робочих елементів (витяжних матриць) в 2 – 5 разів, усувають можливість дефектів фланців і донної частини деталей (розриви або відрив металу) і які позитивно впливають на збільшення граничного ступеня витягування.

У табл. 4.3 наведено склад змащувачів і коефіцієнти тертя для різних матеріалів, що рекомендуються при пневмоударному штампуванні.

Таблиця 4.3 – Змащувальні матеріали, призначені для витягування порожнистих деталей із застосуванням пневмоударного штампування

Умови витягування, склад змащувачів	Матеріали, коефіцієнт тертя			
	Сталь 08кп	Сталь 12Х18Н10Т	Алюміній А1	Дюралюміній Д16М
без змащування	0,2...0,25	0,3...0,35	0,25	0,22
змащування без наповнювача, веретенна олива, 100 %	0,15	0,25	0,15	0,15
змащування без наповнювача, веретенна олива 75 %, вода 25 %	0,18	0,28	0,16	0,16
змащування з наповнювачем: веретенна олива 50 %, графіт 40 %, сірка 8 %, спирт 2 %	0,08...0,09	0,22...0,20	0,12	0,15
змащування з наповнювачем: веретенна олива, милонафт, тальк, гіпс	0,08	0,15	0,15	0,15
змащування з наповнювачем: олива 60 %, графіт 40 %	0,18...0,10	0,10	0,10	0,08...0,10

Вплив тиску притискання складкоутримувача на якість деталей, що виготовляються витягуванням.

Для отримання якісного витягування істотне значення має ретельне встановлення складкоутримувача (притискного кільця) і визначення необхідного тиску.

Притискання заготовки застосовується для того, щоб запобігти утворенню складок на стінках деталі або фланця. Тиск притискання має бути оптимальним, так як підвищення тиску збільшує зусилля витягування та призводить до відриву дна або фланця деталі, а зниження тиску викликає утворення складок.

Експериментально встановлено [148], що в разі пневмоударного штампування для першої операції витягування з плоскої заготовки притискання необхідне, коли

$$D_3 - d_1 \geq 20S, \quad (4.6)$$

де D_3 – діаметр плоскої заготовки, мм; d_1 – діаметр першого витягування, мм; S – товщина матеріалу, мм.

Для другої і наступних операцій необхідність притискання залежить від відносної товщини матеріалу ε і визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{S}{d_{n-1}} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

де d_{n-1} – діаметр другої і наступних операцій, мм.

Витягування здійснюється з притисканням, якщо $\varepsilon \leq 1,2$, та без притискання якщо $\varepsilon > 1,4$.

На рис. 4.13 показана форма робочих частин матриці при витягуванні без притискання. Матрицю (рис. 4.13, а) з конічною робочою частиною (з утворюючим кутом 30°) рекомендується застосовувати при порівняно невеликих переходах першого витягування, коли ступінь витягування $k_{sp} \leq 1,66$. Матрицю з криволінійним профілем (рис. 4.13, б) слід застосовувати для першого витягування, коли $k_{sp} \geq 1,66$.

Від складкоутримувача можна відмовитися при малій висоті деталей, що витягуються.

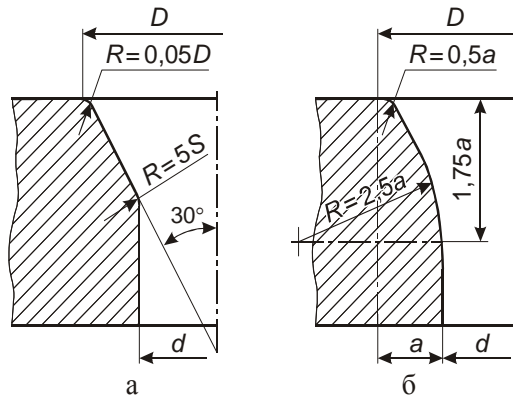


Рисунок 4.13 – Форма робочих частин витяжних матриць при витягуванні без притискування

Досяжна без складкоутримувача висота деталі що витягується h залежить від товщини матеріалу S і діаметра деталі d . Висота h визначається за такою емпіричною залежністю:

$$h \leq 0,3 \sqrt[3]{d^2 \sqrt{S}}, \text{ мм.} \quad (4.8)$$

Експериментальне дослідження впливу зусилля притискування на процес витягування в умовах пневмоударного штампування проводилось при виготовленні деталі «стакан» зі сталі 08кп товщиною 0,4 мм, з внутрішнім діаметром $d = 50$ мм, висотою $h = 38$ мм, з заготовки $D = 100$ мм.

Експерименти проводилися на оснащенні для витягування рідиною. Тиск притискування змінювався в діапазоні $P_n = 0,98; 1,47; 1,96; 2,45$ МПа.

Було виготовлено чотири партії деталей по десять деталей в кожній партії. Тиск створювався за допомогою вбудованих в конструкцію штампа гідравлічних циліндрів від цехової повітряної мережі через пневогідроперетворювач. Тиск притискування фіксувався манометром.

Розрахунковий тиск притискування при першому витягуванні циліндричних деталей з плоскої заготовки при пневмоударному штампуванні рідиною можна знайти за формулою [114]:

$$p_n = C \cdot \left[(\beta - 1)^3 + 0,5 \frac{d}{100 \cdot S} \right] \cdot \sigma_b, \quad (4.9)$$

де β – співвідношення діаметрів заготовки і матриці D_3/d перед початком формозміни; C – коефіцієнт, визначений експериментально, який в даному випадку може бути прийнятий рівним 0,25.

Також тиск притискання для конкретного випадку може бути розрахований за виразом $p_n = q_0 \cdot \sigma_B$, де q_0 – питомий тиск притискання для матеріалу з одиничною межею міцності та може бути визначений з графіка, наведеного на рис. 4.14.

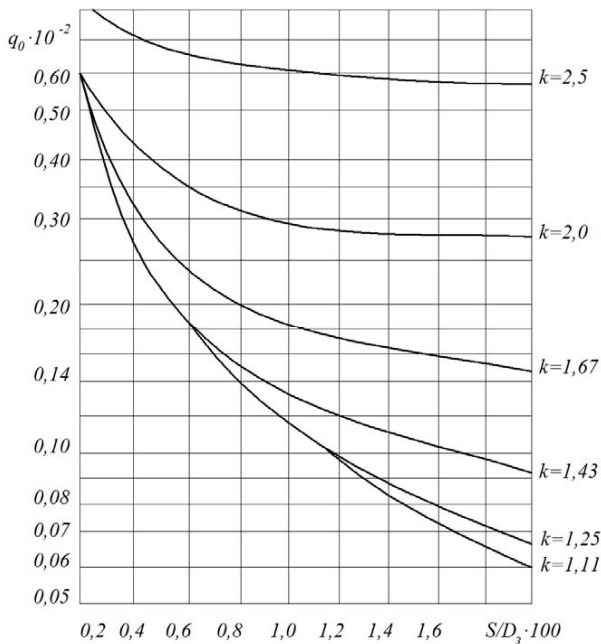


Рисунок 4.14 – Залежність питомого тиску притискання від відносної товщини заготовки для матеріалу з одиничною межею міцності

Грунтуючись на результатах витягування напівсферичних і близьких до них за формою днищ можна зробити висновок, що ПУШ дозволяє витягувати куполоподібні деталі без застосування перетяж-

них порогів, двохперехідного штампування та інших спеціальних прийомів з відносною товщиною заготовки у два – чотири рази меншою (табл. 4.4), ніж допускається при витягуванні пуансоном [149].

Таблиця 4.4 – Технологічні можливості витягування ПУШ на установці Т-1324

Відношення $\frac{S/D_3 \cdot 100\%_{розр}}{S/D_3 \cdot 100\%}$	Відношення $\frac{S/D_3 \cdot 100\%_{сп}}{S/D_3 \cdot 100\%}$	Ступень витягування D_3/d	Вид притискання
3,95	1,98–2,17	1,69	Притискання на заготовку
3,08	1,08–1,18	1,69	Притискання на заготовку
4,23	2,06–2,38	1,78	Фіксований зазор 0,95 мм
2,50	1,38–1,51	1,38	Притискання на заготовку

Також пневмоударним витягуванням отримані сферичні денця діаметром до 440 мм при відносній товщині 0,23 %, що в 4,15 рази менше розрахункової при ступеню витягування $k = 1,55$ за одну операцію, що в 1,9 – 2,2 рази менше граничного ступеню витягування.

Якщо розрахунок граничної відносної товщини заготовки проводиться з використанням залежності, що наведена в роботі [150] для витягування пуансоном, то стосовно ПУШ витягуванням, як показали експерименти, коефіцієнт в цій залежності може бути зменшений в чотири рази:

$$\left(\frac{S}{D_3} \right)_{сп} = 0,027 \sqrt{\frac{S}{R_{сф}}}. \quad (4.10)$$

Враховуючи, що умови стійкості заготовки при формуванні вісесиметричних елементів несферичної форми приблизно подібні до

умов стійкості заготовки при формуванні сферичних елементів, то отримані результати можна поширити і на витягування еліптичних, неглибоких конічних та інших близьких до них за формою деталей (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд деталі типу «обтічник»

Дослідження показали, що при ПУШ витяжкою збільшення радіусу перетяжного ребра матриці позитивно дається взнаки до величини $R_m = 10S$.

На діаграмі (рис. 4.16) наведено показники якості із зазначенням зовнішніх ознак браку при різних значеннях питомого тиску притискання заготовки.

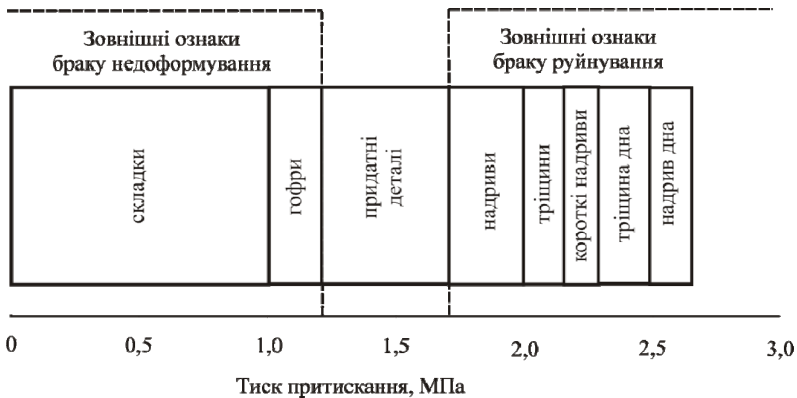


Рисунок 4.16 – Вплив тиску притискання на якість деталей

Встановлено, що напруження в початковій стадії витягування з притисанням мають найбільше значення при високому ступені деформації. При витягуванні зі зниженим ступенем деформації початкові напруження досягають незначних величин, а при витягуванні без притисання практично дорівнюють нулю.

Фактична величина напружень в небезпечному перерізі, а отже і величина зусилля притисання залежить від опору металу деформації σ_B , ступеня деформації $\beta = D_3/d$, відносної товщини листа $\varepsilon = S/d$, радіуса заокруглення матриці r_m і змащення. Приймаємо найбільше допустиме напруження в небезпечному перерізі $\sigma_g = 1,1 \cdot \sigma_b$, та використовуючи результати експериментів і виробничі дані складемо діаграму для визначення тиску притисання (рис. 4.17).

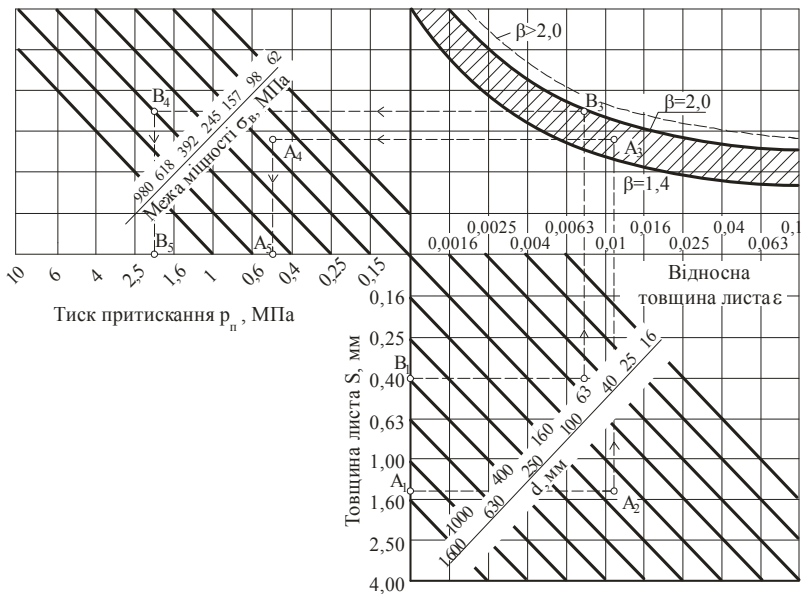


Рисунок 4.17 – Номограма визначення тиску притисання при витягуванні круглих заготовок

На рис. 4.18 показані деталі отримані в процесі експериментів по дослідженню тиску притискання заготовки при витягуванні пневмодарним штампуванням.

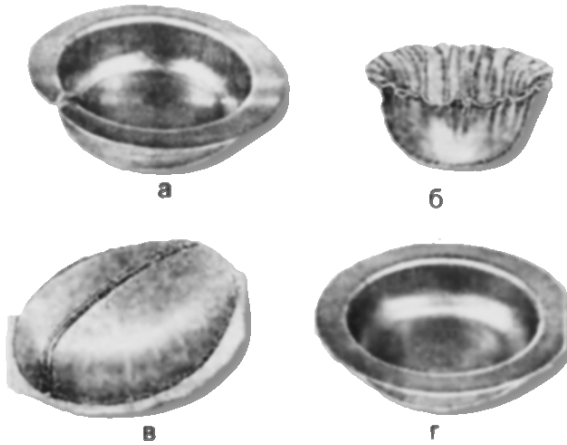


Рисунок 4.18 – Деталі, отримані при різних тисках притискання:

а – 1,96 МПа;

б – 0,98 МПа;

в – 2,45 МПа;

г – 1,47 МПа

Проведені дослідження та аналіз відомих джерел дозволили розробити класифікатор основних факторів, що впливають на якість деталей в процесі витягування методом ПУШ, з урахуванням місця виникнення, характеру дії і ступеня впливу при виконанні технологічних операцій (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Класифікація факторів, що впливають на параметри якості деталей при формоутворенні методом пневмоударного штампування

№ п/п	Найменування	Вид		Характер дії на похибки	Ступінь впливу на процес
		Техно-логічний	Конструктивний		
1	Матеріал робочих частин штампа	+		Систематичний	Істотний
2	Товщина матеріалу, який штамнують		+	Систематичний	Домінуючий
3	Механічні властивості матеріалу, який штамнують		+	Систематичний	Домінуючий
4	Швидкість деформування, зусилля і робота по деформації	+		Випадковий	Істотний
5	Конструкція витяжної матриці (радіус матриці, форма робочого контуру)	+		Систематичний	Домінуючий
6	Діаметр заготовки		+	Систематичний	Домінуючий
7	Зусилля притискання заготовки	+		Випадковий	Істотний
8	Відносна маса бойка	+		Систематичний	Домінуючий
9	Діаметр робочого контуру матриці		+	Систематичний	Домінуючий
10	Змашування заготовки, матриці	+		Випадковий	Істотний
11	Точність встановлення заготовки	+		Випадковий	Незначний

4.3. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ОПЕРАЦІЙ ВИТЯГУВАННЯ ПУШ

Широке впровадження пневмоударного штампування при виконанні формотворчих операцій листового штампування стримується через відсутність науково-обґрунтованих даних по можливостях цього методу з досягнення параметрів точності.

