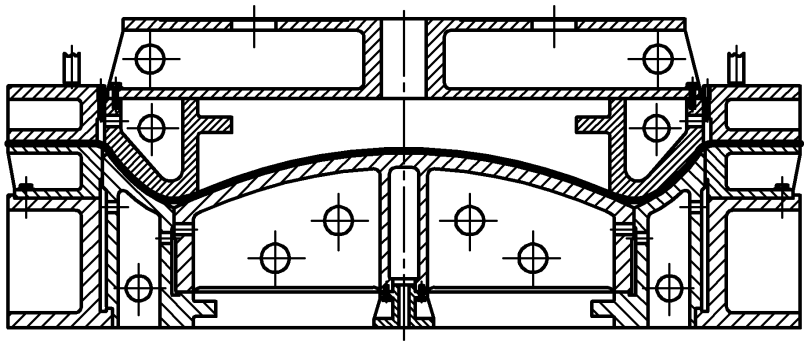
М.М. УБИЗЬКИЙ

О.В. КУЛИК

А.Г. ФЕСЕНКО

Д.І. ШЕВЧУК

ХОЛОДНЕ ЛИСТОВЕ ШТАМПУВАННЯ



2008

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет

90-річчю ДНУ присвячується

М.М. Убизький, О.В. Кулик, А.Г. Фесенко, Д.І. Шевчук

ХОЛОДНЕ ЛИСТОВЕ ШТАМПУВАННЯ

Ухвалено вченою радою університету як навчальний посібник

Дніпропетровськ
РВВ ДНУ
2008

УДК 621.98 (075)
Х 73

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Р.П. Дідик
д-р техн. наук, проф. Ф.П. Санін

Х73 Холодне листове штампування [Текст]: навч. посіб./ М.М. Убизький, О.В. Кулик, А.Г. Фесенко, Д.І. Шевчук. − Д.: РВВ ДНУ, 2008. − 124 с.

Поданий матеріал, стосовний роз'єднувальних та формозмінних операцій холодного листового штампування й устаткування для відрізання листового матеріалу. Наведені схеми та класифікація цих операцій. Поданий аналіз напружено-деформованого стану, який виникає під час здійснення основних операцій холодного листового штампування, необхідний для правильного виконання технологічних розрахунків, пов'язаних із розробкою технологічних процесів листового штампування.

Призначений для студентів ДНУ, які навчаються за напрямками «Авіаційна й ракетно-космічна техніка», «Ракетно-космічні комплекси», «Двигунобудування», «Енергетичні установки літальних апаратів», може бути використаний аспірантами.

©Убизький М.М., Кулик О.В., Фесенко А.Г., Шевчук Д.І., 2008

ВСТУП

Холодне листове штампування широко застосовується в машино-, авіа-, ракето-, автомобіле-, приладобудуванні та інших галузях промисловості. Номенклатура деталей, штампованих із листа і профілів і використовуваних як складові частини виробів, які виготовляються у перелічених галузях, досить велика.

Найбільшого поширення холодне листове штампування набуло в багатосерійному і масовому виробництві, де великі масштаби випуску виробів дозволяють застосовувати технічно більш складні й дорогі штампи. Ряд виробів масового виробництва виготовляється десятками й сотнями тисяч штук на рік. Також у даний час холодне листове штампування широко застосовується і в дрібносерійному, і навіть в одиничному виробництві, прикладом цього може бути виготовлення виробів ракетно-космічної й авіаційної техніки, суднобудування.

Сучасний розвиток холодного листового штампування йде за такими напрямками: розширення сфери застосування цього методу шляхом заміни виливаних і кованих деталей штампованими або штампозварними, для яких у більшості випадків подальша обробка різанням не потрібна або зведена до мінімуму; поширення холодного листового штампування в дрібносерійному виробництві завдяки використанню спрощених і універсальних штампів; зниження витрат матеріалу шляхом створення технологічних форм деталей, впровадження раціонального розкрою, використання відходів, підвищення точності розрахунку розмірів заготовок та ін.; підвищення точності виготовлення листових штампованих деталей і т. ін.

Розширення сфери застосування холодного листового штампування, з одного боку, характеризується значним збільшенням габаритів штампованих деталей до 10 м і більше, а з іншого боку — різким зменшенням розмірів — мініатюризацією деталей (радіоелектронної апаратури).

Основним прогресивним конструктивним показником, що характеризує ефективність холодного листового штампування, є зниження маси за збільшення міцності й жорсткості штампованих із листа деталей.

Головним технологічним чинником подальшого розвитку холодного листового штампування є прагнення одержати повністю закінчену деталь, коли була б не потрібна подальша обробка різанням або вона була зведена до мінімуму.

1. КЛАСИФІКАЦІЯ ОСНОВНИХ ОПЕРАЦІЙ ХОЛОДНОГО ШТАМПУВАННЯ

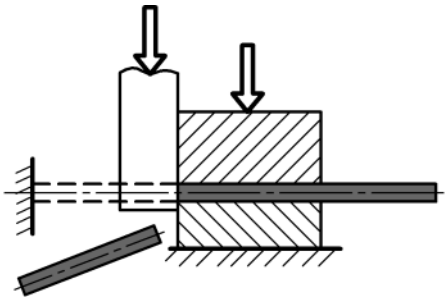
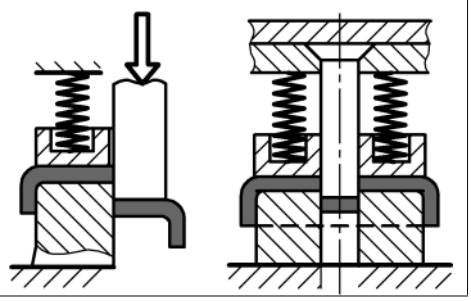
Холодне листове штампування об'єднує велику кількість різноманітних процесів, які можуть бути систематизовані за такими ознаками: 1) характером і видами деформацій; 2) окремими типами операцій.

З огляду на характер деформацій холодне листове штампування поділяється на дві основні групи: деформації, пов'язані з розділенням матеріалу, і пластичні деформації. Перша група включає деформації, які приводять до місцевого роз'єднання матеріалу шляхом відрізання (відділення) однієї його частини від іншої. Існує чотири основні види деформацій холодного листового штампування: 1) різання — відділення однієї частини матеріалу від іншої по замкненому або незамкненому контуру; 2) згинання — перетворення плоскої заготовки на зігнуту деталь; 3) витяжка — перетворення плоскої заготовки на порожнисту деталь будь-якої форми або подальша зміна її розмірів; 4) формування — зміна форми деталі або заготовки шляхом місцевих деформацій різного характеру. Кожен з основних видів деформацій холодного штампування поділяється на ряд окремих операцій, що відзначаються певними особливостями й призначенням роботи, а також типом штампа.

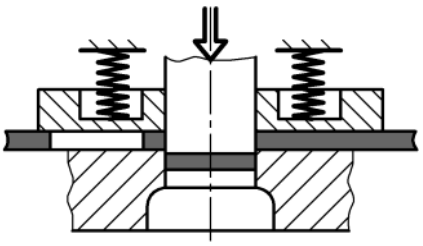
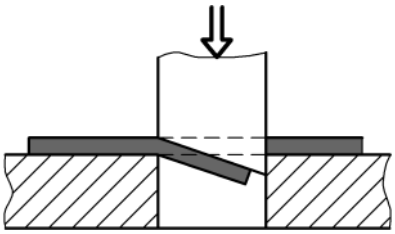
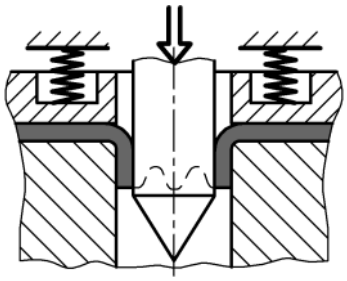
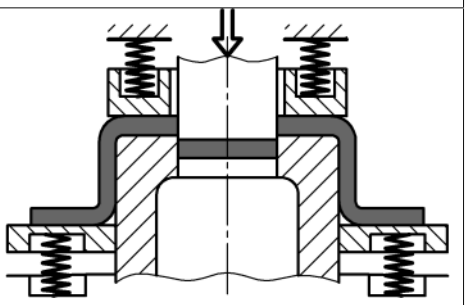
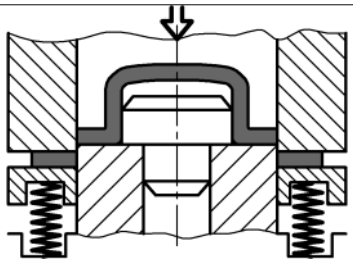
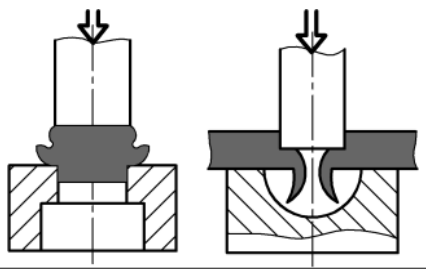
У табл. 1.1 — 1.2 наведені класифікація і термінологія основних процесів і операцій холодного листового штампування, ілюстровані прикладами схематичного зображення операцій.

Таблиця 1.1

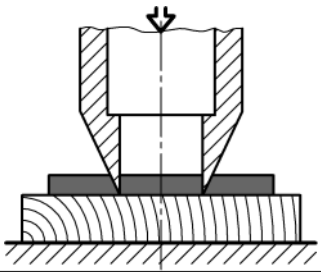
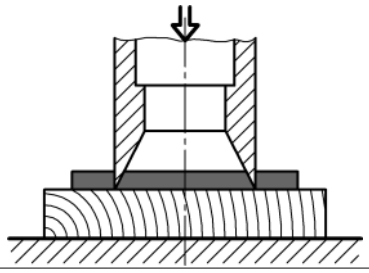
Схеми основних роз'єднувальних операцій

№ п/п	Термін та його визначення	Схема операції
1	Відрізання — повне відділення частини заготовки по незамкненому контуру шляхом зсуву	
2	Розрізка — розділення заготовки на частини по незамкненому контуру шляхом зсуву (з відходом та без нього)	

Продовження табл.1.1

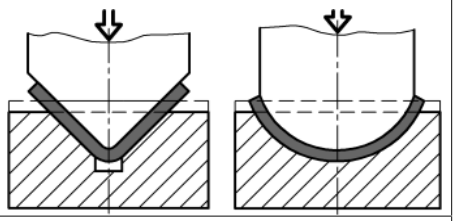
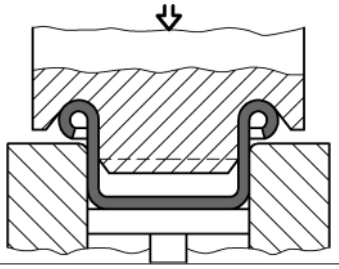
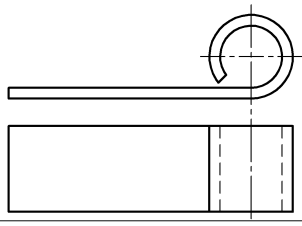
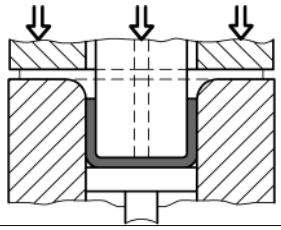
№ п/п	Термін та його визначення	Схема операції
3	Вирубка — повне відділення заготовки або виробу від вихідної заготовки по незамкненому контуру шляхом зсуву (видалена частина – деталь)	
4	Надрізання — неповне відділення частини заготовки шляхом зсуву	
5	Проколювання — утворення в заготовці отвору без видалення металу у відхід	
6	Пробивання — утворення паза чи отвору шляхом зсуву з відходом у вигляді видаленої частини	
7	Обрізання — видалення залишків металу (припуску, облою) шляхом зсуву	
8	Зачищення — видалення технологічних припусків за допомогою штампа з утворенням стружки для збільшення точності розмірів та зменшення шорсткості штампованої заготовки	

Закінчення табл.1.1

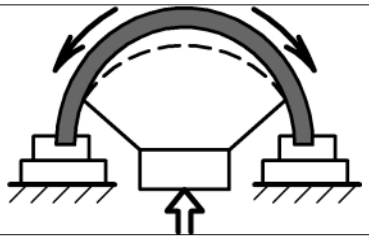
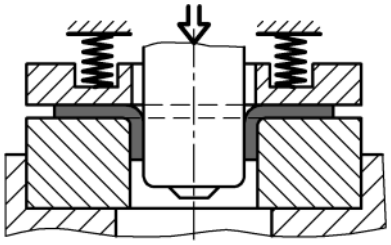
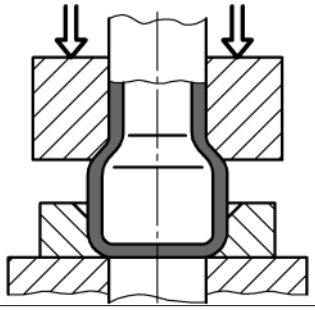
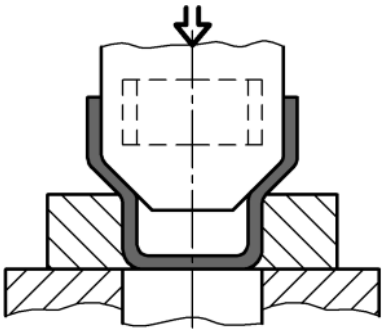
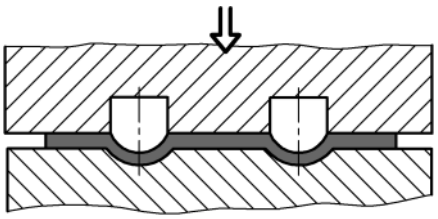
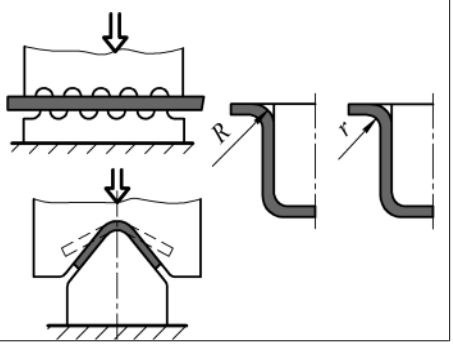
№ п/п	Термін та його визначення	Схема операції
9	Висічка — повне відділення заготовки або виробу по замкненому контуру шляхом уведення інструмента в матеріал вихідної заготовки	
10	Просікання у штампі — формування отвору в заготовці шляхом уведення в неї інструмента з видаленням частини матеріалу у відхід	

Таблиця 1.2

Схеми основних формозмінних операцій

№ п/п	Термін та його визначення	Схема операції
1	Згинання — формування або зміна кутів між частинами заготовки або надання їй криволінійної форми	
2	Загортання — утворення закруглених бортів на краях порожнистої заготовки	
3	Завивка — утворення закруглень на кінцях плоскої заготовки або заготовки з дроту	
4	Витяжка — формування порожнистої заготовки або виробу з плоскої або порожнистої вихідної заготовки	

Продовження табл.1.2

№ п/п	Термін та його визначення	Схема операції
5	Обтягування — утворення заготовки заданої форми докладанням розтяжних зусиль до її країв	
6	Відбортовка — утворення борту по внутрішньому контуру заготовки	
7	Обтиск у штампі — зменшення розмірів поперечного перерізу частини порожнистої заготовки	
8	Роздача — збільшення розмірів поперечного перерізу частини порожнистої заготовки	
9	Рельєфне формування — утворення рельєфу в листовій заготовці за рахунок місцевих розтягнень без зміни товщини стінки	
10	Правка тиском — усунення викривленої форми заготовки, зменшення радіусів сполучень ділянок заготовки	

Штампування деталей шляхом виконання декількох операцій у більшості випадків економічно невигідне, тому звичайно застосовують методи комбінованого штампування, поєднуючи дві або кілька з указаних деформацій і окремих операцій. За технологічною ознакою комбіновані операції можуть бути поділені на три групи: 1) розділові комбіновані операції, у яких поєднуються різні види ріжучих операцій (вирубка, пробивання, відрізання); 2) формозмінні комбіновані операції, що включають різні види операцій зміни форми (витяжка, рельєфне формування, згинання, відбортовка й ін.); 3) комбіновані операції різання й зміни форми, у яких сполучаються розділові та формозмінні операції (вирубка – витяжка, формування – пробивання й ін.). За способом поєднання операцій комбіноване листове штампування поділяється на три групи: 1) суміщене; 2) послідовне; 3) суміщено-послідовне.

У разі суміщеного штампування одночасно виконується кілька різних операцій за один хід процесу й за одне встановлення заготовки в штампі. Послідовне штампування об'єднує декілька операцій (переходів), здійснюваних послідовно окремими пуансонами за певну кількість ходів преса під час переміщення заготовки між ними, причому за кожний хід преса виходить готова деталь. У випадку суміщено-послідовного штампування виконується ряд операцій шляхом одночасного застосування суміщеного і послідовного штампування в одному штампі. За численності варіантів поєднань окремих операцій існує багато різноманітних типів комбінованого штампування і штампів, повністю класифікувати які не є можливо.

Окрім штампувальних процесів у холодному штампуванні застосовуються заготівельні, давильні, допоміжні, термічні й оздоблювальні операції. До заготівельних належать: правка листів і смуг на спеціальних машинах і правильних валках, а також різання листів на смуги або штучні заготовки.

Ряд операцій виконується на давильних, роликових верстатах: видавлювання та розкочування порожнистих виробів; загинання кромок і фальців; згинання профільованих деталей на універсальних згинальних машинах, циліндричних і конічних деталей на вальцях; згинання бортів; обрізання й загортання бортів і кромок; правка та видавлювання рельєфу; роботи зі згинання труб та ін.

Допоміжними операціями є: змащення заготовок, фосфатування, зачистка задирок, знежирення, травлення, промивка й ін.

До термічних операцій відносять: відпал заготовок, рекристалізаційний відпал напівфабрикату між операціями, гартування і відпуск окремих штампованих деталей і т.ін.

2. РОЗДІЛОВІ ОПЕРАЦІЇ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ

Розділові операції широко застосовуються в холодному штампувальному виробництві. З їх допомогою здійснюються різання рулонного й листового прокату на стрічки і штаби, розрізання сортового прокату на заготовки, вирубка різних плоских деталей і заготовок для штампування просторових порожнистих деталей та ін.

2.1. Відрізання листового прокату, труб і профілів

2.1.1. Механізм деформації відрізання, оптимальний зазор

Механізм деформації під час виконання розділових операцій розглянемо на прикладі відрізання та розрізання. Їх здійснюють за допомогою спеціальних ножиць або штампів. Робочі органи — ножі, які, проникаючи в метал, пластично деформують його до повного відділення однієї частини від іншої. Ножі встановлюють із деяким зазором z. Під час відрізання виникає згинаючий момент M, що дорівнює добутку сили, прикладеної до ножа, та плеча, дещо більшого, ніж зазор z між ножами:

$$M = aPl,\ a > 1,$$

де M – згинаючий момент; P – сила, прикладена до ножа; l – плече дії сили P; a – коефіцієнт співвідношення l та z.

Згинаючий момент викликає поворот відрізуваної заготовки, що, у свою чергу, зумовлює виникнення реакцій N на бічних поверхнях ножів (рис. 2.1). Для запобігання повороту листа (або прутка, профілю) у процесі відрізання передбачений притискний пристрій, що створює силу притиску Q.

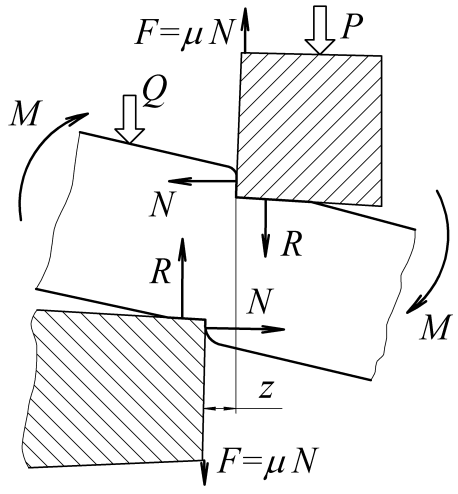


Рис. 2.1. Схема дії сил під час відрізання: P – сила, прикладена до ножа; M – згинаючий момент; Q – сила притиску; z – зазор між ножами; R і N – реакції на поверхнях ножів, F – сила тертя; μ – коефіцієнт тертя

Значення бічних реакцій N складають: у випадку відрізання без притиску листа $N = 0{,}18 \div 0{,}35$, у разі відрізання з притиском — $N = 0{,}1 \div 0{,}2$ деформуючого

зусилля *P*. Під дією реакцій *N* зазор між ножами *z* збільшується, що погіршує якість поверхні зрізу, знижує точність розмірів деталі. Процес відділення однієї частини металу від іншої включає окремі стадії (рис. 2.2).

На початку першої стадії відрізання пластична деформація зосереджена біля робочих кромок ножів. У міру стулення ножів осередки пластичної деформації збільшуються і врешті-решт стуляються (рис. 2.2, *а*).

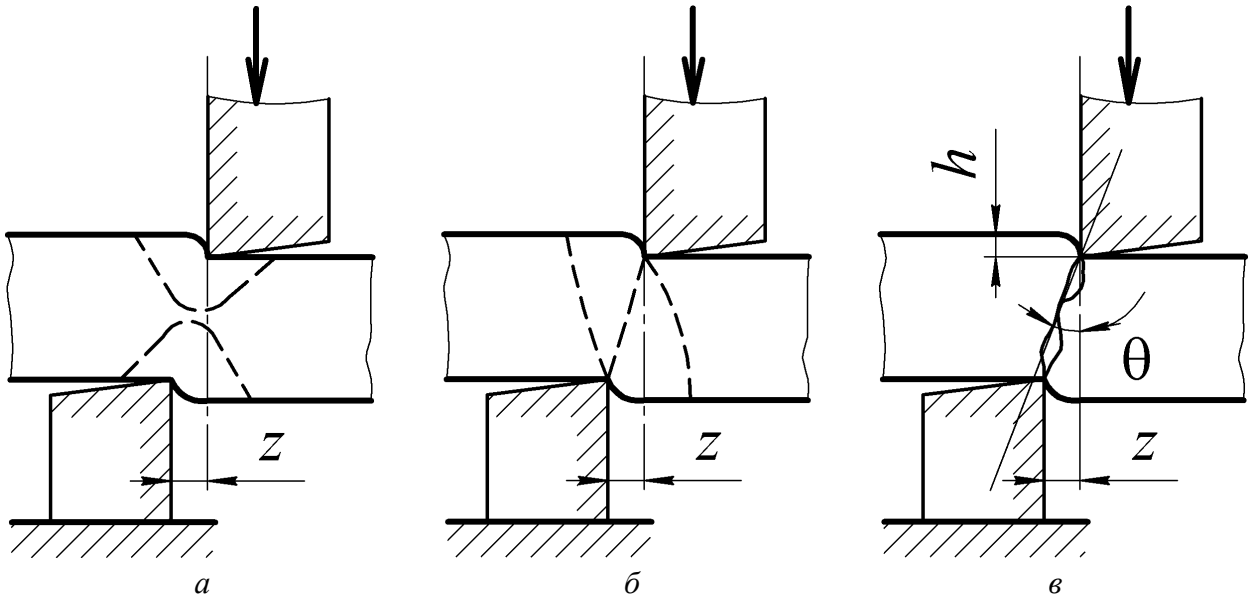


Рис. 2.2. Схематичне зображення стадій процесу відрізання:
z – зазор між ножами; *h* – глибина проникнення ножа в метал; *θ* – природний кут сколення

Друга стадія починається під час необоротного зсуву однієї частини листа щодо іншої (рис. 2.2, *б*). У цей момент утворюється гладка блискуча поверхня, згладжена силами тертя, направленими вздовж бічної поверхні ножів.

У міру стулення ножів ступінь деформації збільшується і, коли ресурс пластичності вичерпується, починається третя стадія відрізання — поява тріщин сколювання і руйнування металу, що завершується відділенням однієї частини листа від іншої (рис. 2.2, *в*). Руйнування металу (сколювання) випереджає проникнення робочих кромок ножа в лист, тому тріщини називають випереджаючими тріщинами сколювання.

Сколювання починається в момент проникнення ножа в лист на певну глибину *h*, залежну від фізико-механічних властивостей металу і його товщини. Глибина *h* встановлена експериментально і змінюється в межах від 0,2 до 0,8 товщини металу *s*, чим м'якший метал, тим *h* більша.

Розглянуті стадії відрізання характеризуються певним виглядом бічної поверхні відділеної частини металу (рис. 2.3).

Зона *1* являє собою округлену частину листа. Необоротне округлення відбулося в результаті охоплення шарів металу, які межують із поверхнею поділу (шириною, що дорівнює приблизно товщині шару металу), пластичною деформацією, яка зміню-

ється від нульового значення на зовнішній межі шару до максимуму на поверхні поділу, причому інтенсивність цієї зміни відбувається за степеневим законом.

Зона *2* — це блискуча поверхня, згладжена силами тертя. Зона *3* є поверхнею відколу, що утворюється в результаті виникнення й розвитку тріщин сколювання. Тріщини сколювання направлені під певним кутом θ до площини листа, так званим природним кутом сколювання, значення якого залежить від фізико-механічних властивостей металу. Цей кут складає 4—6°.

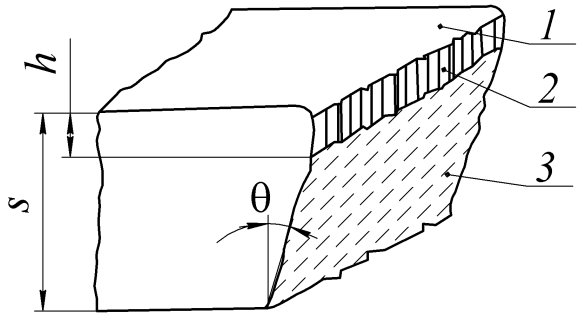


Рис. 2.3. Бічна поверхня відокремленої частини металу:
1, 2, 3 – характерні зони процесу розділення металу; *s* – товщина металу; *h* – глибина проникнення ножа в метал; θ – природний кут сколення

Залежно від зазору між ножами *z* і глибини проникнення ножа в товщу металу *h* до моменту початку руйнування тріщини сколювання, що йдуть від робочих кромок верхнього та нижнього ножів, можуть пройти паралельно (рис. 2.4, *а*) або назустріч одна одній (рис. 2.4, *б*). В останньому випадку зазор між ножами буде оптимальним, оскільки при цьому поверхня сколення виходить більш гладкою.