Для визначення можливостей з забезпечення параметрів точності операцій витягування пневмоударним штампуванням проведені спеціальні дослідження з використанням методу планування експерименту.

Виходячи з аналізу умов експлуатації установок для пневмоударного штампування на підприємствах галузі, а також результатів експериментальних досліджень, викладених в розд. 4.1, для аналітичного дослідження точності процесу витягування були обрані наступні параметри штампованих деталей: величини відхилень геометричних розмірів і форми штампованих деталей з урахуванням домінуючих факторів, що впливають на величину цих параметрів.

Для вирішення завдань такого типу в даний час широкого поширення отримали методи планування експериментів, яка дозволяє скоротити обсяг робіт, відібрати суттєві фактори, розробити теоретичні моделі об'єкта і оцінити їх константи, визначити оптимальні умови процесу.

Основні положення теорії планування експерименту досить повно викладені в численних вітчизняних і іноземних джерелах [151, 152].

Таким методом вирішуються інтерполяційні та екстремальні задачі. Рішення інтерполяційної задачі зводиться до знаходження математичної моделі, що встановлює зв'язок між вхідними незалежними змінними і функцією відгуку. Наприклад, для нашого випадку можна встановити зв'язок між конструктивними технологічними особливостями процесу витягування та його точністю.

Методи планування експерименту припускають кібернетичний підхід до вивчення процесів, внутрішні закономірності яких недостатньо з'ясовані через складність структури самого об'єкта, уявляючи об'єкт дослідження у вигляді «чорної скриньки» з безліччю «входів»

(фактори) і «виходів» y_i (функція відгуку, параметр оптимізації, цільова функція).

У нашому випадку «чорний ящик» являє собою процес штампування з усіма його зв'язками, заданий нескінченно великою кількістю диференціальних рівнянь руху.

Математичне рівняння такого об'єкта, як правило, невідоме, тому функцію відгуку можна представити у вигляді відрізка полінома деякого ступеня:

$$x = b_0 + \sum b_i u_i + \sum b_{ij} u_i u_j, \quad (4.11)$$

де x – функція відгуку (наприклад, показник точності виробів штампування);

u_i, u_j – фактори, що впливають на x ;

b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти полінома.

Завдання полягає у визначенні величини і знаків коефіцієнтів полінома.

Як фактори, так і функція відгуку повинні відповідати певним вимогам. Функція відгуку повинна мати зрозумілий фізичний зміст, виражатися числом, мати область визначення (сукупність всіх значень під час проведення експерименту) тощо.

При обранні факторів виходимо з таких міркувань:

1. Фактори повинні бути визначені операціонально. Це означає, що відомий їх фізичний зміст, вказані способи зміни величини факторів, а також способи контролю цієї зміни, відома помилка в точності їх фіксації.

2. Кожен фактор повинен мати область визначення. При плануванні експерименту зазвичай розглядають дискретну область визначення.

3. Обмеження областей визначення факторів можуть бути принциповими і технічними.

4. Бажано мати жорстко фіксоване значення фактора. У загальному випадку досить знати точність фіксації. Це дозволить визначити необхідну кількість повторних дослідів, а також достовірність отриманих результатів.

5. Обрання розмірності факторів в найпростіших випадках майже не створює труднощів. Однак в складних ситуаціях ця проблема далека від вирішення.

6. Важливо, щоб фактори не були скорельовані один з одним. Це означає, що зміна будь-якого фактора не повинна викликати зміни інших факторів. В протилежному випадку планування експерименту ускладнено.

7. Фактори повинні бути сумісні. Несумісність факторів сприяє такому їх поєднанню, яке не можна відтворити зворотно. Наприклад, режими штампування, що викликають вибух, займання або інші незворотні зміни.

Відбираючи фактори, крім усього іншого, необхідно намагатись скоротити остаточний список факторів до мінімуму, так навіть невелике скорочення їх кількості призведе до значного скорочення експериментів.

При складанні попереднього списку факторів використовуємо класифікатор (див. табл. 4.5). Використання апріорної інформації не суперечить ідеї «чорної скриньки». Чим більше буде інформації, тим модель об'єкта дослідження буде складена точніше [145, 148].

Остаточний вибір факторів здійснювався методом багатофакторного дисперсійного аналізу і представлений в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Досліджувані фактори

U_1	Товщина матеріалу, який штампують, мм
U_2	Діаметр заготовки, мм
U_3	Характеристика міцності матеріалу, який штампують, σ_g , МПа
U_4	Відносне відхилення від розрахункового тиску притискання $\Delta P_{np} / P_{np}$
U_5	Кількість відштампованих деталей, тис. шт.

Матриця планування експерименту наведена в табл. 4.7. Значення розрахункового тиску притискання заготовки визначалось за

формулою (4.9) де коефіцієнт C приймали рівним 0,25. Зразки листових матеріалів АМГ1М ($\sigma_e = 130_{-10}^{+15}$, МПа), 08кп ($\sigma_e = 330_{-15}^{+15}$, МПа), 12Х18Н10Т ($\sigma_e = 550_{-10}^{+15}$, МПа) витягувалися на глибину, що відповідає 90 % граничного ступеня витягування.

Таблиця 4.7 – Матриця планування експерименту

№ експерименту	Фактори (натур. знач.)					Фактори (код. знач.)					Відхилення розмірів зовнішнього діаметра, мкм		
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5			
	\hat{x}	x_p	$\bar{\sigma}_i$										
1	2	100	130	-0,05	0,5	1	-1	-1	-1	-1	89,8	86,3	10,2
2	0,5	250	130	-0,05	2,5	-1	1	-1	-1	1	70,3	68,5	9,45
3	2	250	130	0,05	0,5	1	1	-1	1	-1	95,9	98,9	11,6
4	0,5	100	530	0,05	2,5	-1	-1	1	1	-1	93,2	100,5	13,0
5	0,5	100	130	0,05	2,5	-1	-1	-1	1	1	53,3	52,9	5,8
6	2	100	530	-0,05	2,5	1	-1	1	-1	1	141,9	133,9	11,7
7	0,5	250	530	-0,05	0,5	-1	1	1	-1	-1	120,5	116,1	10,3
8	2	250	530	0,05	2,5	1	1	1	1	1	150,4	146,5	13,5
9	1,5	175	330	0	1,5	0	0	0	0	0	70,3	67,8	11,1

Змінні $u_1, u_2, u_3, \dots, u_5$ характеризується тим, що кожна з них може приймати тільки два значення. Фактори їх узагальнення, а також величини верхньої і нижньої меж інтервалу варіювання наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Фактори, їх рівень і інтервали варіювання

Кодоване значення факторів	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	S, мм	D, мм	σ_{θ} , МПа	$\Delta P_{np} / P_{np}$	n, тис. шт.
Основний рівень (0)	1,5	175	330	0	1,5
Інтервал варіювання (1)	0,75	75	200	0,1	2
Верхній рівень (+1)	2,0	250	530	0,05	2,5
Нижній рівень (-1)	0,5	100	130	-0,05	0,5

За основу плану обрана дробова чверть-репліка від плану ПФЕ – $2^{(5-2)}$. Даний план має роздільну здатність (потужність) III і дозволяє одержати регресійні оцінки для 5 факторів, при мінімальній кількості дослідів 8. Відповідно до рекомендацій [152] доповнимо план одним експериментом у центральній точці для перевірки можливої нелінійності отриманої залежності.

Для дослідження обрано наступний параметр точності: \bar{X} – математичне очікування відхилення розміру зовнішнього контуру деталі, яку витягують, від дійсного внутрішнього діаметрального розміру матриці, мкм.

При плануванні експерименту всі фактори варіюються в кожному досліді одночасно. Математична модель у вигляді полінома дозволяє дати кількісну оцінку впливу кожного фактора на функцію відгуку:

$$x_p = b_0 + \sum b_i \cdot U_j, \quad (4.12)$$

де b_i – коефіцієнти полінома; x_p – функція відгуку (\bar{X}); U_j – чинники впливу на x_p .

В результаті експерименту функція відгуку виходить у вигляді наведеного вище полінома. Визначення коефіцієнтів полінома b_0 , b_i , b_{ij} а також статистичний аналіз рівняння проводили за відомими формулами так само, як і оцінку адекватності моделі, тобто придатність її для опису реального процесу. Абсолютна величина коефіцієнтів b_i , b_{ij} дозволяє кількісно оцінити ефект впливу кожного

фактора. Знаки при коефіцієнті вказують на збільшення параметра відгуку: «плюс» – при підвищенні значення фактора (в порівнянні з нульовим рівнем), а «мінус» – при його зменшенні.

При використанні методу планування багатофакторного експерименту число дослідів при достатній достовірності результатів може бути скорочено в 2 – 5 разів і більше.

У багатьох випадках для узагальнення залежності, що спостерігається може бути прийнята лінійна залежність:

$$x = \beta_0 + \beta_1 U \quad (4.13)$$

Розглянемо побудову рівняння регресії одного параметра, позначивши відповідно U_i та x_i – отримані у серії з r експериментів i -те значення залежного параметра x (відгуку функції), яке відповідає значенню i -го незалежного предиктора або (фактора) U .

$$x_i = \beta_0 + \beta_1 U_i \quad (4.14)$$

Утворимо суму квадратів відхилень експериментально отриманих значень величини x_i від лінії регресії.

$$S = \sum_{i=1}^r (x_i - \beta_0 - \beta_1 U_i)^2 \quad (4.15)$$

Будемо обирати значення оцінок β_0 , β_1 таким чином, щоб мінімізувати суму S . Визначимо β_0 , β_1 диференціюванням рівнянь (4.15) по β_0 , β_1 та прирівнявши часткові похідні до нуля:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^r (x_i - \beta_0 - \beta_1 U_i) = 0; \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^r U_i (x_i - \beta_0 - \beta_1 U_i) = 0, \quad (4.17)$$

звідки маємо

$$\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^r U_i = \sum_{i=1}^r x_i, \quad (4.18)$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^r U_i + \beta_1 \sum_{i=1}^r U_i^2 = \sum_{i=1}^r U_i x_i. \quad (4.19)$$

Ці рівняння називаються нормальними, їх рішення щодо β_0, β_i дає шукані коефіцієнти регресії. Використаємо матричний підхід до лінійної регресії.

Застосування матриць надає багато переваг. Як тільки завдання записується і вирішується в матричній формі, його рішення можна використовувати для будь-якої регресивної задачі незалежно від того, скільки членів міститься в рівнянні регресії.

Введемо наступні позначення: \bar{x} – вектор спостережень; U – матриця незалежних змінних; $\bar{\beta}$ – вектор параметрів, що підлягають оцінюванню.

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_r \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} i & U_1 \\ i & U_2 \\ \dots & \dots \\ i & U_3 \end{bmatrix}; \quad \bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_i \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Враховуючи, що

$$U^T U = \begin{bmatrix} r & \sum_{i=1}^r U_i \\ \sum_{i=1}^r U_i & \sum_{i=1}^r U_i^2 \end{bmatrix}; \quad U^T x = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^r x \\ \sum_{i=1}^r U_i x_i \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

нормальні рівняння можна записати як

$$U^T U \bar{\beta} = U^T \bar{x}. \quad (4.22)$$

Вирішуючи це матричне рівняння щодо вектора оцінок, отримуємо

$$\bar{\beta} = (U^T U)^{-1} U^T \bar{x}. \quad (4.23)$$

Досліджуючи лінійну статистичну систему, що має m входів U_1, \dots, U_m і один вихід X . Потрібно знайти лінійну модель

$$x = \beta_0 U_0 + \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \dots + \beta_m U_m. \quad (4.24)$$

Введемо вектор спостережень \bar{x} , матрицю незалежних змінних U і вектор параметрів $\bar{\beta}$:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_r \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1m} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{r1} & U_{r2} & \dots & U_{rm} \end{bmatrix}. \quad (4.25)$$

Тоді модель системи у векторній формі приймає наступного вигляду:

$$x = \bar{\beta}^T \bar{U}. \quad (4.26)$$

Скалярну суму S квадратичних помилок оцінювання можна визначити за формулою:

$$S = (\bar{x} - U\bar{\beta})^T (\bar{x} - U\bar{\beta}) = S_p [(\bar{x} - U\bar{\beta})(\bar{x} - U\bar{\beta})^T], \quad (4.27)$$

де S_p – позначає слід матриці.

Для мінімізації суми квадратичних помилок S за параметрами β , що шукаються необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_n} = 0; \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots, m, \quad (4.28)$$

або у векторній формі:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = \frac{\partial_t \left[(\bar{x} - U\bar{\beta})(\bar{x} - U\bar{\beta})^T \right]}{\partial x} = \frac{\partial_t (\bar{x}\bar{x}^T + U\bar{\beta}\bar{\beta}^T U^T - U\bar{\beta}\bar{x}^T - \bar{x}\bar{\beta}^T U^T)}{\partial \bar{\beta}} = 0. \quad (4.29)$$

Звідки отримуємо матричне рівняння

$$U^T U \bar{\beta} = U^T \bar{x}, \quad (4.30)$$

вирішивши яке відносно $\bar{\beta}$ знайдемо

$$\bar{\beta} = (U^T U)^{-1} U^T \bar{x}. \quad (4.31)$$

Відзначимо, що це рівняння має такий же вигляд, як і в разі регресивної моделі з одним входом, записаної в матричній формі (4.20). Розглянемо ідентифікацію системи, що має m входів і n виходів.

Лінійна модель цього процесу може бути описана таким чином:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \beta_{11}U_1 + \beta_{12}U_2 + \dots + \beta_{1m}U_m \\
 x_2 &= \beta_{21}U_1 + \beta_{22}U_2 + \dots + \beta_{2m}U_m \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 x_n &= \beta_{n1}U_1 + \beta_{n2}U_2 + \dots + \beta_{nm}U_m
 \end{aligned}
 \tag{4.32}$$

або у векторній формі $\bar{x} = \bar{\beta}\bar{U}$, де

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix}; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_m \end{bmatrix}; \quad \bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \dots & \beta_{nm} \end{bmatrix}. \tag{4.33}$$

У цьому рівнянні кожен рядок має точно такий же вигляд, як і в рівняннях для системи з одним виходом. Отже, для будь-якого i -го виходу можна записати

$$x_i = \bar{\beta}_i^T \bar{U}, \tag{4.34}$$

де $\bar{\beta}_i$ – i -й рядок матриці β

$$\bar{\beta}_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}, \dots, \beta_{im}]. \tag{4.35}$$

Введемо (подібно до процесу з одним виходом) вектор r вимірювань величини x_i і матрицю незалежних змінних U :

$$\bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{ir} \end{bmatrix}; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1m} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{r1} & U_{r2} & \dots & U_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1^T \\ U_2^T \\ \dots \\ U_r^T \end{bmatrix}. \tag{4.36}$$

Тоді найкраща (в сенсі регресії за методом найменших квадратів) оцінка вектора β_1 може бути отримана з наступного матричного рівняння:

$$\bar{\beta}_i = (U^T U)^{-1} U^T \bar{x}_i. \tag{4.37}$$

Отже, всі $n \in m$ коефіцієнтів β_i матриці β можуть бути отримані в результаті рішення n разів нормальних рівнянь. Але так як матриця U є однаковою, то немає необхідності n разів виконувати обернення квадратної матриці $U^T U$. З цією метою сформуємо матрицю вихідних

елементів x розміром $r \times n$, стовпцями якої є r вимірювань n вихідних змінних:

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{r1} & x_{r2} & \dots & x_{rm} \end{bmatrix}. \quad (4.38)$$

Тоді матриця набуде вигляду:

$$\beta \left[(U^T U)^{-1} U^T x \right]^T. \quad (4.39)$$

При цьому потрібно виконати обернення матриці $(U^T U)$ тільки один раз.