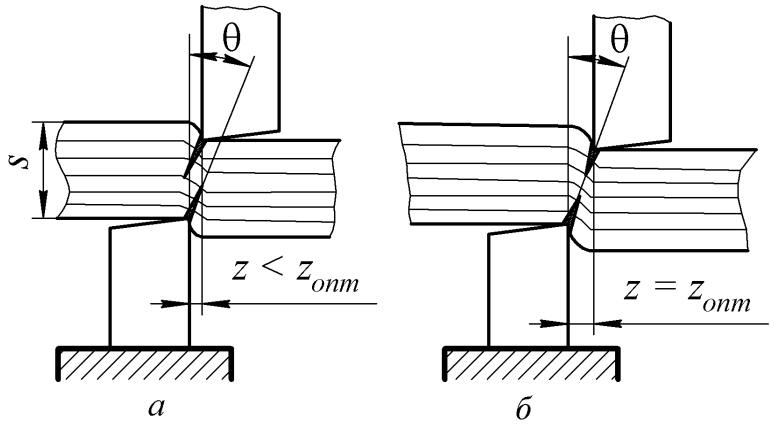


Рис. 2.4. Схема розташування тріщин сколення:
а – зазор між ножами менший за оптимальний; *б* – зазор між ножами оптимальний; *z* – зазор між ножами; *s* – товщина металу; θ – природний кут сколення

Оптимальний зазор може бути розрахований, якщо відомі значення *h* і θ:

$$z_{опт} = (s - h)\mathrm{tg}\theta. \qquad (2.1)$$

Аналіз формули (2.1) показує, що $z_{опт}$ збільшується зі збільшенням *h* (чим м'якший метал, тим величина $z_{опт}$ менша).

Відносна висота блискучого поясочка *h/s* залежить від матеріалу заготовки й швидкості деформації. Значення відношення *h/s* може бути обчислене за емпіричною залежністю, яка, наприклад, для сталі 08кп (межа міцності $\sigma_в$ = 300 МПа) має вигляд $h/s = 0{,}76 - 0{,}035s - 0{,}0014n$, де n – кількість ходів преса за 1 хвилину [5].

Практично оптимальний зазор $z_{опт}$ визначають за даними, одержаними на основі експериментів і виробничого досвіду. Для м'якої сталі оптимальний зазор змінюється залежно від товщини металу від 0,02 мм (при товщині металу 0,25 мм) до 0,82 мм (за товщини металу 12,5 мм). Орієнтовно можна вважати, що при товщині металу $s \le 4$ мм оптимальний зазор $z_{опт} = (0{,}03 \div 0{,}06)$ мм.

2.1.2. Відрізання на ножицях із зворотно-поступальним рухом ножів

За характером руху робочих органів ножиці для відрізання металу поділяються на ножиці зі зворотно-поступальним і обертальним рухом ножів.

До першої групи належать ножиці: кривошипні з похилим ножем (гільйотинні, вібраційні); сортові; з паралельними ножами.

Другу групу складають дискові ножиці з однією або кількома парами дисків-ножів.

Ножиці зі зворотно-поступальним рухом ножів випускаються з механічним і гідравлічним приводом. У заготівельних відділеннях пресових цехів для відрізання листового металопрокату завтовшки до 10—12 мм найбільш широко застосовують ножиці з механічним приводом (кривошипні з похилим ножем), а для товстолистового прокату завтовшки до 40 мм — із гідравлічним приводом і похилими ножами різної форми (рис. 2.5).

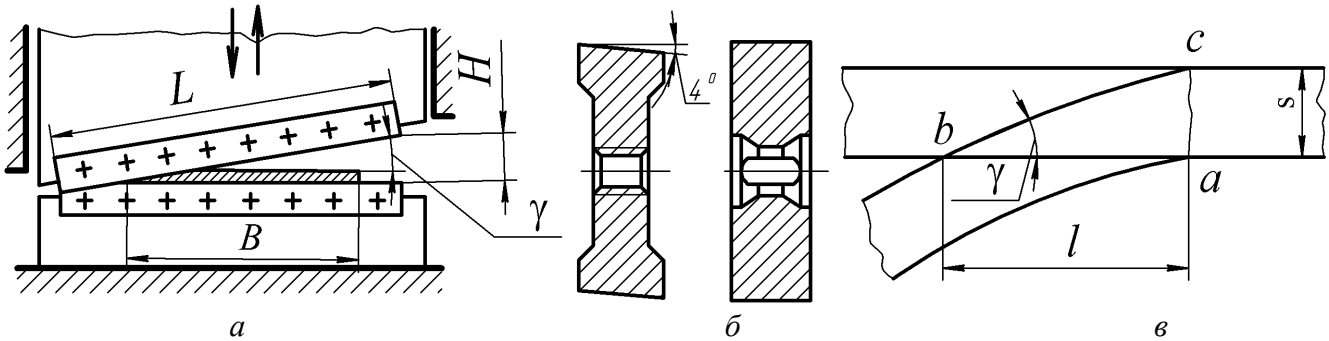


Рис. 2.5. Схематичне зображення кривошипних ножиць із похилим розташуванням ножів *(а)* і форми поперечного перерізу знімних ріжучих кромок ножиць *(б)*, схема до визначення зусилля відрізання на ножицях із похилими ножами *(в)*:

γ – кут нахилу верхнього ножа; *L* – ширина ножа; *B* – найбільша ширина відрізуваного матеріалу; *H* – хід ножа; *s* – товщина металу; *a, b, c* – точки в розрахунковій схемі; *l* – ширина різання

У разі похилого розташування верхнього ножа відрізання відбувається поступово, на окремій ділянці листа, тому одночасне зусилля відрізання в цьому випадку істотно менше, ніж за паралельного розташування ножів. Крім того, статичне прик-

ладення навантаження до робочих кромок ножів сприяє підвищенню їх стійкості.

Кут нахилу верхнього ножа γ повинен бути самогальмівним, тобто таким, при якому виключається можливість переміщення листа в горизонтальній площині в процесі відрізання. Залежно від товщини листа його беруть рівним 2 – 6° (чим товщий лист, тим кут γ більший). Для запобігання перекиданню листа під час відрізання в конструкції ножиць передбачена притискна балка (повзун) із приводом від головного вала.

Основні параметри ножиць — найбільша ширина *B* і товщина *s* відрізуваного матеріалу. Згідно з ГОСТ 6282—76 найбільша ширина *B* матеріалу, відрізуваного на ножицях із похилим розташуванням ножів, може досягати 4 000 мм при найбільшій товщині 40 мм за умови, що його тимчасовий опір $\sigma_в \le 500$ МПа. У тому випадку, коли $\sigma_в > 500$ МПа, найбільшу товщину відрізуваного листа (у міліметрах) можна визначити, використовуючи умову незмінності затрачуваного зусилля відрізання:

$$s_x = s\sqrt{\frac{500}{\sigma_в}}, \tag{2.2}$$

де s_x – найбільша товщина відрізуваного листа; s – товщина листа металу з межею міцності $\sigma_в \le 500$ МПа; $\sigma_в$ – межа міцності металу відрізуваного листа.

Зусилля відрізання на ножицях із похилим розташуванням ножів (у меганьютонах) обчислюється так:

$$P_p = \frac{s^2}{2\mathrm{tg}\gamma}\sigma_{зр}, \tag{2.3}$$

де P_p – зусилля відрізання на ножицях з похилим розташуванням ножів; s – товщина листа; γ – кут нахилу верхнього ножа; $\sigma_{зр}$ – межа міцності на зріз.

Ця формула одержана з умови, що в кожний момент відрізання площа $F = \frac{ls}{2}$, яка зрізається, приблизно дорівнює площі трикутника *абс* (рис. 2.5, *в*). Оскільки $l = \frac{s}{\mathrm{tg}\gamma}$, площа в кожний момент відрізання дорівнює $F = \frac{s^2}{2\mathrm{tg}\gamma}$. Якщо вважати, що зусилля відрізання P_p рівне добутку площі F та опору зрізу $\sigma_{зр}$, то в результаті одержимо формулу (2.3). З урахуванням притуплення робочих кромок ножів (коефіцієнт ω) зусилля відрізання буде таке:

$$P = \omega P_p, \tag{2.4}$$

де P – дійсне зусилля відрізання; ω = 1,11 ÷ 1,3 (більше значення ω відповідає більшому притупленню кромок ножів), а P_p визначається за формулою (2.3).

На опір зрізу $\sigma_{зр}$ (а отже, і на зусилля відрізання) впливають фізико-механічні характеристики відрізуваного матеріалу, величина зазору між ножами, швидкість деформації, умови тертя й ін. Зі збільшенням міцності та зменшенням пластичності матеріалу, а також із підвищенням швидкості деформації $\sigma_{зр}$ зростає, а зі збільшенням зазору між ножами — зменшується.

Опір зрізу визначається на основі узагальнення експериментальних даних за спеціальними таблицями, складеними для різних листових металів у нагартованому та відпаленому стані, а також для різноманітних неметалевих матеріалів (шаруваті і волоконні пластики, шкіра, картон та ін.) [2, 5]. Опір зрізу $\sigma_{зр}$ приблизно може бути визначений як функція тимчасового опору $\sigma_в$. Наприклад, для листів із вуглецевих сталей $\sigma_{зр} = (0{,}7 \div 0{,}8)\,\sigma_в$.

Під час відрізання на ножицях із похилим ножем може відбуватися згинання (закручування) стрічки навкруги своєї осі. Чим більший кут нахилу верхнього ножа і менше ширина B, тим вигин більший. У зв'язку з цим стрічки, ширина яких менша 50 – 60 мм, відрізувати на ножицях із похилим ножем недоцільно. Якщо потрібно одержати таку стрічку, відрізання виконують на ножицях із паралельним розташуванням ножів ($\gamma = 0$). Для цього випадку зусилля відрізання буде становити

$$P = \omega B s \sigma_{зр}. \qquad (2.5)$$

У процесі розрізання на ножицях із похилим ножем поперечна сила P на стабільній фазі процесу змінюється незначно (рис. 2.6, крива *а*). Тому формулу для визначення роботи деформації A (у кілоджоулях) під час розрізання можна подати в такому вигляді:

$$A = \frac{PH}{1000}, \qquad (2.6)$$

де A – робота деформації; P – зусилля відрізання; H – хід ножа.

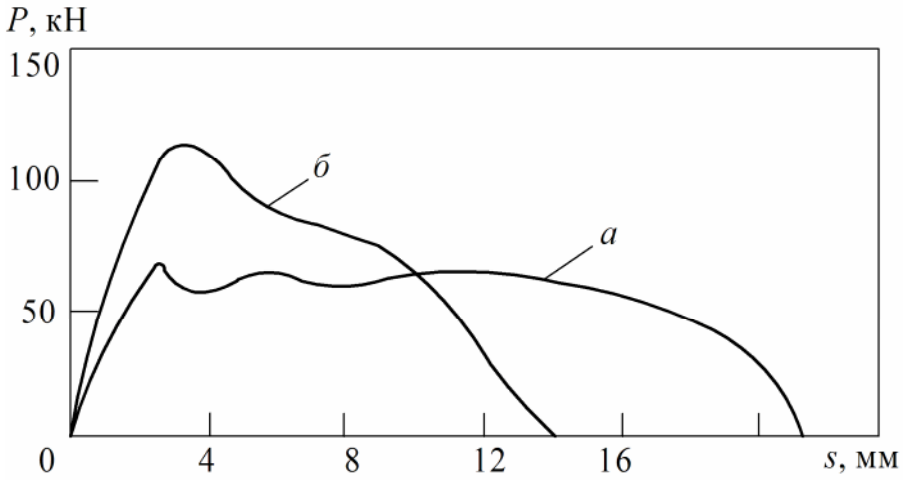


Рис.2.6. Графік зміни робочого навантаження в разі відрізання на ножицях: *а* – розрізання на ножицях із похилими ножами; *б* – розрізання на ножицях із паралельними ножами

Оскільки згідно з рис. 2.5, *а* $H = L\mathrm{tg}\gamma$, формула (2.6) набуде вигляду

$$A = \frac{PL\mathrm{tg}\gamma}{1000}. \qquad (2.7)$$

Під час розрізання на ножицях із паралельними ножами зусилля P інтенсивно зростає й досягає максимуму, після чого зменшується (рис. 2.6, крива *б*).

У разі розрізання однакових листів робота деформації, що характеризується площею діаграм *а* і *б* (кривими робочого навантаження), приблизно однакова, проте у випадку *а* зусилля розрізання менше, ніж у випадку *б*. Через це потужність приводу ножиць із похилим ножем менша, ніж ножиць із паралельними ножами. Практично встановлено, що у зв'язку з вигинанням листів під час розрізання на ножицях із похилим ножем затрачувана робота деформації на 10—15 % більша, ніж у випадку розрізання на ножицях з паралельними ножами.

У разі розрізання на ножицях із похилим ножем потрібну ширину стрічок і штучних заготовок, а також паралельність їх сторін забезпечують упорами, встановленими на станині ножиць і регульованими спеціальним пристроєм.

Робота деформації може бути також обчислена як площа, обмежена кривою робочого навантаження, або як добуток коефіцієнта заповнення кривої робочого навантаження $\lambda = \frac{P_{p\,cep}}{P_{max}}$ (де $P_{p\,cep}$, P_{max} – відповідно середнє і максимальне значення зусилля різання згідно з кривою робочого навантаження), максимального значення зусилля різання та ходу ножа (товщини заготовки):

$$A = \lambda P_{max} s . \qquad (2.8)$$

Згідно з експериментальними даними, при s < 2 мм λ = 0,55 ÷0,75; при s = 2 ÷ 4 мм λ = 0,55 ÷ 0,45 і при s > 4 мм λ = 0,46 ÷ 0,30. Більше значення коефіцієнта λ беруть для найтонших, м'яких матеріалів, менше — для твердих і більш товстих металів.

Поперечні перерізи чотирибічних ножів показані на рис. 2.5, *б*. Ніж із переднім кутом α = 4° застосовується для відрізання листового металу завтовшки менше 4 мм, із кутом α = 0° — для відрізання товстолистового металу. При довжині, більшій 600 мм, їх роблять складеними для полегшення термічної обробки й уможливлення заміни окремих секцій ножа.

Різновидом ножиць із похилим ножем є вібраційні ножиці. У цих ножиць нижній ніж нерухомо закріплений на станині, а верхній здійснює зворотно-поступальний (вібруючий) рух, передаваний йому від спеціального кулачкового механізму, що робить 1 200 – 2 500 ходів за хвилину (рис. 2.7).

Вібраційні ножиці застосовують головним чином для вирізки криволінійних контурів (зовнішніх і внутрішніх) із радіусами округлення, не меншими 12 – 15 мм. Товщина металу, що ріжеться, звичайно не перевищує 3 мм, точність розмірів вирізаних заготовок (або деталей) відповідає 16-му квалітету. Кут стулення ножів вібраційних ножиць складає 24 – 30° (більше самогальмівного), унаслідок чого лист подається до ножів примусово. Хід ножиць змінюється в межах 2 – 4 мм.

Особливість настройки вібраційних ножиць полягає в тому, що перекриття ножів відсутнє, а зазор між ножами більший оптимального (0,2 – 0,25 товщини металу). Це забезпечує можливість повороту заготовки щодо робочих кромок ножів у процесі вирізання криволінійних контурів.

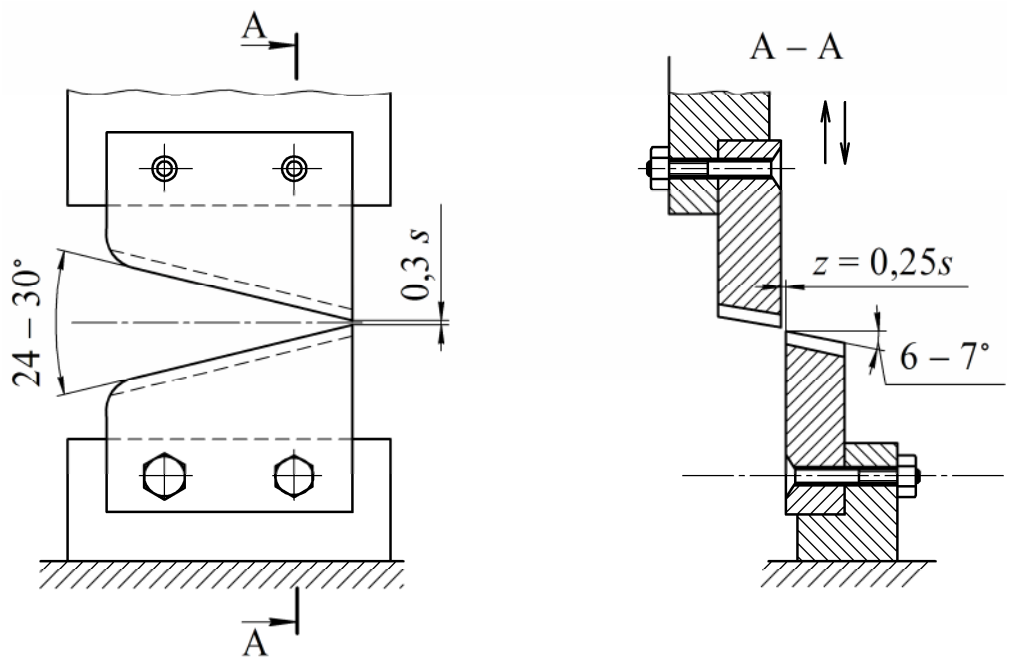


Рис.2.7. Схема вібраційних ножиць

До недоліків вібраційних ножиць порівняно з ножицями гільйотинними слід віднести швидке зношування ножів, а також утворення задирок і зарубів по контуру вирізаної заготовки. Звичайно заготовки після вирізання набирають у пачки і додатково фрезерують по контуру. Вібраційні ножиці застосовуються тільки в дрібносерійному виробництві через низьку продуктивність.

Ножі розглянутих ножиць для відрізання низьковуглецевого прокату рекомендується виготовляти з інструментальної сталі У8А і У10А, для відрізання прокату підвищеної міцності — зі сталі Х12М або її замінників. Твердість ножів після термічної обробки повинна бути HRC = 58÷60.

2.1.3. Відрізання на ножицях з обертальним рухом ножів

Відрізання на ножицях з обертальним рухом ножів, або дискових ножицях, здійснюють двома ножами однакового діаметра, які обертаються в різних напрямах з однією коловою швидкістю. Ножі встановлюють із перекриттям робочих кромок на величину $d = (0{,}2 \div 0{,}4)s$ (рис. 2.8, *а*).

Особливість умов відрізання на дискових ножицях полягає в тому, що при певному діаметрі ножа ножиці не тільки відрізують метал, але й захоплюють і тягнуть його. Таким чином, довжина відрізуваних стрічок у принципі не обмежена. Головний параметр, що характеризує дискові ножиці, — найбільша товщина відрізуваного листа, вона досягає 25 мм за умови, що $\sigma_в \le 500$ МПа.

Розглянемо умову захоплення листа дисковими ножицями. У точках контакту з ножами на лист діють сила нормального тиску N і сила тертя T (рис. 2.8, *а*). Ножі захоплюють лист у тому випадку, якщо задовольняється нерівність

$$2T\cos\alpha > 2N\cos\beta\,. \qquad (2.9)$$

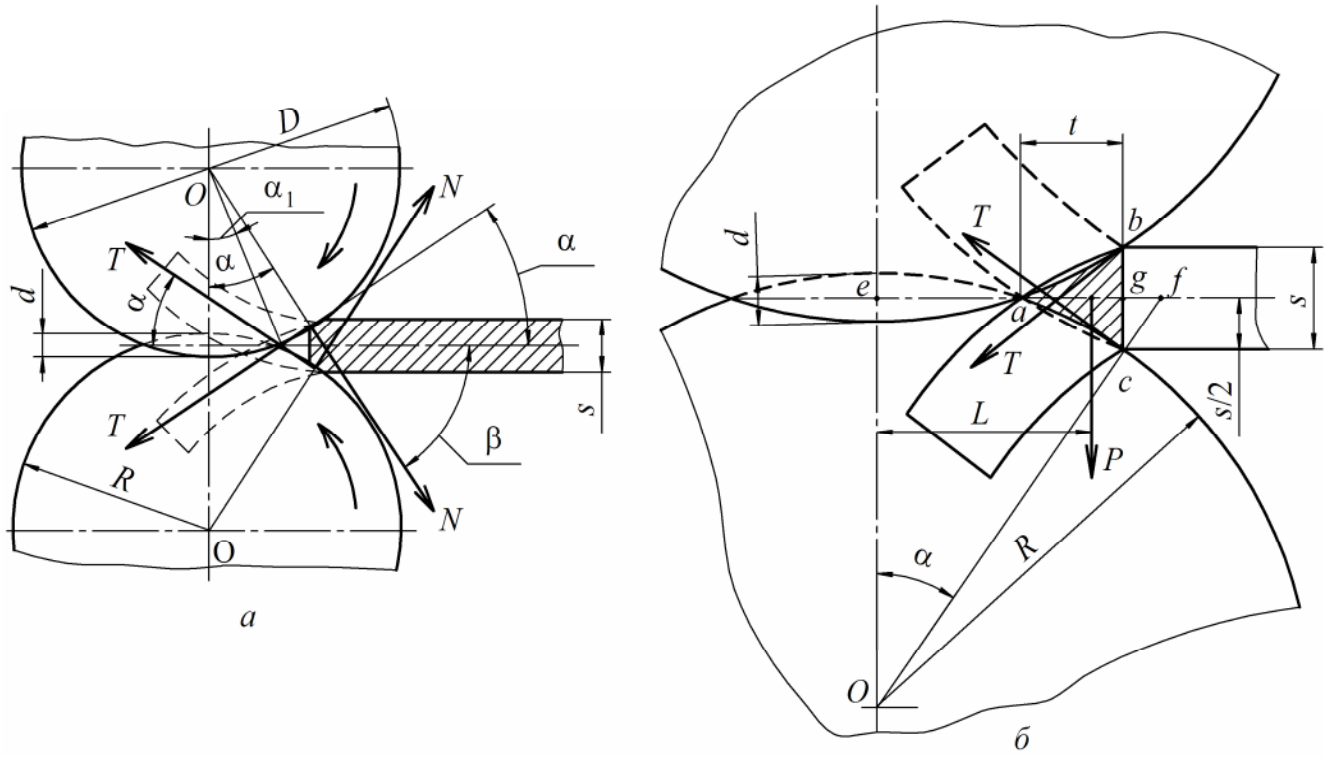


Рис.2.8. Схема дії сил під час відрізання на дискових ножицях (*а*) і осередок пластичної деформації (*б*):

d – перекриття робочих кромок; *D* і *R* – діаметр і радіус ножів відповідно; *T* – сили тертя; *N* – сили нормального тиску; α – кут нахилу дотичної до контуру ножа в точці контакту його з листом (кут захоплення); α_1 – кут нахилу дотичної до контуру ножа в точці початку перекриття робочих кромок; β – кут нахилу перпендикуляра до контуру ножа в точці контакту його з листом; *s* – товщина листа; *P* – сила різання; *L* – плече дії сили різання *P*

Узявши до уваги, що згідно з рис. 2.8 $\beta = 90° - \alpha$ і відповідно до закону Кулона $T = \mu N$ (μ – коефіцієнт контактного тертя), одержимо

$$2\mu N\cos\alpha > 2N\sin\alpha,$$

звідки

$$\mu \geq \operatorname{tg}\alpha. \qquad (2.10)$$

Таким чином, для захоплення листа ножами на початковій стадії відрізання необхідно, щоб тангенс кута нахилу дотичної до контуру ножа в точці контакту його з листом дорівнював або був менший коефіцієнта тертя. Умова захоплення на сталій стадії відрізання може бути записана у вигляді

$$\mu \geq \operatorname{tg}\alpha_{сер},$$

де $\alpha_{сер} = \dfrac{\alpha + \alpha_1}{2}$ (рис. 2.8, *а*), тоді

$$\mu \geq \operatorname{tg}\frac{\alpha + \alpha_1}{2}. \qquad (2.11)$$

У зв'язку з малими значеннями кутів без великої похибки можна взяти

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha+\alpha_1}{2} \approx \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} + \operatorname{tg}\frac{\alpha_1}{2} \approx \sin\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\alpha_1}{2}.$$

При цьому умова захоплення (2.11) набуде вигляду

$$\mu \geq \sin\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\alpha_1}{2}. \qquad (2.12)$$

Застосуємо геометричні залежності й одержимо

$$R(1-\cos\alpha) = \frac{d}{2} + \frac{s}{2}; \qquad R(1-\cos\alpha_1) = \frac{d}{2},$$

зробивши тригонометричні перетворення, можемо записати

$$2\sin^2\frac{\alpha}{2} = \frac{d+s}{2}; \qquad 2\sin^2\frac{\alpha_1}{2} = \frac{\sqrt{d}}{2\sqrt{d}},$$

звідки

$$\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{s+d}}{2\sqrt{R}}; \qquad \sin\frac{\alpha_1}{2} = \frac{\sqrt{d}}{2\sqrt{R}}.$$

Підставивши значення $\sin\frac{\alpha}{2}$ і $\sin\frac{\alpha_1}{2}$ у формулу (2.12), одержимо умову захоплення для сталої стадії відрізання у функції параметрів s, d, R:

$$\mu \geq \frac{\sqrt{d+s}+\sqrt{d}}{2\sqrt{R}}. \qquad (2.13)$$

Із формули (2.13) можна визначити мінімальний діаметр ножа, що забезпечує захоплення листа під час відрізання:

$$2R = D_{min} \geq \frac{d + \sqrt{(d+s)d} + 0{,}5s}{\mu^2} \qquad (2.14)$$

Він буде тим більший, чим більші товщина листа s і перекриття ножів d, а також чим менші сили тертя на контактній поверхні ножів та листа. Якщо значення перекриття ножів d змінюється в межах $(0{,}2 \div 0{,}4)s$, то згідно з формулою (2.14) діаметр ножа, що забезпечує захоплення, складатиме

$$D \geq (1{,}0 \div 1{,}2)\frac{s}{\mu^2}. \qquad (2.15)$$

Розрахунки за формулою (2.15) показують, що за коефіцієнта тертя $\mu = 0{,}15$ захоплення листа відбуватиметься при $D \geq (45 \div 55)s$, а за $\mu = 0{,}15$ — при $D \geq (25 \div 30)s$.

Практично встановлено, що діаметр ножів, який забезпечує захоплення, повинен бути не меншим $(35 \div 50)s$ у випадку відрізання товстолистової сталі (завтовшки більше 4 мм) і не меншим $(25 \div 30)s$ при відрізанні тонколистової сталі, при цьому кут захоплення α не повинен перевищувати 14°.

Залежно від форми робочих кромок ножів і їх взаємного розташування на дискових ножицях можна відрізувати стрічки з прямолінійними кромками необмеженої довжини, а також вирізати круги та різні контури за розміткою або шаб-

лоном. Ножиці з паралельним горизонтальним розташуванням осей дискових ножів виконуються з однією або декількома парами робочих інструментів. Основне призначення цих ножиць — розрізання листового металу на стрічки. Конструктивне виконання ножів дискових ножиць може бути двох варіантів: з кутом різання δ, меншим 90°, і таким, що дорівнює 90° (рис. 2.9).