Зауважимо, що ідентифікація регресійними методами можлива тільки тоді, коли існує матриця $(U^T U)^{-1}$, а матриця U повинна бути неособливою, крім того, кількість вимірів r має бути більше, ніж кількість незалежних змінних $r \geq m$.

Якщо $r = m$, в оцінці β шум вимірювання не буде згладжений. Тому для адекватної ідентифікації потрібно $m+1$ вимірювань. При ідентифікації системи з m входами і n виходами також необхідно виконувати умову $r \geq m+1$, оскільки при визначенні моделі за всіма входами використовується одна і та сама матриця вимірювань U .

Для наших експериментальних даних (табл. 4.9) проведемо нормування за параметрами і матриця U для нашого розрахункового випадку набуде вигляду:

Таблиця 4.9 – Характеристики отриманих ПУШ деталей зі сферичним дном

Товщина S , мм	Діаметр D_3 , мм	Матеріал	Відносна товщина S/D_3 100%	Допустима розрахункова товщина $S/D_3 \cdot 100\%_{\text{розр}}$	Гранична відносна товщина $S/D_3 \cdot 100\%_{\text{гр}}$
1,5	650	X18H9T	0,23	0,91	0,455–0,5
0,8	189	Сталь 10кп	0,42	1,29	0,455–0,5
0,8	380	X18H10T	0,31	0,89	0,455–0,5
1,5	450	Ст3	0,33	0,82	0,44–0,5

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}, \text{ а матриця } \hat{x} = \begin{pmatrix} 89,8 \\ 70,3 \\ 95,9 \\ 93,2 \\ 53,3 \\ 141,9 \\ 120,5 \\ 150,4 \end{pmatrix}$$

Вирішуючи систему рівнянь (4.32) отримаємо значення оцінок β_i , зробивши зворотне перетворення від безрозмірного в натуральний масштаб, отримаємо коефіцієнти для рівняння функції відгуку. Перевірка отриманих коефіцієнтів для факторів подвійної і потрійної взаємодії показала, що ці фактори мають незначний вклад у загальний результат порівняно з основними факторами, тому можуть не враховуватись. Коефіцієнти основних ефектів мають наступні значення:

$$b_0 = 18,09 \approx 18; b_1 = 21,25; b_2 = +0,0937; \\ b_3 = +0,119; b_4 = -15,31; b_5 = -0,00423.$$

Таким чином, розрахункова залежність для визначення математичного очікування величини відхилення діаметрального розміру зовнішньої циліндричної поверхні деталі від дійсного розміру матриці:

$$x_p = b_0 + b_1 \cdot U_1 + b_2 \cdot U_2 + b_3 \cdot U_3 + b_4 \cdot U_4 + b_5 \cdot U_5,$$

з урахуванням отриманих коефіцієнтів набирає вигляду:

$$x_p = 18 + 21,25 \cdot U_1 + 93,7 \cdot 10^{-3} \cdot U_2 + 1,19 \cdot 10^{-1} \cdot U_3 - \\ - 15,31 \cdot U_4 - 4,23 \cdot 10^{-3} \cdot U_5 \quad (4.40)$$

Перевірка отриманої залежності (4.40) на відтворюваність показала, що отримані експериментальним шляхом дані відрізняються в межах до 12% від розрахункових (див. табл. 4.10), що цілком припустиме для застосування цієї залежності при розробленні технологічного процесу, а також для оцінювання точності відштампованих деталей при експлуатації штампового оснащення. При цьому розподіл відхилень у партії деталей при перевірці за критерієм

Персона відповідає нормальному. Відхилення відштампованих деталей знаходяться в межах 8 – 10 квалітету (табл. 4.10, табл. 4.11).

Таблиця 4.10 – Відхилення зовнішнього діаметру циліндричних порожнистих деталей без фланця після одноударного та двоударного витягування (% від діаметру)

Ступінь витягування	Одноударне витягування			Двоударне витягування		
	Відносна товщина заготовки $(s_3 / D_3) \cdot 100$					
	2,0...1,0	1,0...0,3	0,3...0,1	2,0...1,0	1,0...0,3	0,3...0,1
1,25	0,3	0,4	0,5	0,12	0,16	0,20
1,42	0,4	0,5	0,6	0,16	0,20	0,26
1,66	0,5	0,6	0,7	0,20	0,25	0,3
2,0	0,6	0,7	–	0,24	0,30	–
2,08	0,7	0,7	–	0,28	0,32	–

Примітка: s_3 – вихідна товщина, D_3 – діаметр заготовки.

Таблиця 4.11 – Відхилення за висотою (\pm) порожнистих циліндричних деталей з фланцем після витягування, мм

Висота деталі, мм	Одноударне витягування			Двоударне витягування		
	Товщина матеріалу s_3					
	≤ 1	$>1... \leq 2$	$>2... \leq 3$	≤ 1	$>1... \leq 2$	$>2... \leq 3$
≤ 18	0,3	0,4	0,5	0,15	0,2	0,25
$> 18... \leq 30$	0,4	0,5	0,6	0,2	0,25	0,3
$> 30... \leq 50$	0,5	0,6	0,7	0,25	0,3	0,35
$> 50... \leq 80$	0,6	0,7	0,8	0,35	0,4	0,45
$> 80... \leq 120$	0,8	0,9	1,0	0,65	0,45	0,5
$>120... \leq 180$	1,0	1,2	1,4	0,7	0,5	0,6

Відомо, що при проектуванні спеціальних витяжних штампів із застосуванням традиційних методів формоутворення деталей матриці оформляють зовнішній контур, а розміри пуансона – внутрішній контур штампованих деталей. Це правило покладене в основу існуючих методик розрахунку виконавчих розмірів робочих частин штампів. Основна увага при розрахунку приділяється правильному

призначенню допусків, які при складанні спеціалізованих штампів повинні забезпечити отримання оптимальних зазорів між робочими частинами штампа. Крім того, за рахунок допуску на деталь, яку штампують, при розрахунку враховують зміну розмірів робочих частин штампа в результаті зношування, при якому розміри матриці збільшуються, а розміри пуансона зменшуються.

У той же час при пневмоударному штампуванні наявні методики розрахунку виконавчих розмірів формотворчих частин штампів не можуть бути застосовні, так як жорсткий пуансон при виконанні розділювальних і в деяких операціях витягування відсутній, а його функції виконує рідина або еластичне середовище. В існуючих методиках не враховуються величини відхилень розмірів відштампованих деталей під впливом факторів відповідно до залежності (4.40), що дозволяє оцінити величини цих відхилень в будь-який момент часу експлуатації штампа, прогнозуючи їх величину.

Тому пропонується при витягуванні пневмоударним штампуванням розраховувати виконавчі розміри витяжних матриць з урахуванням результуючої точності штампованих деталей за такою залежністю:

$$D_m = d_\delta - \Delta_\delta + x_p + 3\sigma_\kappa, \quad (4.41)$$

де d_δ – виконавчий розмір деталі; Δ_δ – допуск на виготовлення деталі; x_p – величина відхилення розмірів відштампованих деталей під впливом комплексу домінуючих факторів (11); $3\sigma_\kappa$ – половина сумарної похибки обробки на початковому етапі штампування $6\sigma_\kappa = \sqrt{(6\sigma_n)^2 + (6\sigma)^2}$ ($6\sigma_n$ – поле розсіювання похибок налаштованості процесу, 6σ – поле миттєвого розсіювання).

Дійсний розмір відштампованої деталі визначається за залежністю:

$$d_\delta^0 = D_m + \Delta_\delta - x_p - 3\sigma_\kappa + \delta_m, \quad (4.42)$$

де δ_m – дійсне відхилення розміру матриці.

Позначивши дійсний розмір витяжної матриці після її виготовлення $D_m^0 = D_m + \delta_m$, отримаємо:

$$d_{\delta}^{\delta} = D_m^{\delta} + \Delta_{\delta} - x_p - 3\sigma_k \quad (4.43)$$

Наведена методика розрахунку формуючих елементів з урахуванням впливу систематичних похибок і домінуючих факторів дозволяє отримувати, при застосуванні складеного бойка, деталі з точністю на один-два квалітети вищою ніж при використанні суцільного бойка.

4.4. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. На основі аналізу технічної літератури, відомих наукових досліджень і виробничих випробувань визначені основні конструктивно-технологічні фактори (матеріал, оснащення, механічні властивості матеріалу, який штампують, швидкість і робота деформування, конструкція матриці, діаметр заготовки, зусилля притискання, маса бойка, діаметр робочого контуру матриці і змащення заготовки), що впливають на параметри точності витяжних операцій при виготовленні деталей методом пневмоударного штампування.

2. Визначені критерії ефективності процесу ПУШ витягуванням в залежності від кількості ударів, радіусу перетяжного ребра матриці, відносної товщини матеріалу заготовки, типу змащення, зусилля притискання, а також визначені значення граничних ступенів витягування для різних конструкційних матеріалів і отримані їх залежність від узагальненого конструктивно-технологічного параметру α .

3. Встановлено, що зменшення відносної маси бойка, збільшення відносної товщини заготовки і радіуса заокруглення витяжної кромки матриці підвищує граничний ступінь витягування на 10...12 %, а використання двохударного навантаження підвищує граничний ступінь витягування на 10...15 %, а також знижує радіальні напруження і відповідно зменшуються радіальні деформації до 20 %, а відхилення відштампованих виробів не перевищує 0,05 – 0,1 мм.

4. З використанням методу планування багатофакторного експерименту розроблено математичну модель залежності відхилень розмірів деталей при виконанні операцій витягування під впливом комплексу досліджуваних конструктивно-технологічних факторів: товщини, діаметра і механічних властивостей матеріалу заготовки, тиску притискання. Визначено, що для практичного використання

закон розподілу похибок для однієї партії деталей можна вважати наближеним до нормального.

5. Запропоновано методику розрахунку розмірів форматворчих елементів витяжних матриць для пневмоударного штампування з урахуванням впливу систематичних похибок і домінуючих факторів на перебіг процесу витягування деталей, що дозволяє при застосуванні спеціального складеного бойка виготовляти деталі з розмірною точністю вищою на 1–2 квалітети.

Розділ 5 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ВИРОБІВ ПРИ
ПНЕВМОУДАРНОМУ ШТАМПУВАННІ РІДИНОЮ ТА
ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

5.1. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ПУШ РІДИНОЮ

Технологічне оснащення для пневмоударного листового штампування рідиною має специфічні особливості, які обумовлюються використанням рідини або поліуретану як формуючого елемента, наявністю клинового затискного механізму, значними швидкостями деформування і динамічними навантаженнями.

У зв'язку з високими швидкостями деформування в матриці виконуються отвори для видалення повітря. Притискне кільце не тільки запобігає утворенню гофрів на фланці заготовки, а й ізолює матрицю від рідкого середовища. Значні динамічні навантаження вимагають підвищених запасів міцності конструкції оснастки. Використання поліуретану виключає притискне кільце, що спрощує і здешевлює штампувальну оснастку.



Рисунок 5.1 – Матриця для штампування напівсфер

Типове штампове оснащення для пневмоударного листового штампування складається з таких основних елементів: матриця (пуансон) (рис. 5.1), притискне кільце і допоміжні вузли та елементи (система вакуумування, виштовхувачі, відліплювачі і

технологічні вкладиші-втулки, концентратори, приєднані маси тощо), які необхідні для виконання деяких допоміжних технологічних операцій, що сприяють підвищенню продуктивності процесу.

Схеми штампів для виготовлення деталей з плоских заготовок представлені на рис. 5.2 – 5.5. На конструкцію штампів впливають такі основні параметри: вид технологічної операції, тип заготовки (плоска, просторова) і серійність виробництва. Тому штампи можуть виконуватися цільним або складеними, а відсутність пуансона

дозволяє застосовувати в якості матеріалу оснастки високоміцні і низькоміцні легкооброблювані матеріали, наприклад сплави на основі алюмінію і цинку, пластичні маси, бетон, гіпс, дерево тощо.

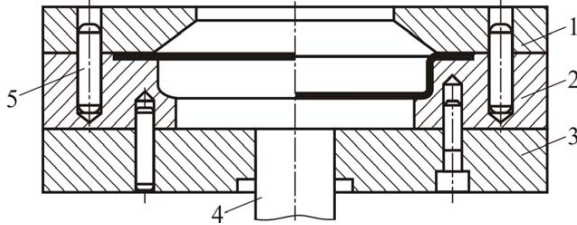


Рисунок 5.2 – Конструктивна схема штампа з виштовхувачем:
 1 – притискне кільце; 2 – матриця; 3 – плита;
 4 – виштовхувач; 5 – штифт

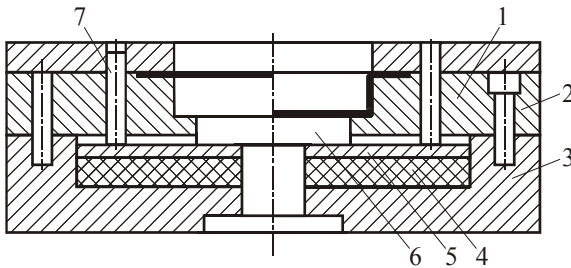


Рисунок 5.3 – Конструктивна схема штампа з виштовхувачем:
 1 – матриця; 2 – притискне кільце; 3 – обойма; 4 – буфер;
 5 – пластина; 6 – виштовхувач; 7 – штифт

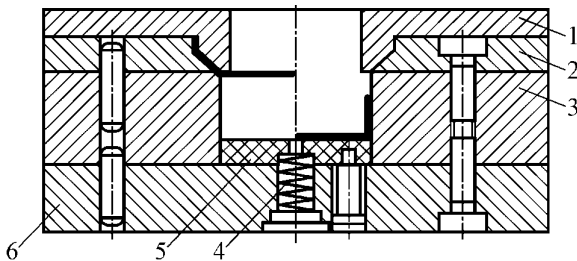


Рисунок 5.4 – Конструктивна схема штампа для другого і наступних переходів при багатоперехідному штампуванні:
 1 – притискне кільце; 2 – рамка; 3 – матриця;
 4 – пружина; 5 – виштовхувач; 6 – плита

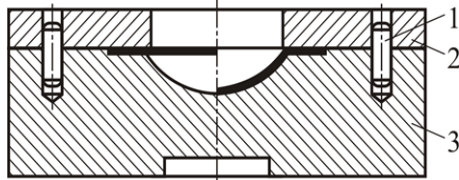


Рисунок 5.5 – Конструктивна схема штампа для витягування, карбування та калібрування:
1 – штифт; 2 – притискач; 3 – матриця

Притискання заготовки здійснюється притискним кільцем 2, орієнтація якого здійснюється за допомогою штифтів 1. Для створення гарантованого зазору використовується кільцева проточка, глибина якої вибирається на 10...15 % більше товщини заготовки. Гарантований зазор необхідний для зменшення тертя між заготовкою і матрицею. Для деталей з прямими стінками типу стакан і неглибока коробочка застосовується конструктивна схема оснащення з виштовхувачем 4 (рис. 5.2), що приводиться в дію від приводу пневмоударного обладнання.