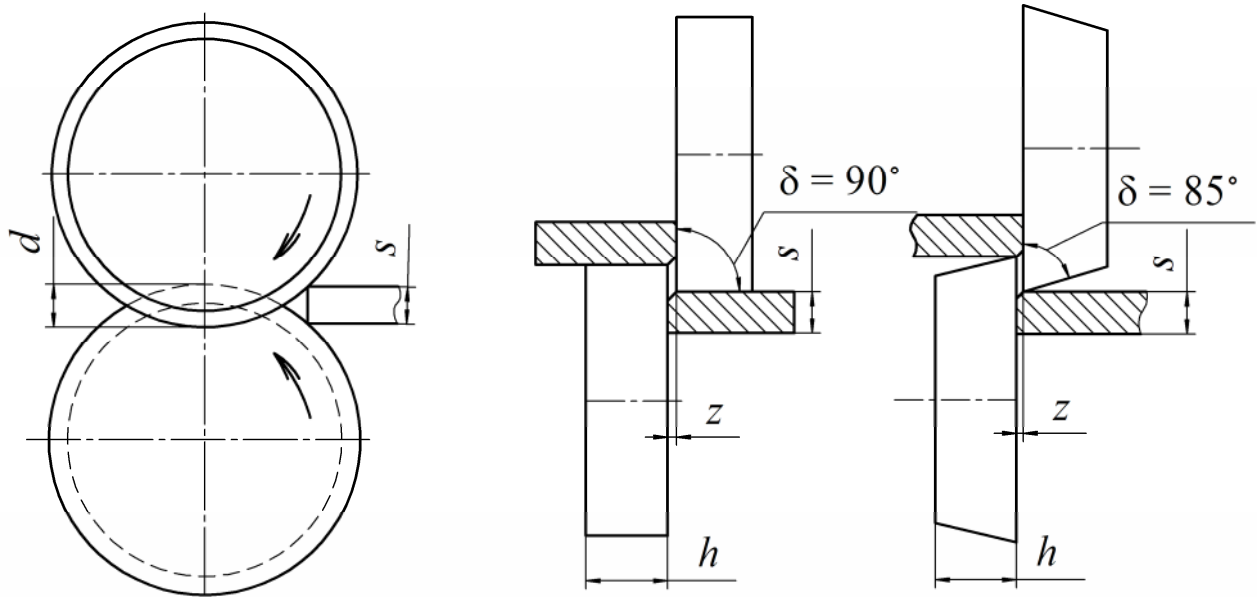


Рис. 2.9. Конструктивне виконання ножів дискових ножиць

Дискові ножиці з ножами, виконаними за першим варіантом, застосовуються в основному для розрізання тонколистового металу й мають тільки одну пару ножів (однопарні). Кут різання ножів δ звичайно складає 85°, перекриття ножів $d = (0{,}2 \div 0{,}6)s$ і зазор між ножами $z = (0{,}06 \div 0{,}07)s$.

Дискові ножиці з ножами, виконаними за другим варіантом, можуть бути як дводискові, так і багатодискові (або багатопарні). На багатодискових ножицях одночасно можна розрізати лист на декілька стрічок однакової чи різної ширини (рис. 2.10). Багатодискові ножиці застосовують у масовому і багатосерійному виробництві для розрізання листів і рулонів шириною до 1 600 мм і завтовшки до 3 мм. Сумарна ширина відрізуваних смуг повинна бути на 5 – 6 % меншою ширини листа. Це необхідне для видалення нерівної кромки листа. Для забезпечення точності розмірів відрізуваних смуг по ширині між ножами встановлюють розпірні втулки *1*, а для запобігання згинанню відрізаних смуг на втулки надягають гумові кільця *2* (рис. 2.10).

Випускають різні моделі дискових ножиць, у тому числі модель Н4110 для одночасного відрізання 12 стрічок завтовшки до 1 мм з автоматичним завантаженням листів і укладанням нарізаних стрічок. Ці ножиці обслуговує один робітник, продуктивність ножиць — до 300 листів за годину, колова швидкість обертання ножів — до 30 м/хв.

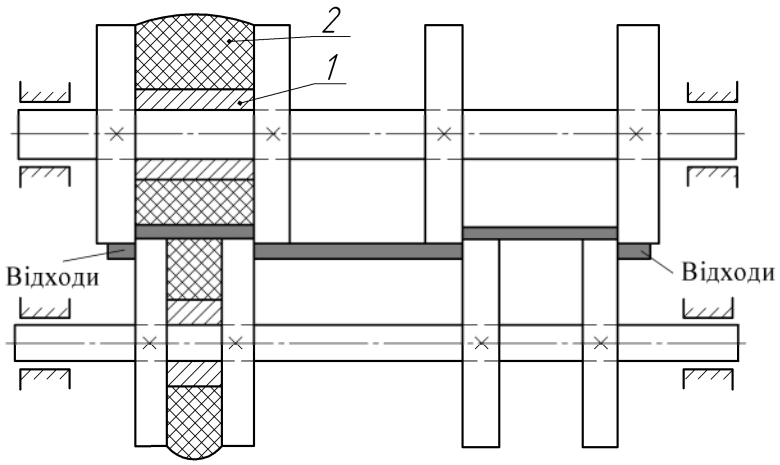


Рис. 2.10 Схема відрізання стрічок різної ширини на багатодискових ножицях

Подовжнє відрізання широкорулонного тонколистового прокату на дискових ножицях дозволяє розширити сферу застосування механізації й автоматизації в листоштампувальному виробництві, скоротити витрату металу, звільнити велику кількість пресового устаткування, знизити трудомісткість. Так, у виробництві легкових автомобілів обсяг споживання широкорулонної сталі перевищує 30 % від загального обсягу витрати листового прокату.

Розрізання широкорулонного прокату на стрічки проводять на спеціалізованих автоматичних лініях (рис. 2.11), що застосовуються на багатьох підприємствах машинобудування.

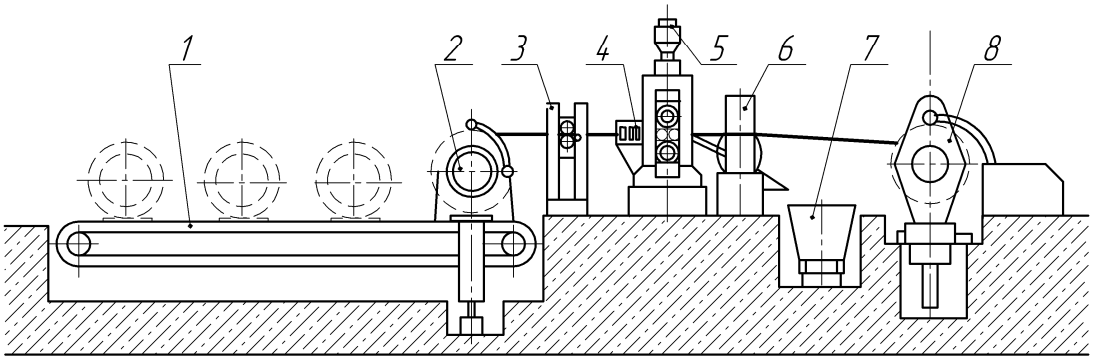


Рис. 2.11. Схематичне зображення автоматичної лінії для подовжнього відрізання:
1 – ланцюговий конвеєр; *2* – розмотувальний пристрій; *3* – подавальний пристрій;
4 – правильний механізм; *5* – дискові ножиці; *6* – кромкозачищувач; *7* – бункер для стружки;
8 – намотувальний пристрій

Для вирізання кругів і криволінійних контурів за розміткою або шаблоном застосовують однопарні дискові ножиці з похило розташованими ножами. Ножиці з одним похилим ножем використовують для вирізання заготовок із відносно великим радіусом округлення контуру і малою товщиною листа. Кут нахилу нижнього ножа φ складає 30 ÷ 40°, а кут різання δ — 85 ÷ 87° (рис. 2.12, *а*). Дискові ножиці з двома похилими ножами застосовують для вирізання контурів, обмежених кривими лініями з відносно невеликим радіусом округлення (рис. 2.12, *б*).

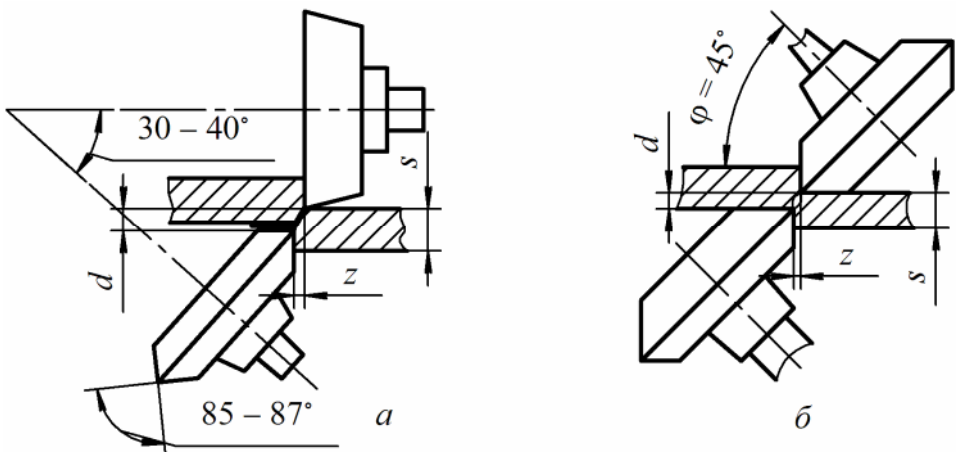


Рис. 2.12. Схема установки дискових ножів:
а – з похилим нижнім ножем; *б* – з обома похилими ножами

Особливість настройки дискових ножиць із похило розташованими ножами полягає в тому, що перекриття ножів відсутнє, відстань між кромками ножів по вертикалі $d = 0{,}25s$ і зазор між ножами більший оптимального $z = (0{,}2 \div 0{,}25)s$. Це дозволяє легко повертати лист відносно робочих кромок ножів у процесі відрізання.

При куті нахилу ножа φ = 45° мінімальний радіус округлення контуру $R_{min} = 0{,}7D$ (D – діаметр ножа). Значення мінімального радіуса округлення контуру заготовки R_{min} залежить не тільки від діаметра ножа D і кута його нахилу φ. Практично встановлено, що R_{min} залежить також від товщини заготовки: у разі зменшення товщини R_{min} зменшується.

Залежно від товщини заготовки, що розрізається, використовують дискові ножі діаметром 50 – 300 мм і товщиною 20 – 90 мм. Їх виготовляють з інструментальної сталі марки У8А або її замінників. Твердість HRC ножів після термічної обробки повинна бути рівною 48÷52 одиниць. Робочі поверхні дискових ножів шліфують, мінімальна допустима непаралельність цих площин не повинна перевищувати 0,02 мм на 300 мм діаметра ножа.

На дискових ножицях обрізають нерівний край витягнутих деталей або напівфабрикатів, який утворюється внаслідок анізотропії механічних властивостей листового матеріалу плоскої круглої заготовки. При товщині металу 0,3 – 0,7мм і порівняно невеликих діаметрах деталей (до 300 – 400 мм) нерівний край-фланець обрізається дисковими ножицями, встановленими на спеціальному обрізному верстаті. Залежно від форми напівфабрикатів ножі під час обрізання можуть розташовуватися по-різному (рис. 2.13).

Оптимальний зазор між ножами складає 0,25 – 0,5 товщини металу, діаметр ножів — 70 – 120 мм, а частота обертання шпинделя верстата досягає 500 обертів за хвилину. У масовому виробництві застосовують спеціалізовані автомати й напівавтомати для обрізання дисковими ножами і загортання роликами борту напівфабрикатів.

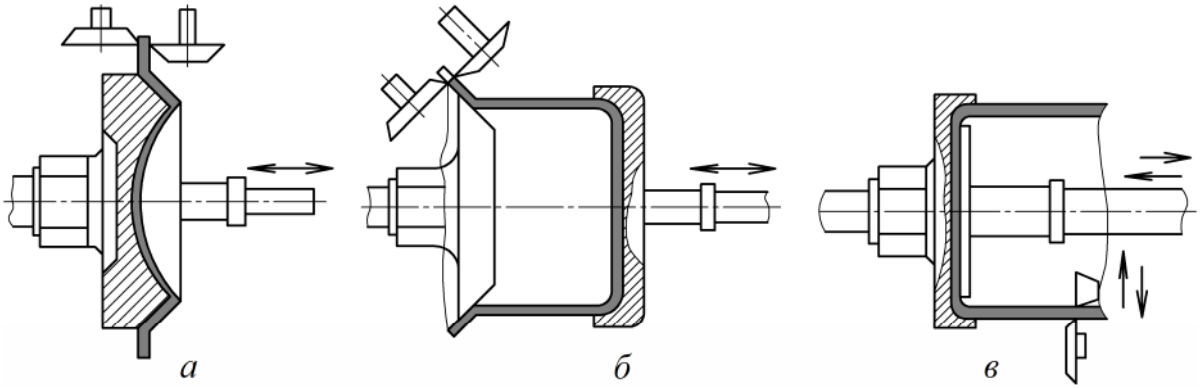


Рис. 2.13. Схеми розташування ножів під час обрізання напівфабрикатів різної форми:
а – обрізання у вертикальному положенні; *б* – у довільному положенні;
в – у горизонтальному положенні

2.1.4. Розрізання труб і профілів у штампах

У штампах виконують розрізання труб діаметром до 60 – 80 мм із товщиною стінки до 4 – 5 мм. При діаметрі труби, більшому 60 – 80 мм, і товщині стінки, більшій 4 – 5 мм, розрізання труб на заготовки в штампі недоцільне внаслідок швидкого притуплення робочих кромок ножа і частих його поломок. Розрізання труб великого діаметра здійснюють пилами, алмазно-абразивними кругами, клиновими дисковими ножами й ін. Схема штампа для розрізання труб показана на рис. 2.14, *а*.