Для деталей з прямими бортами типу стакан і глибока коробочка при значному зусиллі виштовхування використовується схема штампа з вбудованим виштовхувачем 6 (рис. 5.3), що приводиться від верхньої плити пневмоударного обладнання за рахунок стиснення гумового буфера 4, що має клиновий притискний механізм.

У разі виготовлення глибоких деталей, таких, як стакан, коробка прямокутної в плані форми, застосовується пневмоударне багатоперехідне штампування. Для другого і наступних переходів оснащення виконане за конструктивною схемою (рис. 5.4), в якій притискне кільце 1 виконано за формою відштампованої деталі першого переходу, а виштовхувач 5 приводить в дію пружина 4.

Типова конструктивна схема штампа для пневмоударного витягування, карбування і калібрування схематично зображена на рис. 5.5.

5.2. ОСНОВНІ ВИМОГИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЕЛЕМЕНТІВ ОСНАЩЕННЯ

При проектуванні технологічного оснащення для операцій витягування вирішуються питання забезпечення достатньої стійкості всіх його елементів під дію імпульсних навантажень, точності штампованих деталей, полегшення умов праці оператора і підвищення продуктивності.

Основні вимоги, що пред'являються при проектуванні оснащення – отримання деталі, що відповідає вимогам креслення і забезпечення відповідної стійкості штампа.

Основними факторами, що визначають вимоги, які висуваються до матриць, є матеріал матриць і умови їх термічної обробки. При цьому необхідно враховувати масштаб виробництва (дослідне, дрібносерійне, серійне), характером виконуваної операції, розмірами і формою деталі, фізико-механічними властивостями матеріалу.

Перетяжний радіус матриці $R_{пм}$ (рис. 5.6) визначається формою деталі, її відносною глибиною h/B або h/D , механічними властивостями і допустимим ступенем потоншення матеріалу. Значення перетяжних радіусів матриць наведені у табл. 5.1, а товщин стінок T_c і дна T_0 матриць – у табл. 5.2 [18].

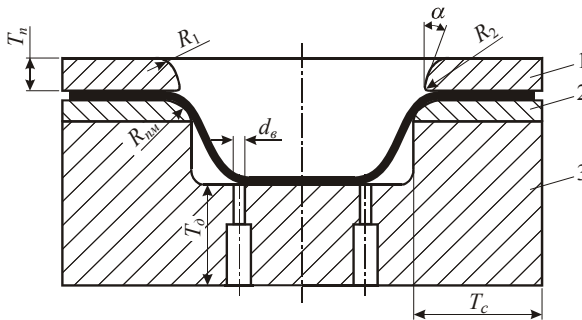


Рисунок 5.6 – Елементи матриці:

1 – притискач; 2 – витяжне кільце; 3 – матриця;

T_n – товщина притискача; T_c – товщина стінки матриці;

α – кут скосу вікна притискача; R_1 , R_2 – радіуси заокруглення вікна притискача; $R_{пм}$ – перетяжний радіус; T_0 – товщина дна матриці;

$d_г$ – діаметр вакуумних отворів

Таблиця 5.1 – Рекомендовані значення перетяжних радіусів матриць

Деталі	h/B або h/D	Технологічна схема штампування	Матеріал, який штампують	$R_{пл}$, мм
Днища	До 0,15	Формування	Будь-який	(4...5) <i>S</i>
Обтічники	0,15...0,3	Витягування пряме	М'які сплави	(4...7) <i>S</i>
			Сталі корозійностійкі та вуглецеві, титанові сплави	(4...7) <i>S</i>
	0,15...0,3	Витягування реверсивне	М'які сплави	(4...5) <i>S</i>
Коробки, чашки, ємності	До 0,2 при кутовому радіусі в плані менше 10 мм	Витягування пряме	Сталі корозійно-стійкі та вуглецеві е	(5...7) <i>S</i>
			Витягування реверсивне	Сталі корозійно-стійкі та вуглецеві
	Титанові сплави	(7...10) <i>S</i>		
	М'які сплави	(5...7) <i>S</i>		
	Напів-патрубки	До 0,55	Витягування пряме	М'які сплави
Сталі корозійно-стійкі та вуглецеві				(3...4) <i>S</i>
Гнуття з витягуванням			Титанові сплави	(5...7) <i>S</i>
			М'які сплави	(5...7) <i>S</i>
			Сталі корозійно-стійкі та вуглецеві	(4...5) <i>S</i>
			Титанові сплави	(7...10) <i>S</i>

Примітка: більші значення радіусів приймають для менш пластичних матеріалів.

Таблиця 5.2 – Значення товщини стінок T_c і дна матриць T_o

Матеріали матриць	T_c , мм	T_o , мм
Пластичні маси	$(80...90)S$	$(65...75)S$
Сплави цинкові	$(50...60)S$	$(55...65)S$
Сплави алюмоцинкові	$(40...50)S$	$(45...55)S$
Сплави алюмінієві	$(30...40)S$	$(35...45)S$
Чавун, сталь Ст3	$(40...50)S$	$(25...35)S$
Сталь 45 (термооброблена)	$(25...40)S$	$(25...35)S$

Для забезпечення вільного витягування під притискне кільце підкладаються технологічні прокладки або робиться кільцева проточка по діаметру заготовки висотою $(0,1...0,15)S$.

Матриці для штампування деталей з фланцем і радіусом переходу менше необхідного перетяжного радіуса можуть мати два витяжних кільця. Одне з них застосовується при попередньому формоутворенні, причому деталь за рахунок цього кільця залишають дещо не доштампованою до кінцевого профілю. Друге кільце, яке потім встановлюється замість першого, має перетяжний радіус, що відповідає кресленню деталі. На цьому ж кільці проводиться калібрування деталі переважно за рахунок розтягування матеріалу.

Товщина стінок і дна матриць визначаються конфігурацією і розмірами деталі в перерізі (див. табл. 5.2).

Радіус з'єднання основного профілю деталі з закінцівкою повинен бути не менший ніж $(5...7)S$. Кут виходу закінцівки обирається в межах від $25\div 45^\circ$. Менші значення кута приймаються для більш товстих ($S > 2$ мм) або міцних ($\sigma_B > 350...400$ МПа) матеріалів (рис. 5.7).

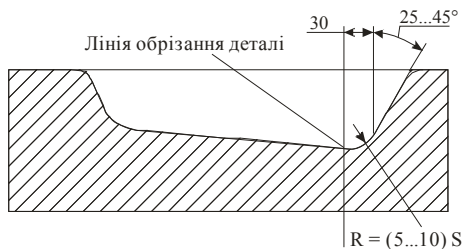


Рисунок 5.7 – Конфігурація закінцівки в матриці

Якщо дозволяють габаритні розміри матриці, деталі типу напівпатрубоків можна зчленувати попарно, надаючи в місці зчленування технологічний припуск на обрізання. Притискні кільця призначені для запобігання складкоутворенню на фланці деталі при її формоутворенні. Однак слід враховувати, що при штампуванні неглибоких деталей ($h/b < 0,1 \dots 0,15$) обходяться без жорсткого притискача заготовки. Притискач може мати плоску робочу поверхню або з дещо викривлену, залежно від геометрії деталі. Вікно притискача виконують по робочому контуру матриці, причому профіль вікна частіше роблять зі скосом. Габаритні розміри притискача повинні відповідати розмірам фланця камери ударного обладнання. Товщина притискача повинна дорівнювати 25÷40 мм. Для криволінійних заготовок рекомендовано опорні елементи, що сполучаються по поверхні матриці і притискача робити криволінійними.

Для забезпечення високої якості штампованих тонколистових деталей через високі швидкості деформування в матрицях передбачаються отвори для виведення повітря при штампуванні.

Штампування деталей з великими радіальними деформаціями (коефіцієнти витягування або роздавання близькі до гранично допустимих) при максимальних енергіях часто призводить до розриву заготовки. У той же час виготовлення цих деталей при двохударному штампуванні і при невеликих енергіях ($0,3 \dots 0,5 E_{\max}$) має позитивний результат. Тому при відпрацюванні технології штампування доцільно починати з мінімальних значень енергії при поступовому збільшенні її на наступних заготовках. Якщо енергія в одному імпульсі (ударі) не забезпечує витягування з оформленням перехідних радіусів деталі, то наприкінці формоутворення проводять операцію калібрування радіусів при підвищених енергіях. У деяких випадках внаслідок зміцнення матеріалу при багатуударній деформації перед калібруванням слід вводити проміжне знеміцнююче відпалювання.

Глибина витягування, а також стійкість заготовки при штампуванні залежать від величини зазору між заготівкою і притискачем, що уточнюється в процесі відпрацювання технології до оптимального значення.

Деталі, перетяжний радіус яких більше (15...20), схильні до гофроутворення на перетяжному ребрі матриці. Для усунення цього дефекту необхідно збільшувати зусилля притискання, наприклад, використовуючи додатково гідродинамічне притискання в оснащенні, або застосовувати пакетне штампування.

При штампуванні складнорельєфних деталей слід вводити міжопераційне знеміцнююче відпалювання. До попередньої термічної обробки вдаються при штампуванні деталей, які раніше піддавалися деформації або зварюванню.

Точність деталей, одержуваних ударним штампуванням і калібруванням, визначається точністю виготовлення матриці і правильністю обрання енергії удару. Чим більше енергія удару, тим менше відхилення форми деталі від заданого контуру. Практично можлива точність знаходиться на два квалітети більше ніж точність виготовлення матриці. Відпружинення в 8 – 10 разів менше, ніж при статичному навантаженні.

Причинами браку при виготовленні деталей методами пневмоударного штампування в більшості випадків є дефекти у початкової заготовки, помилки, допущені при виготовленні штампового оснащення, некоректне обрання енергетичних параметрів.

Шорсткість поверхні деталі визначається шорсткістю поверхні штампового оснащення і шорсткістю поверхні заготовки. На матриці з полірованої робочою поверхнею можна отримувати деталі з параметром шорсткості $R_z = 0,63$ мкм.

При пневмоударному листовому штампуванні можливі наступні види зовнішніх дефектів: наплив матеріалу при штампуванні; розрив на гофра або утворення напливів на радіусах переходу до фланця деталей; кільцеві складки на стінках деталей; утворення поздовжніх складок і ін.

Основні причини браку: завищена енергія удару; недостатнє вакуумування в порожнині матриці; недостатнє притискання заготовки; втрати стійкості стінки деталі і забруднення робочої поверхні матриці.

5.3. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ВИРУБУВАННЯ-ПРОБИВАННЯ ПУШ ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

В оснащенні, яке призначене для ударного штампування еластичним середовищем, притискне кільце в більшості випадків відсутнє. Його роль виконує еластичне середовище (поліуретан).

Класифікація технологічного оснащення залежно від програми випуску виробів представлена на рис. 5.8, а конст рукції деталей і елементів штампів на рис. 5.9.

Для вирубування деталей без опорної рамки використовуються матриці двох типів 1.1 і 1.2. На матриці 1.2 з метою полегшення видалення відходу виконана фаска під кутом $10 - 15^\circ$. Наближено висота матриць становить 2–4 мм, більші значення відповідають більшим значенням s і σ_B . Висота фаски становить 0,7 висоти матриці.

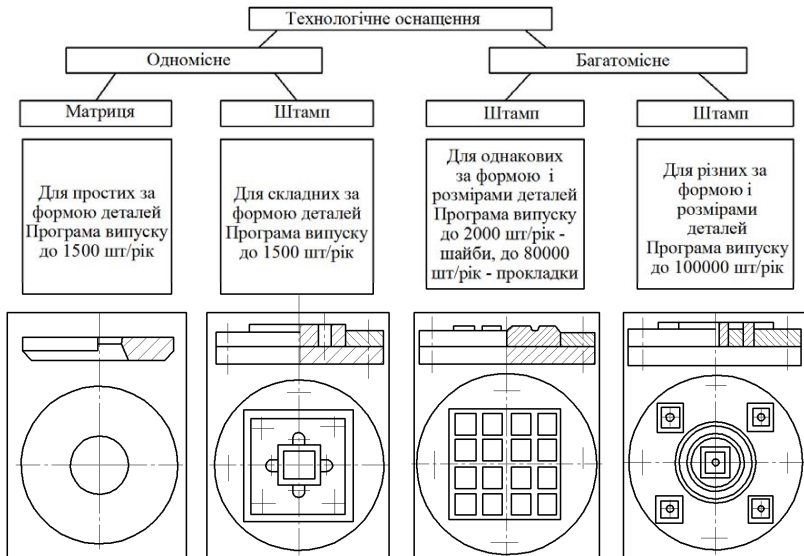


Рисунок 5.8 – Класифікація технологічного штампового оснащення

Деталі та їх елементи		Варіанти конструкцій					
1	Матриця, зовнішній контур	1.1			1.2		
2	Конструкція отворів в матриці	2.1	2.2	2.3	2.4		
3	Конструкція підпора	3.1 Форма контура підпорів					
		3.1.1	3.1.2				
		3.2 Конструкція підпорів (в перерізі)					
		3.2.1	3.2.2	3.2.3	3.2.4	3.2.5	3.2.6
4	Конструкція опорних рамок та їх елементів	4.1 Конструкція опорних рамок					
		4.1.1 Форма внутрішнього контура					
		4.1.1.1	4.1.1.2				
		4.1.2 Варіанти конструкцій					
		4.1.2.1	4.1.2.2	4.1.2.3			
		4.2 Конструкція канавок					
	4.2.1	4.2.2	4.2.3				
	4.3 Конструкція підпорів, виштовхувачів						
	4.3.1	4.3.2	4.3.3	4.3.4			

Рисунок 5.9 – Конструкції деталей штамів та їх елементів

Для пробивання отворів найбільш поширені конструкції отворів матриць 2.1, 2.2, 2.3. Конічна фаска в отворі 2.2 використовується для видалення відходу. Фаска отворів 2.3 виконується при складній формі отвору деталі. Отвори форми 2.4 використовуються при пробиванні заготовок товщиною $S < 0,3$ мм при наявності малих перемичок між отвором і зовнішнім контуром деталі.

З метою підвищення якості виготовлених деталей, підвищення стійкості поліуретанової діафрагми при суміщенні пробивання отворів з формотворними операціями в отвори матриць встановлюються підпори різних конструкцій. За формою контуру підпорів вони діляться на підпори, форма яких еквідистантна формі отворів матриці 3.1.1 і не еквідистантна 3.1.2. Не еквідистантна форма підпорів використовується з метою зниження трудомісткості їх виготовлення (якщо це допускає конструкція деталі, наприклад при наявності широких і неглибоких пазів) і з метою підвищення показників точності форми деталей, що вирубуються.