Розрізання проводять одночасно по двох площинах, тобто з відходом. Трубу подають у штамп крізь отвір у напівматрицях діаметром *D* на необхідну довжину *l* до упора *1*. Під час опускання верхньої частини блока штампа спочатку затискають заготовку за допомогою клина *4* між рухомою *5* і нерухомою *2* напівматрицями аж до незначної пластичної деформації труби (щоб запобігти можливій зміні її перерізу під час розрізання), після чого розрізають трубу плоским списоподібним ножем. Ніж *3*, стикаючись із трубою, своєю вершиною проколює її, після чого процес розрізання йде більш плавно. Труба розрізається ріжучими кромками напівматриць *2* і *5* і кромками ножа *3*. Товщину ножа *3* беруть такою, що дорівнює товщині стінки труби, а кут при вершині ножа – таким, що дорівнює 60°.

Основний недолік розглянутого штампа – низька стійкість ножа і якість поверхні зрізу, спотворення форми поперечного перерізу труби, що розрізається. Під час опускання списоподібного ножа спочатку відбувається місцеве пружне, а потім — пластичне згинання стінки труби у зв'язку з втратою стійкості і лише після цього — прокол. У результаті цього утворюється вм'ятина на ділянці труби, що безпосередньо примикає до зони відрізання, відхід згортається всередину труби аж до зіткнення зі стінкою недеформованої її частини (рис. 2.14, *б*). Потім трубу відрізують уже не ножем, а відходом, що передає тиск ножа. На заключному етапі відрізання зусилля зростає, поверхня поділу стає «рваною», з'являються задирки.

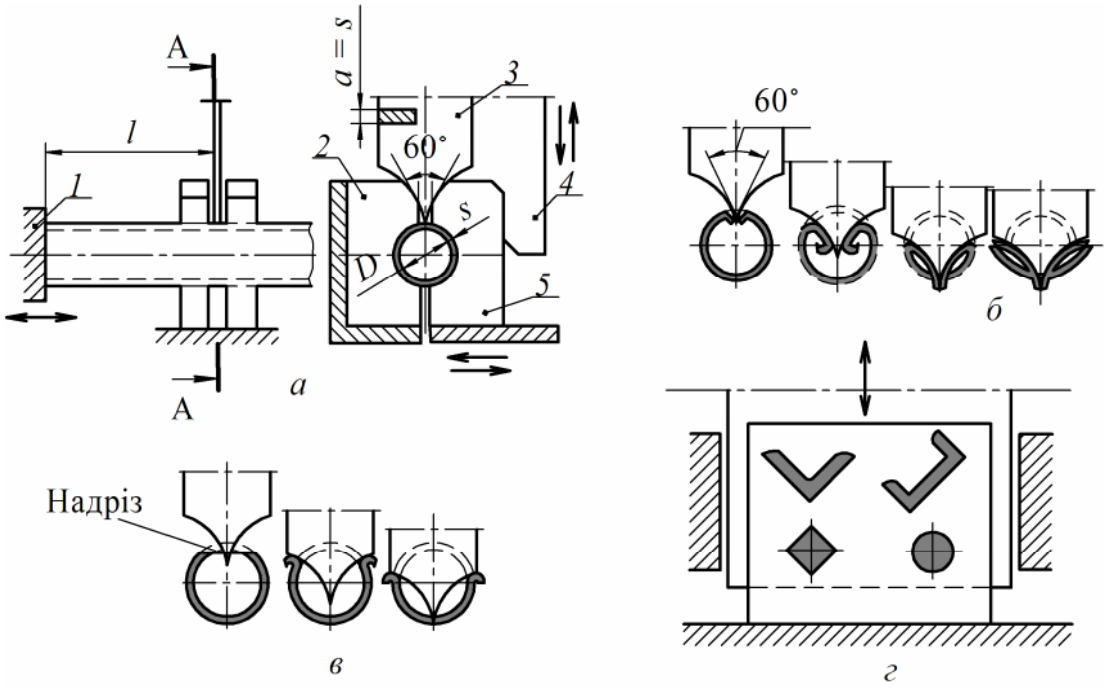


Рис. 2.14. Схематичне зображення штампа для розрізання труби (*а*), стадій розрізання труби списоподібним ножем без попереднього надрізання (*б*), після попереднього надрізання (*в*) і форм ножів сортових ножиць (*г*)

Існують штампи для відрізання труб, у яких поєднані два переходи, виконувані послідовно: надрізання стінки труби на глибину, яка дорівнює подвійній її товщині, зубчастим (пилкоподібним) тонким пуансоном, що переміщається перпендикулярно до твірної труби, та подальше відрізання труби списоподібним ножем у місці зробленого надрізу. Попереднє надрізання стінки труби дозволяє відходу металу згортатися не всередину труби, а назовні (рис. 2.14, *в*). У зв'язку з цим не відбувається спотворення форми поперечного перерізу труби, поверхня зрізу стає значно чистішою, а стійкість інструмента — вищою.

Для відрізання сортового металопрокату (кутик, швелер, тавр) і профілів більш складного перерізу використовують штампи та спеціальні сортові ножиці (робочі органи — ножі з отворами, форма й розміри яких відповідають поперечним перерізам відрізуваних заготовок. Один із ножів закріплений на станині ножиць, а другий разом із повзуном виконує зворотно-поступальний рух. Для зниження зусилля відрізання і зменшення спотворень форми поперечного перерізу ножі розташовуються в штампах і сортових ножицях так, щоб кут між полицею відрізуваної заготовки і напрямом руху ножа складав 45° (рис. 2.14, *г*). При менших кутах унаслідок збільшення горизонтальної складової зусилля відрізання відбувається зминання полиці відрізуваної заготовки, і вона втрачає свій вихідний переріз.

2.2. Вирубка й пробивання

2.2.1. Вплив зазору на величину і знак пружних деформацій під час вирубки й пробивання

Вирубкою і пробиванням отворів одержують плоскі деталі з листа, а також заготовки, що використовуються для виготовлення просторових деталей гнуттям, витяжкою, відбортовкою та ін.

Вирубку й пробивання виконують у штампах, робочі органи яких (пуансон *1* і матриця *3*) встановлені з певним зазором *z* (рис. 2.15).

Лист або стрічку встановлюють на матрицю *3*, яка має гострі кромки. Пуансон *1*, опускаючись разом із верхньою частиною штампа, натискає на лист. При цьому, як і в разі відрізання і розрізання, відбувається відносний зсув металу в матрицю, який закінчується руйнуванням, тобто вирубкою або пробиванням. Відділена частина металу провалюється в отвір у матриці, а відхід під час руху пуансона вгору знімається з нього знімачем *2*.

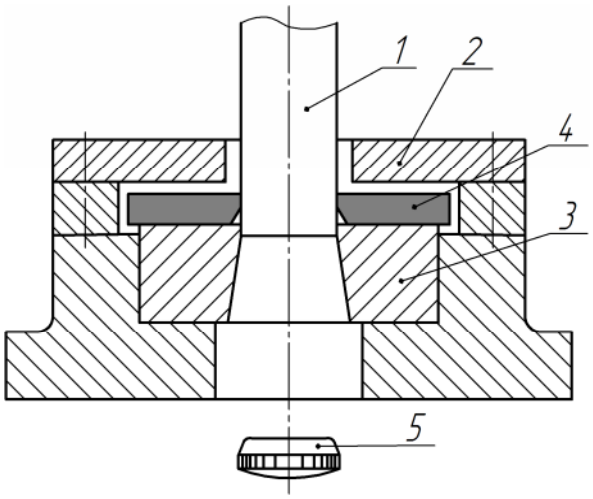


Рис. 2.15. Схема штампа для вирубки та пробивання:
1 – пуансон; *2* – знімач відходу; *3* – матриця; *4* – листова заготовка; *5* – деталь

У процесі вирубки і пробивання осередок пластичної деформації охоплює всю товщу листа, примикає до робочих кромок пуансона й матриці (його контур показаний пунктирними лініями на рис. 2.16). Напруження, що виникають під час вирубки і пробивання, розподілені по осередку деформації нерівномірно, що, у свою чергу, викликає нерівномірний розподіл деформацій у шарах металу, паралельних площині заготовки, і по її товщині. Напружений і деформований стан у ході вирубки та пробивання є об'ємний.

Найбільша деформація ε_ρ в радіальному напрямі виникає поблизу робочих кромок пуансона й матриці, а найменша — посередині відстані між цими кромками. Епюра розподілу радіальних деформацій по товщині заготовки показана на рис. 2.16.

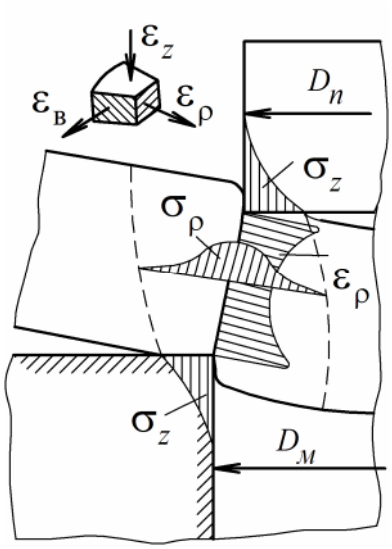


Рис. 2.16. Епюри напружень і деформацій по осередку деформації під час вирубки і пробивання:
$D_п$ – діаметр пуансона; $D_м$ – діаметр матриці;
σ_ρ, σ_z – радіальні і нормальні напруження відповідно; ε_ρ, ε_z, $\varepsilon_в$ – радіальні, нормальні і тангенціальні деформації

Нерівномірність розподілу деформацій і напружень пояснюється дією згинаючих моментів, що виникають під час вирубки і пробивання через наявність зазору між пуансоном і матрицею. Значення цих моментів дорівнює добутку рівнодійних елементарних сил, прикладених до контактної поверхні заготовки з пуансоном і матрицею, на плече, дещо більше, ніж зазор між ними.

При певному згинаючому моменті відокремлювана частина металу злегка згинається й набуває опуклої форми. Вигин заготовки, поворот її перерізів у просторі викликає відхилення центральної її частини від торця пуансона, що, у свою чергу, приводить до нерівномірного розподілу нормальних напружень σ_z на контактній поверхні (рис. 2.16).

Нерівномірність розподілу нормальних напружень σ_z зумовлює нерівномірний розподіл радіальних напружень σ_ρ по товщині заготовки і в шарах металу, паралельних її площині. Для зменшення спотворення форми заготовки під час вирубки скорочують згинаючий момент, зменшуючи зазор між пуансоном і матрицею.

Найбільша деформація в радіальному напрямі виникає поблизу робочих кромок пуансона й матриці, тому саме там зароджуються мікро-, а згодом і макротріщини, які швидко ростуть у товщу металу. Коли тріщини з’єднуються, процес розділення металу закінчується. Злиття (збіг) тріщин сколювання відбувається, як і під час відрізання, при оптимальному зазорі $z_{опт}$ (рис. 2.17, *а*).

При зазорі $z > z_{опт}$ тріщини сколення з'єднуються в серединних шарах листового матеріалу. Зі збільшенням зазору подовжується згинаючий момент, що викликає збільшення розтяжних напружень у зоні деформації, у зв'язку з чим тріщини сколювання виходять на вільні поверхні листа на деякому віддаленні від ріжучих кромок інструмента й утворюють задирки.

При зазорі $z < z_{опт}$ тріщини сколення не збігаються, при цьому утворюються два (або декілька) блискучі пояски, розділені між собою зонами сколювання (рис 2.17, *б*).