На практиці з різними технологічними цілями використовується порівняно велике розмаїття конструкцій підпорів, що відрізняються за формою в перетині. Форма торцевої частини підпорів у всіх випадках повинна забезпечувати порівняно легке видалення відходів, наприклад стисненим повітрям. Конструкція підпору 3.2.1 використовується для вирубання отворів в матеріалах з $S > 1$ мм.

Підпори 3.2.2 і 3.2.3 – при пробиванні отворів в заготовках меншої товщини. Підпор 3.2.4, як правило, конструктивно, виповнюється у вигляді глухого отвори з конічним дном і застосовується в цьому випадку для підвищення міцності матриць. При ударі об конічне дно відхід зменшує свої розміри і тому легко видаляється. Підпор 3.2.5 використовується при пробиванні отворів в малопластичних матеріалах з метою підвищення якості поверхні поділу. Еластичний підпор, наприклад конструкції 3.2.6, використовується для полегшення видалення відходу. Для вирубання деталей з опорної рамкою висота матриць становить 6-8 мм, більші значення відповідають більшим значенням S і σ_B . Допускається збільшення висоти матриць до 10 – 15 мм.

За формою внутрішнього контуру опорні рамки поділяються на рамки з внутрішнім контуром, еквідистантним контуру матриці 4.1.1.1

і не еквідистантним – 4.1.1. які використовуються з метою зниження витрат на виготовлення штампа. Опорна рамка і матриця виконуються з однієї заготовки 4.1.2.1 і збірними 4.1.2.2; 4.1.2.3.1 і 4.1.2.3.2. Опорна рамка 4.1.2.3.2 виконується у вигляді набору призматичних пластин (див. рис. 5.9) положення яких змінюється залежно від конфігурації деталі, що вирубується. Пластинки розміщуються на плиті між чотирма секторами.

Форма і розміри канавки між опорною рамкою в матрицю визначають енергетичні витрати на вирубку деталей, якість поверхні поділу, розміри відходів і зручність їх знімання.

З точки зору зручності знімання відходів кращі форми канавок 4.2.2 і 4.2.3. Форма канавки 4.2.3 використовується при вирубуванні деталей $S < 1$ мм. Форма канавки 4.2.1 виконується на фрезерному верстаті з ЧПК. Глибина канавки приймається рівною $(2 - 4) S$. Менші значення приймаються при вирубуванні матеріалів товщиною понад 1,5 мм.

В табл. 5.3 наведені рекомендації щодо визначення ширини вирубною канавки при тиску $q_{cm} = (4 - 4,3) \cdot 10^5$ Па.

Таблиця 5.3 – Рекомендовані значення величини вирубною канавки

Марка матеріалу деталі	Ширина вирубною канавки, мм
АМцМ, МІ	3 S
АМ2Н, М2М	
Д16АМ, МА2М	
АМгбШ, Л68	4 S
Д19УТВ, Л63М	4,5 S
Д16АТ, Д16АТВ	5 S
Сталь 20	6 S
12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т	7,5 S
30ХГСА	
ОТ4-1, ОТ4-0	6,5 S
У9А	8,5 S

Кут нахилу канавок дорівнює $35 - 45^{\circ}$. Рекомендується перевищення площини матриці над площиною опорної рамки на величину до 0,5 мм з метою зниження трудомісткості переточування штампа. З метою зниження трудомісткості видалення відходів використовуються різні конструкції 4.3. Конструкція 4.3.1 забезпечує підвищення якості деталей, що вирубуються. Ріжучі кромки матриць повинні бути гостро заточені. Не допускаються задирки, забоїни, риски на „дзеркалі” матриці і ріжучих кромках. Шорсткість робочих поверхонь матриць $Ra = 0,32 - 1,25$ мкм. Допуски на вільні розміри деталей штампа за 14 квалітетом.

Одним з найбільш істотних факторів, що визначають величину пружної частини припуску, є сила тертя. З метою зниження витрат матеріалу, який штампують, частину площини опорної рамки, на яку вкладається заготовка, рекомендується виготовляти з підвищеною шорсткістю або виконувати на ній насічку. Напрямок насічки і шорсткості поверхні опорної рамки має забезпечувати максимальне значення сил тертя і вказуватись на кресленні опорної рамки. При серійному виробництві деталей поверхня опорної рамки, що має насічку й підвищену шорсткість, повинна мати твердість, яка наближено дорівнює твердості поверхонь матриць. Створення зон з насічкою і підвищеною шорсткістю на опорній рамці потребує, як правило, незначних витрат і водночас забезпечує істотне зниження витрат на матеріал, який штампують, оскільки величина пружної частини припуску обернено пропорційна коефіцієнту тертя між заготовкою і опорної рамкою. Цей відомий при статичному вирубіванні деталей поліуретаном на гідравлічних пресах прийом зменшення припуску дає найбільш значимий ефект при імпульсному вирубіванні на пневматичних машинах в зв'язку з тим, що тиск поліуретану на заготовки на початкових етапах вирубівання на цих машинах значно вище, ніж при статичному вирубіванні деталей.

В табл. 5.4 представлений перелік матеріалів, що застосовуються для виготовлення деталей штампів при вирубіванні-пробиванні.

Використання легкоплавкого сплаву ЭКБ (4% Al, 3,5% Cu, 0,5% Mn, 0,5% Si) для виготовлення однієї з найбільш трудомістких деталей – опорної рамки дозволяє скоротити терміни і витрати на виготовлення деталей в дрібносерійному виробництві.

Таблиця 5.4 – Матеріали, що застосовуються для виготовлення деталей штампів

Основні деталі штампів	Матеріал	Термообробка HRC_e
Матриця для вирубування-пробивання простих за формою деталей, без вузьких пазів, довгих виступів, гострих кутів і подібних елементів з матеріалів, що мають $\sigma_B < 300$ МПа	У8А,	52 – 58
	У7А	52 – 58
	Сталь 30ХГСА	38 – 42
	Сталь 40Х	38 – 42
матеріалів, що мають: $\sigma_B > 300$ МПа.		
Матриці для вирубування-пробивання тонколистових деталей, що мають складний контур, тонкі стінки і перемички	X12	52 – 58
	X12М	52 – 58
	X12Ф1	52 – 58
	X12ТФ	52 – 58
Опорні рамки	Сталь 45 Сталь 40Х Поліетилен Текстоліт Сплав ЭКБ	У стані поставки
Вкладиші-підпори, що встановлюються в отвори матриць	Сталь 10 Сталь 45 Пластмаси Сплави алюмінію Текстоліт Поліуретан Тверда гума	У стані поставки

При вирубуванні деталей по зовнішньому контуру, пробиванні отворів, пазів і інших конструктивних елементів деталей виникають систематичні і випадкові похибки розмірів. Величини і знаки систематичних похибок розмірів деталей при вирубуванні-пробиванні можна змінювати за допомогою підпорів, що встановлюються в отворах матриці при пробиванні, і за рахунок варіювання зазорами при вирубуванні. На зазначені способи підвищення точності розмірів деталей накладаються обмеження, наприклад, при пробиванні підпори встановлюються при отриманні отворів з $d/s > 16-30$, тому вони не є

універсальними і доцільність їх застосування визначається в кожному конкретному випадку.

Універсальним способом, що забезпечує отримання деталей із заданою точністю, є коригування розмірів матриць, яка виконується з використанням наступних залежностей:

$$d_m = d_o - \Delta + k_1 \cdot \delta_d^o, \quad (5.1)$$

$$D_m = D_o - \Delta_0 + k_1 \cdot \delta_D^o, \quad (5.2)$$

де d_m , D_m – номінальні розміри круглого зовнішнього контуру матриці (копіра пуансона) і отвору в матриці; d_o , D_o – номінальні розміри (за кресленням) деталей, які вирубують і отворів, що пробивають; δ_d^o , δ_D^o – допуски на виготовлення деталей отворів і зовнішнього контуру, що вирубують; k_1 – коефіцієнт, що враховує вплив випадкових похибок на визначення номінальних розмірів, залежить від величини допусків на розміри виготовлених деталей, при допусках на розміри деталей за 12 квалітетом $k_1 = 0,4$, а за 14 квалітетом $k_1 = 0,3$; Δ , Δ_0 – систематичні похибки розмірів зовнішнього контуру деталей і пробитих отворів, що вирубуються при виготовленні деталей на пневматичних імпульсних машинах.

При вирубуванні, пробиванні з опорними рамками значення Δ та Δ_0 підставляються у формули (5.1) і (5.2) зі своїми знаками.

При вирубуванні без опорних рамок листових матеріалів марок АМг6, Д16АМ:

$$\Delta = (0,08 - 0,1)S. \quad (5.3)$$

Для матеріалів марок АМцМ, М1, 12Х18Н10Т:

$$\Delta = (0,08 - 0,12)S. \quad (5.4)$$

Менші значення: Δ – для матеріалів завтовшки 0,5 – 0,8 мм, більші значення Δ – для матеріалів завтовшки 1,0 – 1,2 мм.

Допуски на виготовлення елементів матриці:

$$\delta_d^M \leq \delta_d^o - \delta_d^{3.M} - \Delta^{вин}; \quad (5.5)$$

$$\delta_D^M \leq \delta_D^o - \delta_D^{3.M} - \Delta_o^{вин}, \quad (5.6)$$

де $\delta_d^{z.m}$, $\delta D_m^{вим}$ – допуск на зношування матриці; $\Delta^{вин}$, $\Delta_0^{вин}$ – випадкові похибки при вирубуванні і пробиванні.

З метою зниження трудомісткості розрахунків рекомендуються наступні співвідношення:

$$\delta d_m \leq k_2 \cdot \delta_d^0; \quad (5.7)$$

$$\delta D_m \leq k_2 \cdot \delta_D^0, \quad (5.8)$$

де k_2 – коефіцієнт, що враховує вплив на величину допусків розмірів матриць випадкових похибок і зношування матриць, який приймається залежно від якості точності розмірів: при 12 якості – 0,2, при 14 – 0,4. Допуски на розміри отворів матриць позитивні, а на розміри зовнішнього контуру негативні.

Рекомендовані значення висоти шаблону для вирубування наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Рекомендована висота шаблону для вирубування

Матеріал	δ , в %	Товщина матеріалу, мм							
		0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0
Сталі 65Г, 60С2, У8, У10; бронза, мідь, латунь Л63Т, алюміній АД, АМГ, АМц, В95	<12	1,0	2,0	2,5	3,5	4,0	4,8	5,5	7,0
Сталі 20, 30, 45, Ст3, 2Х13; латунь Л63ПТ; алюмінієві сплави АМцМ, АМгМ, Д1АМ	15...25	1,5	2,5	3,5	4,0	5,0	6,0	6,8	8,0
Сталь 08кп, Х18Н10Т; мідь М1М, М3М, латунь Л63М; алюміній А2, А3	>25	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0

При вирізання невеликих деталей товщиною понад 0,5 мм особливо з високоміцних матеріалів на бічних гранях рекомендовано робити скіс під кутом $10 - 15^\circ$ до робочої поверхні зі збереженням робочого паска заввишки $0,3H$, де H – висота копір-пуансона (матриці) (рис. 5.10). Однак при вирізання деталей з деяких матеріалів після

штампування поверхня зрізу виходить рваною. Це пояснюється крихким зломом мало-пластичних матеріалів під дією згинальних і напружень розтягу в зоні поділу, що пов'язано з неправильним визначенням висоти копір-пуансона.

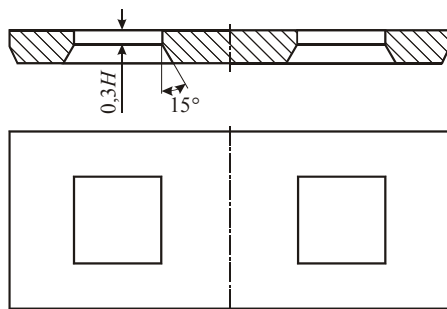


Рисунок 5.10 – Типова конструкція вирубного штампа нескладної форми

Тому мінімально можлива висота копір-пуансона встановлюється в процесі відпрацювання технології. Якщо розрахункова висота копір-пуансона виявляється менше 2 мм, то виготовлення його значно ускладнене. У таких випадках копір-пуансон роблять висотою більше 4...5 мм, а потім робочу висоту зменшують до необхідної пакетом пластин, які вирізають на тому ж шаблоні з будь-якого матеріалу (рис. 5.11).

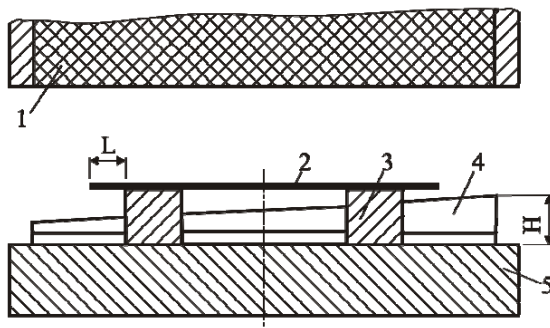


Рисунок 5.11 – Вирізний копір-пуансон, зменшений за допомогою набору пластин: 1 – поліуретан; 2 – заготовка; 3 – вирізний шаблон; 4 – набір пластин; 5 – підштамова плита

Іншим способом, що дозволяє значно підвищити якість вирізаних деталей за рахунок ще більшого збільшення зсувних та зменшення згинальних і напружень розтягу, є вирізання деталей з застосуванням опорних рамок і вкладишів. Однак для деталей складного контуру отримання рамки і вкладишів досить трудомістке.

На рис. 5.12 показані рамка і вкладиш, що складаються з набору пластин, вирізаних поліуретаном за шаблоном і склепаних або зварених між собою. Для полегшення процесу вирізання з внутрішньої сторони опорної рамки зроблений скіс. Практично ширину скоса приймають зазвичай не менше $(3...4)S$.

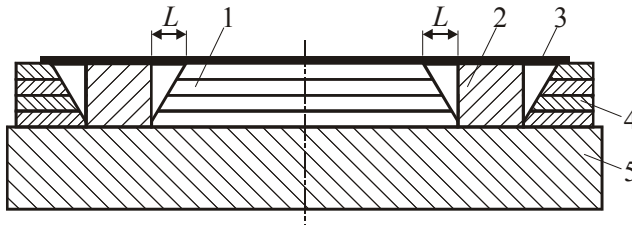


Рисунок 5.12 – Вирізний копір-пуансон з опорним вкладишем і рамкою з пластин:

- 1 – вкладиш; 2 – копір-пуансон; 3 – заготовка;
4 – опорна рамка; 5 – підштампова плита

Невеликі кількості деталей з алюмінієвих і мідних сплавів товщиною не більше 0,5 мм вирізають на незагартованих шліфованих копірах, що мають гострі ріжучі кромки, без заокруглень і вибоїн.

При виготовленні штампового оснащення основними параметрами є геометричні розміри деталі, марка матеріалу деталі, точність її виготовлення, так як від цього залежить обсяг довідних робіт.

5.4. ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПНЕВМОУДАРНОГО ШТАМПУВАННЯ

Розширення меж раціонального використання холодного штампування в індивідуальному, дрібносерійному і серійному виробництві вимагає економічного порівняння різних видів штампового оснащення.

Ефективне використання трудових і матеріальних виробничих ресурсів виявляється в якісному показнику роботи підприємства - собівартості продукції, що випускається.

Тому обрання оптимального варіанту штампового оснащення проводиться шляхом порівняння технологічної собівартості деталі при виготовленні її різними способами.