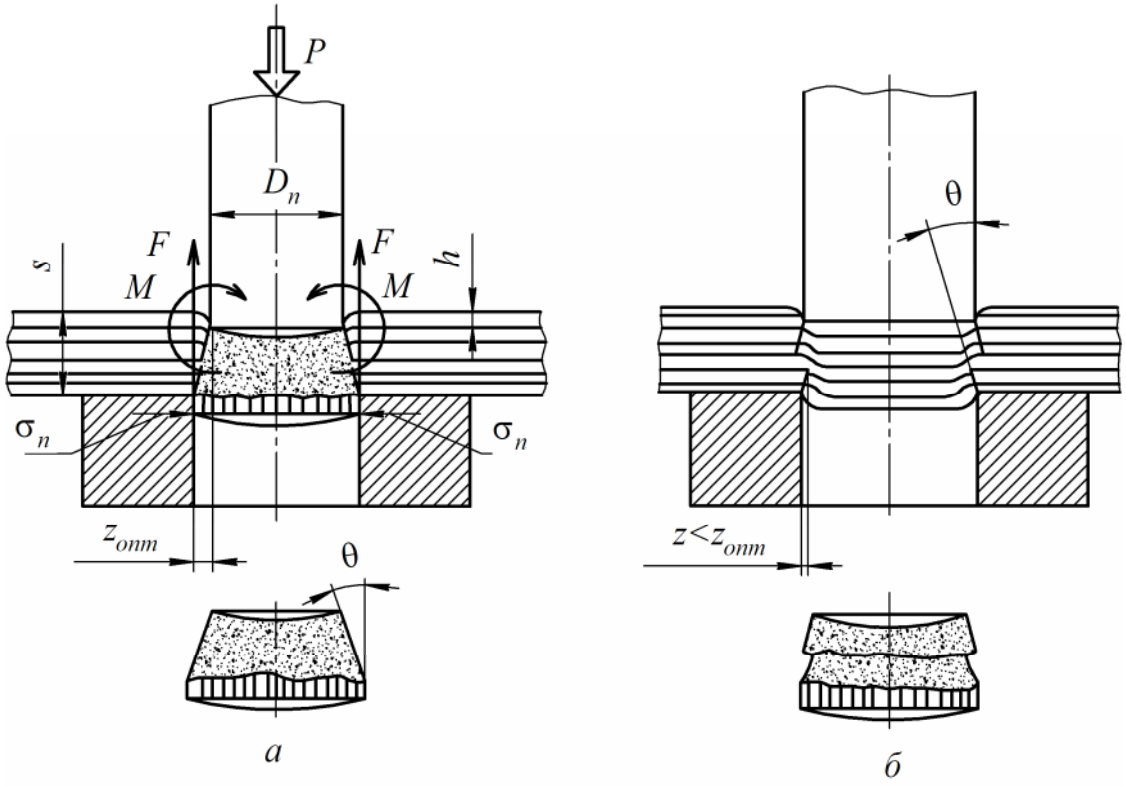


Рис. 2.17. Розташування тріщин сколювання залежно від зазору під час вирубки і пробивання: D_n – діаметр пуансона; P – зусилля вирубки; M – згинальний момент; s – товщина листа; h – глибина проникнення пуансона в метал у момент появи тріщини сколення; σ_n – контактні напруження, які зумовлюють виникнення сил тертя; F – сили тертя; z – зазор між пуансоном і матрицею; θ – природний кут сколення

Оптимальний зазор під час вирубки і пробивання залежить від товщини заготовки і її механічних властивостей, він визначається за спеціальними таблицями, складеними в результаті узагальнення практичних даних [5]. При товщині металу 0,3 – 20,0 мм оптимальний зазор змінюється від 5 до 12 % від товщини листа s (менші значення відносять до меншої товщини, великі — до більшої). Існує більш диференційований підхід до встановлення значення $z_{опт}$ з урахуванням необхідної шорсткості поверхні поділу, технологічного зусилля і стійкості інструмента [2].

Під час штампування особливо тонкого металу (завтовшки менше 0,3 мм) використовують штампи без спеціально передбаченого зазору між пуансоном і матрицею. У даному випадку контур сирого незагартованого пуансона одержують шляхом протягання останнього через термічно оброблену матрицю, виготовлену за спеціальним шаблоном.

У разі високошвидкісної вирубки або пробивання (за кількості подвійних ходів преса, більшої 120 на 1 хв) через розширення інструмента внаслідок нагрівання призначають зазори між пуансоном і матрицею, збільшені в 1,5 – 2 рази порівняно зі звичайним.

У випадку збільшення зазору під час вирубки та пробивання до 15 – 20 %

порівняно з оптимальним стійкість інструмента істотно підвищується, але при цьому якість бічної поверхні відокремлюваної деталі стає гіршою. Зазор між пуансоном і матрицею впливає на знак і величину пружних деформацій вирубаної деталі (або пробитого отвору). Зі збільшенням зазору зростає згинаючий момент, у зв'язку з чим збільшуються розтяжні напруження, а отже, і деформації розтягу в радіальному напрямі.

Після розвантаження в зонах округлення вирубаної деталі й відходу виникають пружні деформації стиску ε_ρ, через що діаметр деталі стає меншим діаметра матриці, а діаметр отвору — більшим діаметра пуансона. При цьому деталь легко провалюється крізь матрицю, а відхід легко знімається з пуансона.

Зі зменшенням зазору (порівняно з оптимальним) згинаючий момент зменшується і стає настільки незначним, що розтяжні напруження, які діють у радіальному напрямку, майже не роблять впливу на пружні деформації. Водночас зростає кульовий тензор стиснення, унаслідок чого після вирубки виникають протилежні за знаком пружні деформації розтягу, які приводять до збільшення діаметра вирубаної деталі і до зменшення діаметра пробитого отвору. При цьому деталь залишається в матриці, а відхід щільно охоплює пуансон. Крім того, зі зменшенням зазору підвищується концентрація нормальних напружень σ_z біля робочих кромок пуансона й матриці, що викликає швидке їх притуплення, а отже, і зниження їх стійкості. Однак при малому зазорі відокремлювана деталь має більш точні розміри й залишається плоскою без додаткової правки.

2.2.2. Робочі (виконавчі) розміри пуансонів і матриць

Розміри виробу, одержуваного в результаті вирубки, відповідають розмірам робочого отвору матриці. Зношення матриці приводить до збільшення її робочого отвору. Тому виконавчі розміри робочого отвору матриці для вирубки повинні бути якнайменшими в межах допустимого розміру.

Якщо штампований виріб має форму круга і допуски на його діаметр визначені системою вала, то виконавчий діаметр робочого отвору матриці обчислюється як різниця між номінальним діаметром виробу і допуском на цей діаметр:

$$D_м = (D_н - \Delta)^{+\delta_м}, \qquad (2.16)$$

де $D_н$ – номінальний діаметр штампованого виробу; $D_м$ – діаметр матриці; Δ – допуск на діаметр виробу; $\delta_м$ – допуск на розмір матриці.

Робочий (виконавчий) діаметр пуансона для вирубки в даному випадку буде менший діаметра матриці на величину зазору між ними: $D_п = D_м - z$, або з урахуванням формули (2.16)

$$D_п = (D_н - \Delta - z)_{-\delta_п}, \qquad (2.17)$$

де $\delta_п$ – допуск на діаметр пуансона.

Діаметр отвору, одержуваного пробиванням, відповідає діаметру пуансона.

Зношення пуансона приводить до зменшення його діаметра. Тому виконавчий діаметр пуансона повинен бути найбільшим у межах допустимого.

Якщо допуски на штампований виріб визначаються системою отвору, то діаметр пуансона розраховується як сума номінального діаметра отвору і допуску на цей діаметр:

$$D_п = (D_н + \Delta)_{-\delta_п}. \qquad (2.18)$$

Робочий (виконавчий) діаметр матриці для пробивання буде більшим діаметра пуансона на величину зазору між ними: $D_м = D_п - z$, або з огляду на формулу (2.18):

$$D_м = (D_н + \Delta + z)^{+\delta_м}. \qquad (2.19)$$

Наведені формули (2.16) – (2.19) для визначення виконавчих розмірів пуансонів і матриць застосовуються в тому випадку, коли товщина штампованого металу порівняно невелика (до 1 – 2 мм), оскільки за цієї умови бічна поверхня відокремленої частини металу може вважатися приблизно перпендикулярною площині листа.

У разі штампування більш товстого металу (понад 2 мм) необхідно брати до уваги похилість бічної поверхні відокремленої частини металу, яка виникає внаслідок того, що тріщини сколення направлені під певним кутом до твірної. Тому для запобігання виходу розмірів штампованої деталі за межі поля допуску її діаметр штучно зменшують. Зменшений допуск Δ' береться таким, що дорівнює 0,6 – 0,8 номінального допуску Δ. У цьому випадку формули для визначення виконавчих розмірів пуансонів і матриць мають вигляд:

– для вирубання

$$D_м = [D_н - (0{,}6 \div 0{,}8)\Delta]^{+\delta_м}, \qquad (2.20)$$

$$D_п = [D_н - (0{,}6 \div 0{,}8)\Delta - z]_{-\delta_п}; \qquad (2.21)$$

– для пробивання

$$D_п = [D_н + (0{,}6 \div 0{,}8)\Delta]_{-\delta_п}, \qquad (2.22)$$

$$D_м = [D_н + (0{,}6 \div 0{,}8)\Delta + z]^{+\delta_м}. \qquad (2.23)$$

Допуски на робочі розміри пуансонів і матриць $\delta_м$ і $\delta_п$ беруть такими, що дорівнює 25 – 35 % від допуску на відповідний розмір штампованої деталі. Допуски на розміри інструмента призначають за певними класами точності: при товщині штампованого металу до 3 мм — за 8-м квалітетом, а при товщині понад 3 мм — за 10-м квалітетом.

Приклад. Потрібно визначити виконавчі розміри пуансонів і матриць для штампування шайби із зовнішнім діаметром $40_{-0{,}34}$ мм, внутрішнім діаметром $20^{+0{,}28}$ мм в умовах масового виробництва. Матеріал шайби — листова сталь Ст2 завтовшки 2,5 мм (ГОСТ 380–71).

Обчислюємо допуски на розміри пуансонів і матриць залежно від номіналь-

них розмірів шайби і її товщини:

$\delta_м^{40}$ = +0,027 мм; $\delta_п^{40}$ = – 0,017 мм; $\delta_м^{20}$ = + 0,023 мм; $\delta_м^{20}$ = – 0,014 мм.

За табл. 2.1 [5] визначаємо мінімальний діаметральний зазор між пуансоном і матрицею z_{min} = 0,21.

Застосовуючи розрахункові формули (2.20) – (2.23), знаходимо виконавчі розміри інструмента:

– для вирубки зовнішнього контуру діаметром 40 мм

$$D_м = (40 - 0{,}7 \times 0{,}34)^{+0{,}027} = 39{,}55^{+0{,}027} \text{ мм};$$

$$D_п = (39{,}76 - 0{,}21)_{-0{,}017} = 39{,}35_{-0{,}017} \text{ мм};$$

– для пробивання отвору діаметром 20 мм

$$D_п = (20 + 0{,}7 \times 0{,}28)_{-0{,}014} = 20{,}20_{-0{,}014} \text{ мм};$$

$$D_м = (20{,}2 + 0{,}21)^{+0{,}023} = 20{,}41^{+0{,}023} \text{ мм}.$$

Таблиця 2.1

Величини початкових зазорів під час виготовлення штампів для вирубки й пробивання

№ п/п	Товщина матеріалу, мм	Номінальний зазор, мм		№ п/п	Товщина матеріалу, мм	Номінальний зазор, мм	
		min	max			min	max
1	0,3	0,02	0,04	17	6	0,8	0,9
2	0,5	0,03	0,06	18	7	1,0	1,2
3	0,8	0,05	0,08	19	8	1,3	1,4
4	1,0	0,06	0,10	20	9	1,5	1,6
5	1,2	0,08	0,12	21	10	1,8	–
6	1,5	0,10	0,16	22	11	2,1	–
7	1,8	0,12	0,20	23	12	2,4	–
8	2,0	0,14	0,22	24	13	2,7	–
9	2,2	0,17	0,25	25	14	3,0	–
10	2,5	0,20	0,28	26	15	3,3	–
11	2,8	0,22	0,32	27	16	3,6	–
12	3,0	0,24	0,36	28	17	3,9	–
13	3,5	0,32	0,46	29	18	4,2	–
14	4,0	0,40	0,56	40	19	4,5	–
15	4,5	0,50	0,68	41	20	4,9	–
16	5	0,60	0,8				

Методика встановлення виконавчих розмірів матриць і пуансонів для вирубки або пробивання некруглих заготовок (деталей) в основному та сама, що й для круглих. Оскільки інструмент зношується «в тіло», розміри окремих елементів

контуру інструмента (виступи і западини) у процесі штампування змінюються порізному: одні розміри збільшуються, інші — зменшуються. Економічно доцільна точність виготовлення інструмента для штампування некруглих заготовок (деталей) визначається допусками, що дорівнюють 1/4 допуску на розміри деталі:

$$\delta_{ін} \cong 0{,}25\Delta_{дет}.$$

Під час проектування інструмента для вирубки виконавчі розміри з відповідними допусками проставляються тільки на кресленні матриці, а для пробивання — тільки на кресленні пуансона. На кресленнях пуансона для вирубки і матриці для пробивання у вигляді примітки дають вказівки щодо пригонки контурів із певним зазором *z*.

Якщо деталь або заготовка має особливо складну форму з криволінійним контуром, то контур інструмента виготовляють за спеціальним шаблоном. У разі вирубки за шаблоном роблять матрицю, а у випадку пробивання — пуансон. Потім відповідний інструмент (пуансон для вирубки, матрицю для пробивання) приганяють до необхідного зазору.

2.2.3. Енергосилові характеристики процесів вирубки й пробивання

До енергосилових характеристик процесів вирубки та пробивання належать робота деформації та зусилля: вирубки і пробивання; проштовхування відокремленої частини металу через робочий отвір матриці; знімання відходу (або виробу) з пуансона.

Зусилля вирубки та пробивання (або деформуюче зусилля) залежить від опору зрізу $\sigma_{зр}$ матеріалу заготовки, товщини металу *s*, довжини відокремлюваного контуру *L*, форми й стану робочих кромок пуансона та матриці й зазору між ними, швидкості деформації і глибини проникнення пуансона в метал у момент появи тріщини сколення.

Зусилля вирубки та пробивання (у мегапаскалях) приблизно визначають як добуток площі *F* бічної поверхні відокремлюваної частини металу та опору зрізу $\sigma_{зр}$ з урахуванням притуплення робочих кромок пуансона й матриці, показником якого є коефіцієнт $\omega = 1{,}1 \div 1{,}3$:

$$P = \omega F \sigma_{зр} = \omega L s \sigma_{зр}. \qquad (2.24)$$

Із формули (2.24) випливає, що максимальне зусилля виникає на самому початку вирубки й пробивання, коли площа *F* максимальна. У реальних умовах деформації зусилля вирубки й пробивання змінюється від нуля на початку процесу до максимуму, а потім починає зменшуватись у момент появи тріщин сколення.