Структура технологічної собівартості докладно розглянута в ряді робіт і в укрупненому вигляді визначається формулою:

$$T'_c = M + Z_{ш} + P_o + O_d + Y, \quad (5.9)$$

де M – вартість матеріалу, що витрачається на одну деталь, грн.; $Z_{ш}$ – зарплата штампувальника з доплатами і нарахуваннями; P_o – витрати на експлуатацію обладнання (ремонт і вартість електроенергії), що припадають на одну деталь; O_d – витрати на експлуатацію та амортизацію штампів, віднесені до однієї деталі, грн.; Y – витрати на встановлення штампів, що припадають на одну деталь.

Розрахунок технологічної собівартості проводився для типових представників деталей, переведених на штампування з застосуванням штампа пневмоударного штампування. При цьому порівнювалися три технологічних варіанти виготовлення деталі:

- із застосуванням спеціального штампа;
- із застосуванням слюсарно-механічної обробки;
- із застосуванням штампу пневмоударного штампування.

При цьому розглядалося застосування спеціальних штампів послідовної і поєднаної дії.

На рис. 5.13 наведені графіки, що характеризують залежність технологічної собівартості від величини партії при виготовленні деталей.

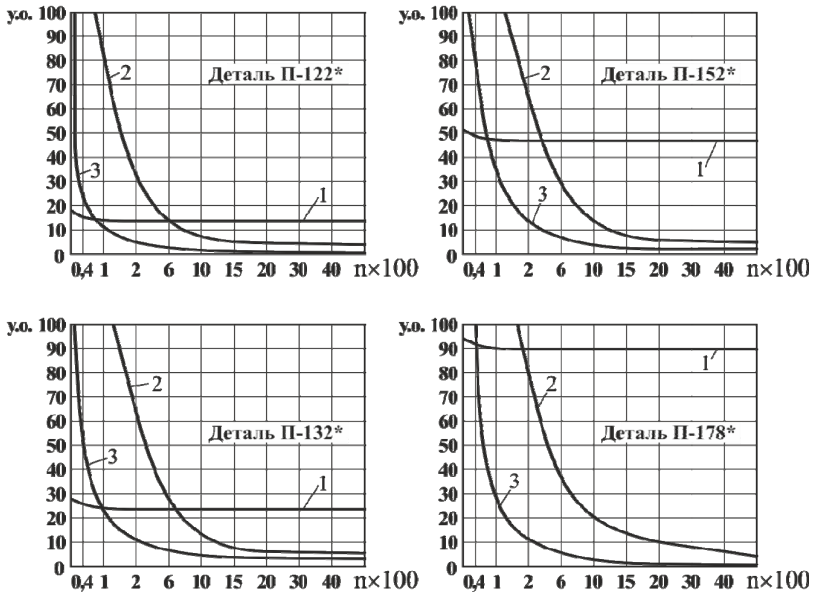


Рисунок 5.13 – Залежність технологічної собівартостівід величини партії деталей, які штампують:

- 1 – слюсарно-механічна обробка; 2 – спеціальні штампи;
3 – пневмоударне штампування;

* – номери деталей взяті за класифікатором виробника

Витрати на основний матеріал

$$M = C_M G_M - C_O G_O, \quad (5.10)$$

де C_M – вартість 1 кг використовуваного матеріалу, грн.; G_M – маса матеріалу, що витрачається на одну деталь, кг; C_O – ціна 1 кг відходів, грн.; G_O – маса відходів від однієї деталі, кг.

Заробітна плата виробничих робітників

$$Z_{ш} = C_p \cdot H_{ш}, \quad (5.11)$$

де C_p – годинна ставка робітника (основна і додаткова заробітна плата з нарахуваннями), грн.; $H_{ш}$ – норма витраченого часу на одну деталь, год.

Витрати на одну деталь, пов'язані з роботою устаткування, складуть

$$P_o = (A_o + \mathcal{E} + T_p + M_g + \mathcal{Z}_{n.p} + A_3 + A_3 \cdot K_c) \cdot H_{ш} \cdot K_{маш}, \quad (5.12)$$

де A_o – годинна витрата на амортизацію обладнання, грн.; \mathcal{E} – годинна витрата на електроенергію, пар, стиснене повітря, грн.; T_p – годинна витрата на поточний ремонт, грн.; M_g – годинна витрата допоміжних матеріалів, грн.; $\mathcal{Z}_{n.p}$ – годинна заробітна плата підсобних робітників і осіб технічного персоналу, грн.; A_3 – Годинна витрата на амортизацію обладнання та утримання площ будівлі, грн.; K_c – коефіцієнт, що враховує витрати на утримання будівель, $K_c = 0,5 \dots 1,5\%$; $K_{маш}$ – коефіцієнт використання обладнання за машинним часом.

Годинна витрата на амортизацію обладнання

$$A_o = \frac{C_{маш} \cdot H_a}{\Phi_{кор}}, \quad (5.13)$$

де $C_{маш}$ – вартість машини, грн.; H_a – нормативна частка амортизаційних відрахувань; $\Phi_{кор}$ – корисний фонд часу машини, год.

Годинна витрата на електроенергію, пар, стиснене повітря

$$\mathcal{E} = W_y \cdot K_u \cdot \mathcal{U} + P_g \mathcal{U}_g, \quad (5.14)$$

де W_y – встановлена потужність електродвигунів, кВт; K_u – коефіцієнт використання встановленої потужності; \mathcal{U} – вартість 1 кВт·год, грн.; P_g – Годинна витрата пара або стисненого повітря; \mathcal{U}_g – вартість 1 кг пари або 1 м³ стисненого повітря, грн.

Годинну витрату на поточний ремонт можна прийняти $T_p = 0,33A_o$. Годинну витрату на допоміжні матеріали M_g приймають рівною 5...10 % витрат на електроенергію. Годинна заробітна плата підсобних робітників і осіб технічного персоналу

$$\mathcal{Z}_{n.p} = n \cdot C_{г.р} \cdot K, \quad (5.15)$$

де n – відношення числа допоміжних робітників за певний

відрізок часу до числа виробничих робітників; $C_{e.p}$ – годинна ставка допоміжного робітника, грн.; K – коефіцієнт, що враховує заробітну плату підсобних робітників (інструментальників, ремонтників) за іншими статтями, що складають собівартість роботи машини, $K = 0,6 \dots 0,7$.

Годинна витрата на амортизацію і утримання займаної обладнанням площі будівлі:

$$A_3 = \frac{C_3 \cdot H_3 \cdot P_{\text{маш}}}{P_3 \cdot \Phi_{\text{кор}}}, \quad (5.16)$$

де C_3 – вартість будівлі для 1 м^3 , грн.; H_3 – нормована частка амортизаційних відрахувань, $H_3 = 0,05 \dots 0,07$; $P_{\text{маш}}$ – площа зайнята технологічним обладнанням, м^2 ; P_3 – загальна площа будівлі, м^2 .

Витрати на технологічне і інструментальне оснащення

$$O = \sum K \cdot O_n, \quad (5.17)$$

де K – вартість ремонту і переточувань, грн.; O_n – первісна вартість оснащення, включно з витратами на його проектування.

Підвищення вимог до якості машин і зниження трудомісткості їх виготовлення вимагають збільшення оснащеності листоштампувального виробництва технологічним оснащенням. Але в умовах, коли точність виготовлення деталей досягається і без оснащення, при малій оптовості її застосування може виявитися нераціональним.

У цьому випадку умова ефективного застосування штампового оснащення пневмоударного штампування визначається залежністю:

$$(T_{\text{бо}} \cdot C_{\text{см}} - T_{\text{ни}} \cdot C_{\text{ш}}) \cdot n_k \geq T_n \cdot C_n + A, \quad (5.18)$$

де $T_{\text{бо}}$ – сумарна трудомісткість виготовлення деталі слюсарно-механічної обробкою, год.; $T_{\text{ни}}$ – сумарна трудомісткість штампування деталі з застосуванням штампів пневмоударного штампування, год.; T_n – трудомісткість встановлення та налагодження штампового оснащення, год.; n_k – мінімальна партія деталей, при якій доцільно застосування штампів пневмоударного штампування; $C_{\text{см}}$ – годинна тарифна ставка робітника верстатника (слюсаря), грн.;

$C_{ш}$ – годинна тарифна ставка штампувальника, грн.; C_n – годинна тарифна ставка наладжувальника, грн.; A – сума амортизаційних відрахувань для штампа пневмоударного штампування, грн.

Звідки була визначена мінімальна партія деталей n_k , при якій доцільно застосування штампів пневмоударного штампування.

На графіках (див. рис. 5.13) n_k знаходиться в точці перетину лінії 1 з гіперболічною кривою 3 і визначає верхню межу раціонального застосування штампів пневмоударного штампування.

Нижня межа визначається точкою перетину кривих 3 і 2.

На рис. 5.14 наведені порівняльні дані трудомісткості в людино-годинах для виготовлення різних штампів і штампового оснащення для ПУШ.

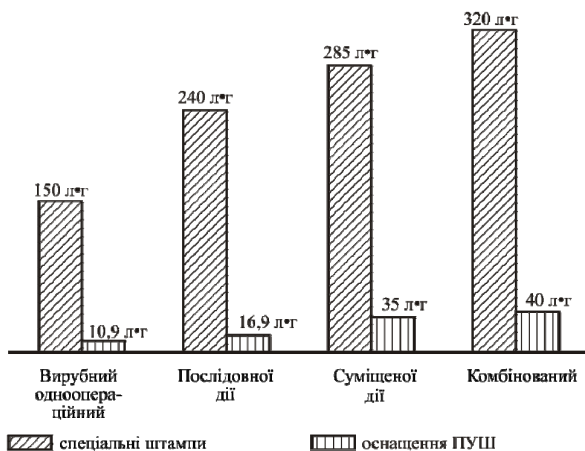


Рисунок 5.14 – Порівняльна трудомісткість виготовлення різних видів штампів і оснащення для пневмоударного штампування

З діаграми видно, що всі види розділювальних штампів пневмоударного штампування мають меншу трудомісткість виготовлення, ніж спеціальні. Це пояснюється тим, що при цьому відпадає необхідність у виготовленні базових плит, державок, знімачів, напрямної системи і інших деталей.

Цикл виготовлення розділювальних і формозмінних штампів в порівнянні зі спеціальними скорочується в 12...40 раз.

Таким чином, головна частина техніко-економічного ефекту від застосування пневмоударного штампування утворюється в результаті скорочення циклу технологічної підготовки виробництва, зниження трудомісткості і металоємності виробу.

Розрахунки показали, що нижня межа доцільного застосування штампів пневмоударного штампування для розділювальних операцій листового штампування перебуває в межах 50 – 100 штук деталей, а верхня межа коливається від 1500 до 5000 деталей в рік.

Слід мати на увазі, що при обранні того чи іншого виду штампового оснащення поряд з планово-економічними показниками необхідно враховувати:

- а) конструктивно-технологічні характеристики відштампованих деталей (точність обробки, габаритні розміри, конфігурацію деталі);
- б) організаційні та технологічні умови виконання операції (вид устаткування, вид операції, організаційні форми процесу штампування).

В табл. 5.6 наведені основні конструктивно-технологічні показники і організаційні форми, характерні для різних видів штампового оснащення.

Таблиця 5.6 – Основні конструктивно-технологічні показники і організаційні форми

Вид штампового оснащення	Квалітет точності	Габарити оброблюваних деталей (приведений діаметр / товщина)	Конфігурація	Організаційні форми експлуатації
Спеціальні штампи	6 – 9	<u>3 мм і вище</u> 10 мм	будь-яка	Виготовлення штампів
Універсальні штампи поелементного штампування	7 – 12	<u>від 30 мм і вище</u> 4 мм	яку можна поділити на елементарні геометричні фігури	Виготовлення набору штампів та інструменту, організація ділянки зі складання
Універсально-складені штампи	8 – 11	<u>до 220 мм</u> 10 мм	будь-яка	Прийняття комплектів, організація ділянки зі складання
Пневмоударне штампування	7 – 14	<u>до 250 мм</u> до 3 мм	будь-яка	Виготовлення копир-пуансонів, матриць

5.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДЛОМ

1. Визначені та апробовані типові рішення штампового оснащення для основних процесів ПУШ рідиною та еластичним середовищем, що забезпечують отримання деталей з заданою розмірною точністю.

2. Дослідження параметрів точності деталей, які штампують пневмоударним методом, показало технічну можливість та економічну доцільність їх широкого застосування в умовах малосерійного багатоміністратурного виробництва при штампунванні деталей простої та складної конфігурації товщиною 0,1...3,0 мм.

3. Можливості методу пневмоударного штампунвання з забезпечення параметрів точності отриманих виробів не поступаються технічним можливостям спеціального штампового оснащення, а в деяких випадках перевершують їх.

4. Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень в діюче виробництво досягається за рахунок скорочення циклу технологічної підготовки виробництва при заміні штампунвання у спеціальних штампах на пневмоударне штампунвання.

ВИСНОВКИ

У дослідженні розв'язане важливе науково-практичне завдання з забезпечення необхідних показників якості, а саме розмірної точності та шорсткості тонколистових виробів, що виготовляють із застосуванням процесів ПУШ, при зменшенні трудомісткості виготовлення виробів, металомісткості оснащення, скороченні часу і витрат на технологічну підготовку виробництва за рахунок визначення раціональних конструкторсько-технологічних параметрів процесів і модернізації обладнання для умов багатомономенклатурного виробництва при дискретно-нестабільних програмах випуску виробів.

Відповідно до поставленої мети і завдань в роботі отримані наступні результати:

1. На основі аналізу технічної літератури і виробничого досвіду запропоновані нові схеми виконання технологічних операцій пневмоударного листового штампування, що дозволило розробити і виготовити комплект штампного оснащення для проведення комплексних досліджень можливостей процесу з досягнення показників точності при виробництві тонколистових деталей. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що точність деталей, що виготовляють методом ПУШ, при виконанні розділових операцій знаходиться в межах 7 – 14 квалітетів при шорсткості поверхні зрізання в межах $Ra = 0,3 - 0,6$ мкм для низькоміцних та $Ra = 0,6 - 1,0$ мкм для високоміцних матеріалів, а формотворчих операцій в межах 8 – 15 квалітетів, що відповідає традиційним методам інструментального штампування.

2. Визначені основні конструктивно-технологічні фактори та характер їх впливу на параметри розмірної точності виробів, які отримують при роздільних і формотворчих операціях ПУШ, розроблено їх класифікацію залежно від характеру і ступеня впливу на процес ПУШ.

3. Встановлено, що на параметри розмірної точності штампованих деталей, домінуючий вплив справляють: геометричні розміри і товщина матеріалу; властивості міцності і пластичності матеріалу; маса бойка; зношування робочих елементів штампів; для роздільних операцій конфігурація торця бойка (бойок з скошеним або нескошеним торцем); для формуютьорюючих конструкція бойка (суцільний або складений).

4. Вперше для операцій витягування та пробивання-вирубубання ПУШ запропоновані аналітичні залежності, які дозволяють з урахуванням особливостей процесу ПУШ і конструктивно-технологічних факторів розрахувати очікувану величину систематичної складової відхилення розмірів виробів відносно дійсного розміру робочого елемента штампового оснащення, а також виходячи з вимог до точності виробів розрахувати скомпенсоване значення номінального розміру робочого елемента.

5. Отримано аналітичні залежності для розрахунку виконавчих розмірів робочих елементів штампового оснащення з урахуванням особливостей процесу ПУШ і впливу конструктивно-технологічних факторів, що забезпечують задану точність штампування.

6. Встановлено, що використання двохударного навантаження підвищує граничний ступінь витягування при виконанні формотворчих операцій на 10 – 15 %, а також знижує радіальні напруження і відповідно зменшуються радіальні деформації до 20 %.

7. Встановлено, що при роздільних операціях ПУШ: спостерігається збільшення розсіювання розмірів деталей відповідно зі збільшенням розміру партії і монотонне зміщення центру групування в міру зношування робочих елементів штампів; процес ПУШ залишається статистично стійким за розсіюванням, тобто дисперсія випадкових похибок в часі змінюється незначно, а середнє значення розсіювання закономірно змінюється в часі; перешліфовування робочих елементів штампів впливає на розсіювання розмірів деталей і знаходиться в прямій залежності від товщини матеріалу, відповідно відбувається і зміщення центру групування. При цьому на відхилення розмірів суттєво впливають геометричні розміри відштампованих

деталей. Так зі збільшенням розмірів деталей з $\varnothing 30$ мм до $\varnothing 90$ мм положення центру групування дійсних відхилень у миттєвих вибірках зміщується на 110 %.

8. Встановлено, що розподіл похибок розмірів відштампованих деталей, при виконанні розділових операцій ПУШ є композицією розподілу похибок за законом рівної ймовірності і нормальним законом; при виконанні формотворчих операцій розподіл похибок підпорядковується нормальному закону.

9. Розроблені практичні рекомендації з проектування технологічних процесів і оснащення для операцій ПУШ пробивання-вирубання та витягування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зубчанинов В. Г. Устойчивость и пластичность. Т. 2. Пластичность. Москва: Физматлит, 2008. 336 с.
2. Handbook of residual stress and deformation of steel. G. Totten, M. Howes, T. Inoue. Materials Park, Ohio : ASM International, 2002. 499 p.
3. Погорелов В. И. Строительная механика тонкостенных конструкций. Санкт-Петербург.: БХВ-Петербург, 2007. 518 с.
4. Амосов А. А. Техническая теория тонких упругих оболочек. Москва: МГСУ: Издательство АСВ, 2009. 301 с.
5. Михайленко Ф. П. Стойкость разделительных штампов. Москва: Машиностроение, 1986.
6. Kibe Y., Okada Y., Mitsui K. Machining accuracy for shearing process of thin-sheet metals. Development of initial tool position adjustment system (International Journal of Machine Tools & Manufacture 47: Elsevier), 2007. pp 1728–1737.
7. Tekiner Z., Nalbant M., Gurun H. An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal (Materials and Design 27: Elsevier), 2006. pp. 1134–1138.
8. Wang X. Z. Tool wear prediction modelling for sheet metal stamping die in automotive manufacture. PhD Dissertation, Swinburne University of Technology. 2011. 165 p.
9. Шаров А. А., Громова Е. Г., Моисеев В. К. и др. Обеспечение взаимозаменяемости при сборке изделий из мало жестких деталей за счет стесненного изгиба эластомером. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 10 (183). С. 37 – 40.
10. Барвинок В. А., Федотова И. Ю., Федотов Ю. В. и др. Стойкость режущих кромок вырубного инструмента при раскрое листовых деталей давлением полиуретана. Симпозиум с международным участием «Самолетостроение России. Проблемы и перспективы». 2012. С. 63 – 65.

11. Subramonian S. Improvement of Punch and Die Life and Part Quality in Blanking of Miniature Parts. Front Cover. Ohio State University, 2013. 155 p.
12. Михаленко Ф. П., Ляпин Ю. И. Количественная оценка качества деталей, получаемых при разделительных операциях листовой штамповки. Технология производства, научная организация труда и управления. НИИМАШ. 1971. Вып. 8. С. 20 – 27.
13. Михаленко Ф. П., Дурандин М. М. Об оценке качества деталей при разделительных операциях. Вестник машиностроения. 1971. № 8. С. 62 – 65.
14. Umaras E., Tsuzuki M. Research on the factors of influence in the dimensional and form precision of stamping processes. ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol. 5. Section IV – Industrial Informatics, Discrete and Hybrid Systems, 2012. P. 694 – 703.
15. H. Makich. Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe: influence sur la qualité des pièces découpées. (Ph.D. Thesis) University of Franche-Comté: Besançon. 2011. 231 p.
16. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. 1981.
17. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики, обозначения. Издание с Изменением № 1, 2006.
18. Donglai W., Zhenshan C. and Jun C. "Optimization and tolerance prediction of sheet metal forming process using response surface model". Computational Materials Science, Vol. 2, No. 42, 2008. pp. 228–233.
19. Neugebauer R., Bouzakis D. K., Denkena B. et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60: Elsevier. 2011. pp. 627–650.
20. Барвинок В. А., Федотова И. Ю., Федотов Ю. В. и др. Повышение качества изготовления деталей с элементами сложного геометрического контура при вырубке-пробивке давлением полиуретана. Симпозиум с международным участием «Самолетостроение России. Проблемы и перспективы». 2012. С. 65-66.

21. Громова Е. Г., Масленникова А. С. Исследование процесса штамповки деталей летательных аппаратов давлением эластичной среды. Актуальные проблемы космонавтики. 2016. С. 431 – 432.
22. Вайнтрауб Д. А. Исследование точности операций вырубки и гибки деталей: дис. ... канд. техн. наук. Вайнтрауб Давид Абрамович. Ленинград: 1956. 132с.
23. Moghadam M., Villa M., Moreau P., Dubois A., Dubar L., Nielsen C.V., Bay N. Analysis of lubricant performance in punching and blanking. Tribology International. Vol. 141, 2020. 105949.
24. Демиденко Е. И. Исследование процесса пробивки-вырубки на быстроходном прессе-автомате: автореф. дис....канд. техн. наук. Демиденко Евгений Иванович. Горький, 1961. 22 с.
25. Винник П. М., Иванов К.М. Влияние точности установки на стойкость инструмента в процессе врубки-пробивки. Металлообработка. 2013. № 1 (73). С. 17 – 23.
26. Горелик Б. В. Манаенков И. В. Повышение стойкости режущих элементов штампов методом вакуумно-плазменного упрочнения. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2005. № 6. С. 19 – 32.
27. Горнов Ю. Н. Исследование влияния технологических факторов на стойкость штампов для вырубки-пробивки слоистых пластмасс: дис. ... канд. техн. наук. Горнов Юрий Николаевич. Горький, 1973. 198 с.
28. Lauwers B., Kruth J.-P., Eeraerts W.. Wear Behaviour and Tool Life of Wire-EDM-ed and Ground Carbide Punches. CIRP Annals. Volume 54, Issue 1. 2005, pp. 163 – 166.
29. S. Subramonian, T. Altan, B. Ciocirlan, C. Campbell . Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 75. 2013. P. 63 – 71.
30. Moghadam M., Villa M., Moreau P., Dubois A., Dubar L., Nielsen C. V., Bay N. Analysis of lubricant performance in punching and blanking. Tribology International, Volume 141, 2020. 105949.

31. Babu S. S. M., Berry S., Ward M., Krzyzanowski M. Numerical investigation of key stamping process parameters influencing tool life and wear. *Procedia Manufacturing*, Volume 15, 2018, pp. 427 – 435.
32. Ильин Л. Н., Семенов И. Е. *Технология листовой штамповки*. М.: Дрофа, 2009. 475 с.
33. Мовшович А. Я. Система универсально-сборных штампов для листовой штамповки. Москва : Машиностроение, 1977. 176 с.
34. Сажин Е. Г. Исследование точности штамповки листовых деталей в универсально-сборных штампах: дис...канд. техн. наук. Сажин Евгений Григорьевич. Минск, 1974.
35. Мансуров И. З., Подрабинник И. М. Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечно-штампового производства: справочник. Москва : Машиностроение, 1990. 344 с.
36. Singh U. P., “Design study of the geometry of a punching/blanking tool”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 4, No. 33, 1992. pp. 331 – 345.
37. Северденко В. П., Кособуцкий В. С. Листовая штамповка с ультразвуком. Минск: Наука и техника, 1975. 191 с.
38. DIN 6930-2. Stamped steel parts – Part 2: General tolerances. Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN), 2011 Edition. 17 p.
39. Ефимов Н. А., Федотов Ю. В., Ефимов Е. А. Исследование точности листовых деталей, вырезаемых полиуретаном в открытом объеме. *Вестник Самарской государственной академии путей сообщения: Научно-технический журнал*. Самара : СамГАПС, 2005. вып. 3. С. 15 – 20.
40. Романовский В. П. Допуски и зазоры в вырезных штампах и исследование процесса резания листовых материалов. *Труды Гипромаша*. 1966. Книга VI. С. 36 – 65.
41. Бронин Г. К. Определение некоторых параметров процесса удара по жидкости, находящейся в замкнутом объеме. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1971. № 11. С. 60 – 63.
42. Вайнтрауб Д. А. О влиянии зазора на стойкость разделительных штампов. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1968. № 6. С. 22 – 23.

43. Федотов Ю. В., Моисеев В. К., Шумков А. П. и др. Исследование механизма разделения листовых материалов при различных способах вырубки деталей полиуретаном. Известия СНЦ РАН. 2010. № т.12, №4(2). С. 449-457.
44. Haas E. Schnittschlagdanfung und Standmen-generhöhung. Industrie-Anzeiger. 1971. 93. No. 76. pp. 1911 – 1912.
45. Seidenberg H. Messung des Kantenverschiebes an Scheidwerkzeugen. Werkstatttechnik. 1967, vol. 57. No. 8. pp. 384 – 390.
46. Фотеев Н. К. Высокостойкие штампы. Москва: Машиностроение, 1970. 278 с.
47. Громова Е. Г., Еськина Е. В., Масленникова А. С. Моделирование процесса разделительной штамповки деталей давлением полиуретана. Актуальные проблемы российской космонавтики. 2015. С. 474 – 475.
48. Мовшович А. Я., Резниченко Н. К., Буденый М. М. Переналаживаемые штампы на основе композиционных материалов для разделительных операций листовой штамповки. Монография. Харьков: УИПА, 2013. 135с.
49. Hernandez J. J., Franco P., Estrems M., Faura F. Modelling and experimental analysis of the effects on tool wear on form errors in stainless steel blanking. Journal of Materials Processing Technology, vol. 180, 2006. pp.143–150.
50. Зубцов М. Е. Листовая штамповка. Ленинград: Машиностроение, 1980. 340 с.
51. Зубцов М. Е. Точность штамповки-вырубки средне- и крупногабаритных тонколистовых деталей. Кузнечно-штамповочное производство. 1968. № 9. С. 28 – 32.
52. Григорьев Л. Л. Исследование точности отверстий, полученных штамповкой по элементам на координатно-револьверных пресах. Известия ВУЗов. Приборостроение. 1967. Т. 10, № 3. С. 116 – 119.
53. Смирнов Г. В. Повышение качества штампованных деталей приборов. Пути повышения качества и точности при листовой и объемной штамповке. ЛДНТП. 1977. С. 41 – 43.

54. Farzin M., Javani H.R., Mashayekhi M., Hambli R., Analysis of blanking process using various damage criteria. *Journal of materials processing technology*, 177-1 (2006) pp. 287–290.
55. Чистяков А. В. Теоретические основы операций вырубki-пробивки : дис. ... канд. техн. наук. Чистяков Андрей Владимирович. Тула, 2001. 119 с
56. Шенкар В. С. Исследование точности вырубki-пробивки статорных листов малых электрических машин: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1970.
57. Дорин В. И. Точная штамповка деталей оптико-механических приборов. Москва: Оборонгиз, 1958. 459 с.
58. Шишков Б. И. Точная штамповка в машиностроении. Москва: Машгиз, 1960. 271 с.
59. Шварцбург Б. И., Чернис Н. Е. Точность сборки универсально-сборных приспособлений. Москва: Комитет стандартов, 1968. 92 с.
60. Романовский В. П. Мовшович А. Я., Долгов В. А. Исследование стойкости режущих элементов универсально-сборных штампов для вырубki-пробивки. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1970. № 6. С. 16 – 19.
61. Романовский В. П. Показатели износа и стойкость вырубных и пробивных штампов. *Вестник машиностроения*. 1974. № 9. С. 67 – 71.
62. Lange K., Dohmen H. G. *Präzisions umformtechnik*. Springer: Berlin. 1990. 365 p.
63. Lange K. *Handbook of metal forming*. New-York: McGraw-Hill. 1985. 563 p.
64. Вада Кадзуо. Точность деталей, полученных вырубкой. *Пурэсу гидзюцу*, 1989. 17. № 10. С. 87 – 92.
65. Макино Икюю. Исследование качества поверхности среза. *Пурэсу гидзюцу*. 1975. № 5. С. 93 – 98.
66. Фукусима Акио. Исследование точности вырубленных деталей. *Киндзюку пурэсу*. 1977. № 8. С. 6 – 18.
67. Bates E. W. Determining optimum punch to die clearances. *Sheet Metal Industries*. 1978, 55, No. 3. pp. 334 – 336.

68. Hopfmann K. Pzazisionsteile aus Blech. Tech + Miinden. 1971. No. 16. pp. 118 – 120.
69. Rechel B. Das stanzen von Lochern hinsichtlich Lochungs ver haltinis und ther moelektrieseher Auswirkung auf kuhlschmierung, Stanzbarkeit, Schneidspalt und werkzeugwerschlieb. Blech. 1969, vol. 16. No. 9. pp. 432 – 443.
70. Seidenberg H. Pressen-und Werkzeigeinflusse auf den Kantenverschleis Beim Schneiden von Feiblech. Werkstatt technik. 1968, vol. 58, No. 3. pp. 125 – 129.
71. Spizig J. S. Rasch zu wechselnde werkzeige fur Pressen. Werkstatt und Betrieb. 1970. vol. 103. No. 17. p. 531.
72. Stauberg M. Vereinfarung beim Bankon Schnittwerkzeugen. Wertstatts-technik. 1959. vol. 59. No. 9. pp. 431 – 433.
73. Buhler H., Seidenberg H. Werkzeug kerschleib und Yrathole beim Schweiden von Feiblech. Stahlund Sisen. 1966. No. 25. pp. 1677 – 1688.
74. Аоку Синэо. Уменьшение заусенцев при вырубке. Пурэсу гидзюцу. 1977. Т. 15. № 12. С. 4.
75. Mekarū Shunei, Maeda Teizo. Исследование стойкости штампов при вырубке нержавеющей стали. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity. 1978, vol. 19, No. 207. pp. 316 – 324.
76. Ozaki Tatsuo, Yamasaki Susumu. Вырубка и пробивка в штампах со скошенными кромками. – Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity. 1975. vol. 16. No. 172. pp. 385 – 392.
77. Hugo H. R. Punch and die cleances. American Machinist. 1969, 113, No. 10. pp. 163 – 164.
78. Marejka P. Welche Schueidspalt geometrie beim Lochen nich rostender Blech. Maschinenmarkt. 1979, 85, No. 72. pp. 1413 – 1414.
79. Ludwick S. J. Precision presswork medisprecision steel. Tooling and Production. 1968, vol. 34, No.7. pp. 78 – 79.
80. Гиндин В. Б. Технология штамповки деталей повышенной точности. ЛДНТП, 1977. 8 с.
81. Grunbaum M., Breitling J., Altan T. Influence of high cutting speeds on the quality of blanked parts. ERC report N°5-96-19, University of Stuttgart, Allemanne. 1996. 114 p.

82. Северденко В. П., Костюкович С. С., Цитович Б. В., Шустер Я. Б. Взаимосвязь качества поверхности среза и точности отверстий пробитых в гетинаксе. Кузнечно-штамповочное производство. 1971. №2. С. 12 – 15.
83. Комаров А. Д., Моисеев В. К., Киров Ф. В. Штамповка трубчатых деталей эластичной средой на пневмогидравлической установке. Кузнечно-штамповочное производство. 1976. №2. С. 31 – 32.
84. Комаров А. Д. Экономия металла при штамповке полиуретаном. Куйбышев, 1986. 120 с.
85. Рябых А. А. Точность деталей вырезаемых эластичной средой. Москва: Кузнечно-штамповочное производство, 1975. №2. С. 20 – 22.
86. Ходырев В. А. Проектирование, изготовление и эксплуатация штампов с полиуретаном. Пермь: Кн. изд-во, 1975.
87. Томилов М. Ф. Повышение эффективности процесса формообразования деталей из листа эластичной средой в жесткой матрице. Дисс. канд. техн. наук. Воронеж, 1999. 194 с.
88. Блинов М. А. Вытяжка полиуретаном полусферы из труднодеформированной стали. Кузнечно-штамповочное производство. 1991. №6. С. 14 – 15.
89. Блинов М. А. Энергосберегающий способ вытяжки полиуретаном. Кузнечно-штамповочное производство. 1990. №5. С. 29 – 30.
90. Кутырев А. С. и др. Технологические приемы обеспечения требований по точности к кузовным деталям. Кузнечно-штамповочное производство. 1991. №5. С. 16 – 17.
91. Сизов Е. С., Бабурин М. А. Штамповка листовых деталей сложной формы пластично-эластичными средами. Кузнечно-штамповочное производство. 1994. №8. С. 9 – 11.
92. Глушечков В. А. Технология и оборудование специальных видов листовой штамповки. Самара: Изд-во СГАУ, 2013. 174 с.
93. Бебрис А. А., Плеханов В. М., Маялков А. И. Расчетные методы и технология процессов вытяжки деталей сложной формы эластичным пуансоном. Рига: НИИНТИ и пропаганды, 1980. 34 с.

94. Шагунов А. В., Шереметов В. Е., Томилов М. Ф. Разработка технологии вытяжки эластичной средой деталей из листа. Кузнечно-штамповочное производство. 1998. №3. С. 20 – 23.
95. Дель Д. Г., Шагунов А. В. Компьютерное проектирование операций отбортовки и гибки-формовки эластичной средой. Авиационная промышленность. 1997. №7. С. 42–45.
96. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью. Москва: Машиностроение, 1967. 367 с.
97. Анучин М. А., Антоненков О. Д. Штамповка взрывом. Москва: Машиностроение, 1972. 247 с.
98. Здор Г. Н., Исаевич Л. А., Качанов И. В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
99. Степанов В. Г., Шавров И. А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Ленинград: Машиностроение, 1975. 280 с.
100. Бычков С. А. Концепция применения и реализации импульсных технологий листовой штамповки в условиях опытного и серийного производства транспортных самолетов: дис. в форме научного доклада ... доктора техн. наук: Харьков: ХАИ, 1991. 55 с.
101. Кривцов В. С., Борисевич В. К. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки металлов. Авиационно-космическая техника и технология: тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 11/47. Харьков, 2007. С. 10 – 18.
102. Кривцов В. С., Сабелькин В. П. Концепция создания технологических процессов изготовления деталей летательных аппаратов с использованием взрыва. Проблемы горения, баллистики и механики соударений: тез. докл. 2-ой Укр. научн.-практ. конф. 10 – 15 июня 1996 г. Одесса: ОГУ. С. 23.
103. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков : ХАИ, 2011. 272 с.

104. Чачин В. Н., Шамарин Ю. Е., Журавский А. Ю. и др. Листовая штамповка с использованием импульсных загрузок. Киев: УМК ВО, 1989. 108 с.
105. Чачин В. Н., Богоявленский К. Н. Состояние и пути развития некоторых импульсных методов. Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 6. С. 23 – 25.
106. Бычков С. А., Сухов В. В. Формообразование элементов трубопровода типа наконечников и переходников. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. – Харьков, 1996. С. 20 – 21.
107. Брагин А. П., Мацукин Ю. Г. Элементы конструкций преспушек для гидродинамической штамповки. Импульсная обработка металлов давлением: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. Вып. 1. Харьков., 1970. С. 80 – 83.
108. Фролов Е. А., Усанин В. П., Аулов А. Е., Иванов О. Е. Технология и оборудование для обработки сложнорельефных тонколистовых деталей энергией детонирующих газовых смесей. Тез. докл. II отрасл. конф. «Прогрессивные виды универсально-сборной переналаживаемой оснастки». Харьков, 1987. С. 42.
109. Петраковский В. С. Оценка штампуемости материалов при гидроударной вытяжке листового металла. Импульсные методы обработки металлов. Минск: Наука и техника. 1977. С. 123 – 131.
110. Поляк С. М. Формообразование оболочек с криволинейной образующей внутренним давлением жидкой и газовой среды. Штамповка эластичной, жидкой, газовой средой и силовым полем. Труды Моск. авиац. ин-та. 1972. Вып. 238. С. 42 – 46.
111. Фролов Е. А. Показатели качества современных технологических систем импульсного формообразования сложнорельефных деталей. Технологические системы. Киев, 2002. № 6. С. 23 – 26.
112. Фролов Е. А., Петраковский В. С., Мовшович И. Я., Журавлевский А. Ю. Штамповка импульсная ударная листовых деталей сложных форм. Москва: Изд. ЦНИТИ, 1987. 214 с.

113. Фролов Е. А., Манаенков И. В., Тимофеев С. С., Дякова Т. В. Пути повышения качества технологической системы пневмоударной штамповки листовых деталей. Удосконалення будівельних колій та перевантажувальних машин: зб. наук. пр. Укр. держ. академії залізн. трансп. Вып. 88. Харків, 2008. С. 166 – 172.
114. Фролов Е. А. Научные основы пневмоударной штамповки сложнорельефных тонколистовых деталей. Дисс. ... докт. техн. наук., Краматорск, 2003. 370 с.
115. Frolov E. A., Yasko S. G., Kravchenko S. I. Definition of the influence of technological and constructive parameters of technical systems on energy-power characteristics of pneumatic-shock forming. Aerospace technic and technology. 2016. №3 (130). pp. 23 – 29.
116. Зорик В. Я. Системно-структурное моделирование технологии листовой штамповки подвижными средами. Импульсная обработка металлов давлением: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ун-та. Харьков, 1997. С. 80 – 83.
117. Мовшович А. Я., Кузнецова Л. Г., Фролов Е. А., Манаенков И. В. Технологические предпосылки получения высокоточных деталей вытяжкой из листа методом пневмоударной штамповки. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: темат. зб. наук. пр. ДДМА. Краматорськ, 2009. С. 352 – 356.
118. Манаенков И. В. Исследование точности разделительных операций пневмоударной штамповки тонколистовых деталей. Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. НТУ «ХПИ». Вып. 2. Харків, 2009. С. 86 – 89.
119. Мовшович А. Я., Буденный М. М., Манаенков И. В. Распределение погрешностей при выполнении разделительных операций пневмоударной штамповкой. Технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Нац. технич. ун-та «ХПИ». Вып. 34. Харьков, 2008. С. 41 – 44.
120. Журавский А. Ю., Петраковский В. С., Юревич С. В. Точность формы и размеров деталей сложной конфигурации при гидроударной штамповке. Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 3. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. С. 70 – 75.

121. Здор Г. Н., Журавский А. Ю., Петраковский В. С. Влияние энергетических параметров ударных прессов на стабильность формы деталей при тонколистовой штамповке. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. мат. межд. научно-техн. конф. Минск: ГНУ "Физико-технический институт НАН Беларуси", 2010. Кн. 3: Технологические процессы обработки материалов давлением. Безопасность и надежность магистральных трубопроводов и сосудов высокого давления. С. 21 – 24.
122. Петровский В. С., Журавский А. Ю. Обеспечение точной геометрии и качества поверхности сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. науч. тр. В 3 кн. 2014. Кн. 3: Обработка металлов давлением. Физико-технический институт НАН Беларуси. С. 156 – 162.
123. Falconnet E., Chambert J., Makich H., Monteil G. Prediction of abrasive punch wear in copper alloy thin sheet blanking. *Wear*, 338 (2015), pp. 144–154.
124. Зорик В. Я., Нестеренко В. А., Третьяк В. В. Технологическая модель листовых деталей сложной пространственной формы, изготавливаемых взрывной штамповкой. Обработка материалов давлением импульсными нагрузками: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. Харьков, 1988. С. 25 – 34.
125. Наумович Т. М. Исследование и разработка методик расчета технологических процессов обработки материалов на гидроударных установках: дис. ... канд. техн. наук. Наумович Тамара Митрофановна. Минск, 1981. 135 с.
126. Gromova E. G., Eskina E. V. Research of the parts pressing process using the elastic media pressure. *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 684. pp. 273 – 277.
127. Фролов Е. А., Кравченко С. И., Носенко О. Г., Ясько С. Г. Повышение степени вытягивания тонколистовых деталей при пневмоударной штамповке жидкостью Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. №5 (1048), С. 105 – 110.

128. Ясько С. Г. О степени влияния конструктивно-технологических факторов на процесс пневмоударной вытягивания. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2018. вып. 79., С. 31– 37.
129. Фролов Е. А., Мовшович А. Я. и др. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами: монография. Харьков: УкрГАЗТ, Краматорск: ДГМА, 2010. 287 с.
130. Фролов Е. А., Манаенков И. В. Особенности пневмоударной штамповки сложнорельефных деталей. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 3(54). Харьков, 2008. С. 101 – 109.
131. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке: справочное издание. 6-е изд., перераб. и доп. Ленинград, Машиностроение, 1979. 520 с.
132. Романовский В. П. Сопротивление срезу при вырубке-пробивке толстолистовых материалов. Вестник машиностроения. 1973. № 7. С. 60 – 62.
133. Комаров А. Д., Киселев В. А., Балычкова Е. М. Влияние технологических факторов на точность и качество деталей, вырезанных эластичной средой. Повышение эффективности кузнечно-штампового производства. Тезисы докладов республиканской конференции. Кишинев, 1977. С. 6–9.
134. Баранов Н. Ф. О механизме разделения металла при резке эластичной средой. Кузнечно-штамповое производство. 1981. № 3. С. 24–26.
135. Тимощенко В. А., Богоев В. С., Разделение листового металла эластичными средами. (ред. Токи А. В.). Кишинев: Штиинца, 1988. 106 с.
136. Кокорин В. Н. Титов Ю. А., Таловеров В. Н., Федорова Л. В. Специальные способы обработки металлов давлением. Ульяновск: УЛГТУ, 2006. 36 с.

137. Фролов Е. А., Манаенков И. В., Дякова Т. В. Оценка качественных показателей деталей из листа при операциях пробивки – вырубки эластичной средой на пневмоударном оборудовании. Збірник наукових праць УДАЗТ. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту. 2008. Вип. 99. С. 250–256.
138. Анищенко А. С., Кухарь В. В., Присяжный А. Г., Глазко В. В., Ясько С. Г. Исследование упругой деформации эластичных элементов штамповой оснастки. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 1 (46). ПолтНТУ, 2016. С. 4 – 13.
139. Фролов Е. А., Ясько С. Г., Агарков В. В., Кравченко С. И. Совершенствование процессов разделения листового материала эластичной средой. Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 30(1306), 2018. С 89 – 93.
140. Фролов Е. А., Ясько С. Г., Анализ причин возникновения погрешностей при пневмоударной штамповке деталей эластичными средами и их классификация. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т ”ХАИ”, 2016. вып. 74. С. 143 – 150.
141. Фролов Е. А. Ясько С. Г., Кравченко С. И. Исследование влияния остаточных напряжений на точность штамповки листовых деталей при разделительных операциях. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 78. Харьков, 2017. С. 96–101.
142. Манаенков И. В. Резниченко Н. К., Фролов Е. А. Повышение точности и качества рабочих поверхностей деталей методом пневмоударной штамповки. Машиностроение: сб. науч. пр. Укр. інж.-пед. акад. Харків: УПА. 2012. № 9. С. 142 – 147.
143. Ковалев В. Г. Разработка методики определения и конструкторско-технологического обеспечения заданной точности размеров деталей, изготовленных вытяжкой и отбортовкой из листовых заготовок : дис... д.т.н. Ковалев Виктор Григорьевич. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 1995. – 302 с.

144. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. Москва: Высш. шк., 2003. 479 с.
145. Ясько С. Г. Анализ закономерностей распределения погрешностей размеров деталей при разделительных операциях пневмоударной штамповки эластичной средой. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2018. вып. 80. С. 105 – 110.
146. Frolov E. A., Yasko S. G., Kravchenko S. I., O. H. Nosenko. To the question of manufacturing high-quality perforated detail made of fiberglass by stamping. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2016. Вып. № 71. С. 93 – 99.
147. Фролов Е. А., Ясько С. Г., Кравченко С. И. Исследование разнотолщинности при пневмоударной вытяжке с калибровкой без прижима листовой заготовки Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2017. вып. 77. С. 68 – 71.
148. Фролов Є. А., Ясько С. Г., Мороз Н. Н., Саленко Ю. С. Дослідження впливу зусилля притискання заготовки на якість процесу витягування високошвидкісним штампуванням. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. №35(1257). С. 68 – 72.
149. Фролов Е. А., Ясько С. Г., Кравченко С. И. Технологические возможности пневмоударной штамповки вытяжкой тонколистовых деталей. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков, 2018. № 81. С. 45–51.
150. Мошнин Е. Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей Москва: Машиностроение, 1973. 240 с.
151. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 282 с.

152. Налимов В. В. Теория эксперимента. Москва: Наука, 1997. 207 с.
153. Фролов Е. А., Носенко О. Г., Ясько С. Г., Кравченко С. И. Основные направления совершенствования технологии глубокой вытяжки коррозионностойких хромоникелевых сталей. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2016. вып. 74. С. 137 – 142.
154. Фролов Е. А., Драгобецький В. В. Ясько С. Г. Визначення впливу технологічних чинників на процес інтенсифікації пневмударного штампування витягуванням і точність штампованих деталей. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков, 2019. №89. С. 109–116.

Наукове видання

**Ясько Станіслав Георгійович
Фролов Євгеній Андрійович
Кухар Володимир Валентинович
Грушко Олександр Володимирович
Віштак Інна Вікторівна**

**ТОЧНІСТЬ ТОНКОЛИСТОВИХ ВИРОБІВ
ПРИ ПНЕВМОУДАРНОМУ ШТАМПУВАННІ
РУХОМИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ**

Монографія

Оригінал-макет підготовлено І. Віштак

Підписано до друку 15.09.2022 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 12,01.
Наклад 30 пр. Зам. № В2022-06.

Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua
email: irvc.vntu@gmail.com

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

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