Зусилля проштовхування й знімання. У разі вирубки з малим зазором деталь (або заготовка) залишається в матриці, а відхід щільно охоплює пуансон. У результаті пружних деформацій виникають контактні напруження $\sigma_{рм}$ і $\sigma_{рп}$, які під час проштовхування деталі крізь матрицю та знімання відходу з пуансона зумовлюють виникнення сил тертя (рис. 2.18).

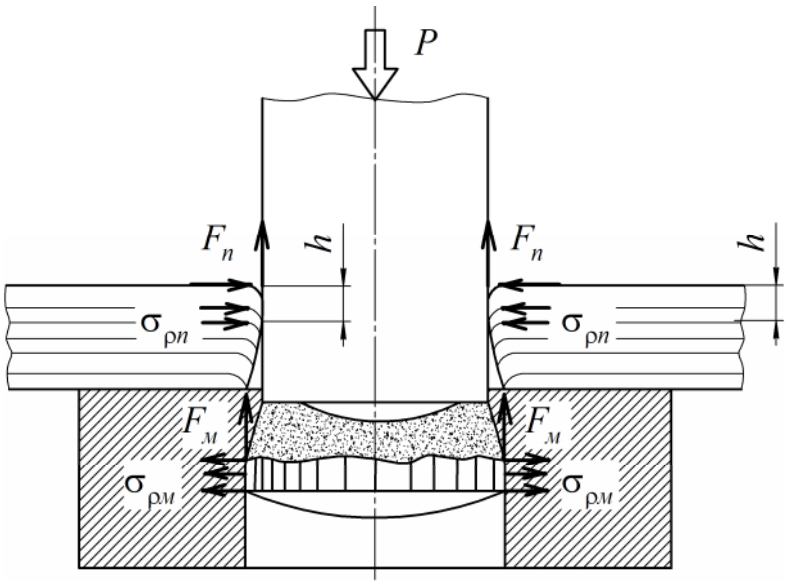


Рис. 2.18. Схема дії сил тертя:
P – зусилля вирубки-пробивання; $F_м$ і F_n – сили тертя, що виникають під час переміщення деталі відносно матриці й пуансона відповідно; $\sigma_{\rho м}$ і $\sigma_{\rho n}$ – контактні напруження поблизу матриці й пуансона відповідно; *h* – глибина проникнення пуансона в метал у момент появи тріщини сколення

У зв'язку з цим під час робочого ходу пуансона необхідно подолати не тільки опір вирубки-пробивання *P*, але й опір сил тертя $F_м$, що виникають у процесі переміщення деталі відносно матриці, а також опір сил тертя F_n на контактній поверхні пуансона й відходу металу. У цьому випадку зусилля преса $P_{преса} = P + F_м + F_n$ У разі зворотного ходу пуансон долає тільки опір сил тертя зі знімання відходу металу з пуансона F_n. Суму сил $F_м$ і F_n називають зусиллям проштовхування $P_{пр} = F_м + F_n$, а силу F_n — зусиллям знімання $P_з = F_n$.

Визначення зусиль проштовхування та знімання дозволяє уточнити енергосилові характеристики вирубки й пробивання, а також одержати необхідні дані для розрахунку на міцність і жорсткість окремих деталей штампів (знімачі і їх пружини, деталі їх кріплення й ін.).

Якщо вважати, що відхід металу з'єднується з пуансоном тільки блискучим пояском висотою *h* (рис. 2.18), то формула для визначення зусилля знімання матиме вигляд $P_з = Lh\sigma_{\rho n}\mu$, де *L* – довжина відокремлюваного контуру; $\sigma_{\rho n}$ – контактні напруження на контактній поверхні пуансона; μ – коефіцієнт тертя. Беручи $h = 0{,}3s$, $\mu = 0{,}2$ і $\sigma_{\rho n} \approx \sigma_{зр}$, одержуємо $P_з = 0{,}06Ls\sigma_{зр} = 0{,}06P$. Тобто для зазначених умов деформації зусилля знімання складає 6 % від технологічного зусилля вирубки-пробивання.

Якщо сили тертя, прикладені до поверхні контакту пуансона та відходу металу, дорівнюють силам тертя, прикладеним до поверхні контакту вирубаної деталі й матриці ($F_м = F_n$), то зусилля проштовхування дорівнюватиме подвоєному зусиллю знімання — $P_{пр} = 2P_з$. Проте внаслідок навіть незначного вигину відокремленої ча-

стини металу напруження $\sigma_{рм}$, прикладені до поверхні контакту вирубаної деталі й матриці, істотно зменшуються, тому зусилля проштовхування $P_{пр} \approx P_з$.

Окрім розглянутих факторів на зусилля проштовхування та знімання великою мірою впливають: ширина перемички між сусідніми відокремлюваними контурами (чим вона більша, тим зусилля проштовхування і знімання більше); форма і розміри штампованого контуру; зазор між пуансоном і матрицею; можливість перекосу відходу металу щодо пуансона та ін. Оскільки врахування впливу цих факторів становить певні труднощі, зусилля проштовхування й знімання визначають, використовуючи експериментальні дані, одержані у вигляді функціональних залежностей від зусилля вирубки-пробивання, за такими емпіричними формулами:

$$P_{пр} = K_{пр} Pn = K_{пр} P(H/s); \quad (2.25)$$

$$P_з = K_з P, \quad (2.26)$$

де $K_{пр}$ і $K_з$ – коефіцієнти (або відносні зусилля) проштовхування та знімання; n – кількість деталей, що знаходяться в шийці матриці, H – хід пуансона в разі штампування пакета листових заготовок.

Залежно від товщини металу, кількості одночасно штампованих деталей і типу штампа (простої або послідовної дії) $K_з$ змінюється від 0,02 до 0,20, а $K_{пр}$ — від 0,05 до 0,14. Чим товщий метал, тим відносне зусилля знімання і проштовхування більше [5].

Робота деформації. Зусилля деформації під час вирубки і пробивання змінюється по шляху пуансона, причому за своїм характером його зміна (крива робочого навантаження) схожа зі зміною зусилля відрізання (див. рис. 2.6). У зв'язку з цим робота деформації в разі вирубки й пробивання може бути визначена за формулою (2.6), для якої зусилля розраховується за формулою (2.24), якщо інструмент для вирубки й пробивання має плоскі торці, і за формулами (2.27) – (2.30), якщо робочі кромки інструмента похилі.

У разі розрахунку роботи деформації під час вирубки й пробивання за формулою (2.8) значення коефіцієнта λ залежно від товщини, виду металу і його твердості змінюється від 0,75 до 0,15. Чим товщий і твердіший метал, тим значення λ менше [2].

2.2.4. Способи зменшення деформуючого зусилля вирубки та пробивання

Для зменшення деформуючого зусилля вирубки-пробивання застосовують різні способи, а саме: вирубку контуру по частинах, вирубку-пробивання пуансонами різної довжини зі східчастим розташуванням робочих кромок і вирубку-пробивання за допомогою пуансонів і матриць зі скісними кромками. Останній спосіб дозволяє здійснювати вирубку-пробивання поступово (як у випадку відрізання на ножицях із похилим ножем), а не одночасно по всьому відокремлюваному контуру. В результаті цього зусилля вирубки-пробивання може бути зменшене на 30—40 %.

Для створення умов, за яких горизонтальні проекції зусиль вирубки та про-

бивання, прикладених до скісно розташованих робочих кромок інструмента, могли б урівноважуватися, скоси роблять симетричними щодо осі інструмента. Це дає можливість робити кути нахилу робочих кромок інструмента більшими, ніж у разі відділення металу з однобічним нахилом ріжучої кромки ножа. Залежно від характеру операції (вирубка чи пробивання) скоси виконуються на матриці або пуансоні (рис. 2.19).

Використання скосів викликає згинання тієї частини металу, яка стикається з інструментом, що має похилі робочі кромки. Тому в разі вирубки скоси роблять-ся на матриці, а у випадку пробивання — на пуансоні.

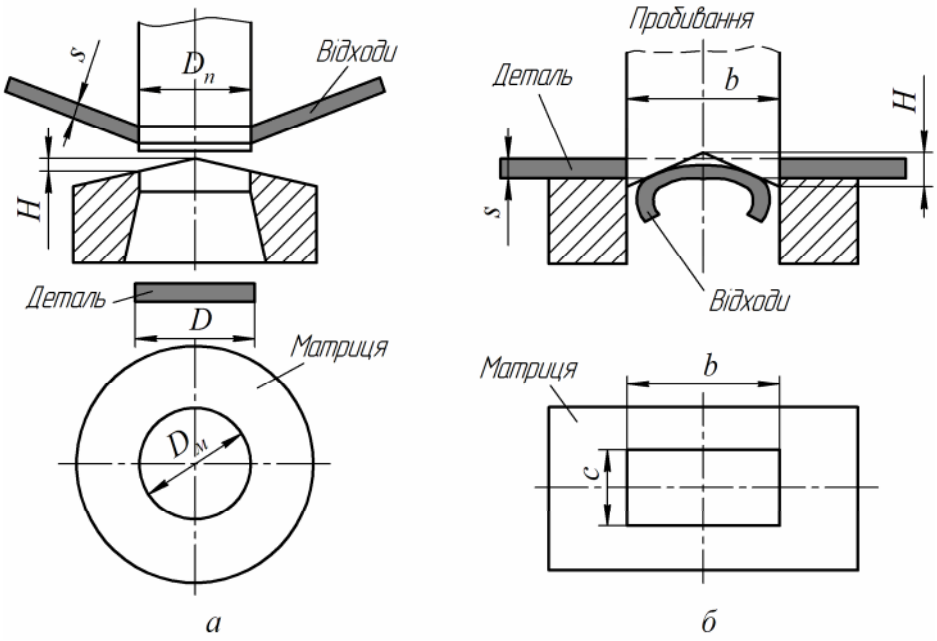


Рис. 2.19. Схематичне зображення пуансонів і матриць для вирубки та пробивання зі скісними робочими кромками

Серед досліджень процесу вирубки-пробивання інструментом зі скосами найбільш відомі праці Б. П. Звороно. Ним запропоновані розрахункові формули для визначення зусилля вирубки-пробивання за різної форми робочих кромок пуансонів і матриць.

Наприклад, у разі вирубки круглої заготовки діаметром D в матриці з двобічним скосом (рис. 2.19, *а*) формули для обчислення зусилля вирубки-пробивання мають вигляд:

– при висоті скосу H, що дорівнює товщині металу:

$$P = \frac{2}{3}\pi D s \sigma_{зр}; \qquad (2.27)$$

– при висоті скосу H, що знаходиться в межах 0,5–1,0 товщини металу:

$$P = 2Ds\sigma_{зр}\arccos\frac{H - 0{,}5s}{H}. \qquad (2.28)$$

У випадку пробивання прямокутного отвору з розмірами $b \times c$ пуансоном із двобічними скосами (рис. 2.19, *б*) формули для визначення зусилля такі:

– при висоті скосу H, що дорівнює товщині металу:

$$P = 2s\sigma_{зр}(b + 0{,}5c); \tag{2.29}$$

– при висоті скосу H, більшій товщини металу:

$$P = 2s\sigma_{зр}\left(b + c\frac{0{,}5s}{H}\right). \tag{2.30}$$

Для вирубки й пробивання деталей (або заготовок) діаметром понад 250 – 300 мм із товстолистового металу (при $s/D > 0{,}1$) передбачаються скоси, як правило, на робочих кромках матриці. Кількість скосів (у вигляді хвиль, що періодично повторюються) залежить від розмірів матриці; їх може бути 4 і більше. Відносна висота скосів H/s змінюється від 1 до 3, чим товщий метал, тим відносна висота скосу менша.

2.2.5. Особливості вирубки й пробивання неметалевих матеріалів

Основна відмінність шаруватих і волоконних пластиків від металів полягає в тому, що вони складаються з шарів наповнювача (у вигляді паперу, тканини та ін.) і шарів смоли (епоксидної, фенолформальдегідної та ін.), що їх скріпляє. Незважаючи на те, що пресування шаруватих і волоконних пластиків відбувається при питомому зусиллі 110–160 МПа і температурі 150–160°С, вони мають неоднорідну структуру, пронизану мікротріщинами, які під час дії зусиль на заготовку стають осередками концентрації напружень у зоні деформації. Ця концентрація напружень може призвести в процесі штампування до появи тріщин у деталях. Тому шаруваті й волоконні пластики, особливо гетинакси, штампують, дотримуючись таких умов: мала швидкість деформації (при кількості ходів преса, не більшій 50 за хвилину); попереднє стиснення заготовки в штампі між матрицею та знімачем силою $Q = qLs$, де L – периметр контуру вирубки; q – тиск притискного елемента; s – товщина матеріалу (при $s \le 1$ мм $q = 6 \div 10$ МПа, при $s = 2 \div 3$ мм $q = 15 \div 20$ МПа); заздалегідне попереднє пробивання отвору діаметром, меншим номінального, з подальшим пробиванням до необхідного розміру; нагрівання шаруватих пластиків при товщині листа понад 1,5–2 мм до температури 90 – 120 °С для підвищення якості поверхні поділу та зменшення опору зсуву. Нагрівання може здійснюватися в електропечах і термостатах, між гарячими плитами, в киплячій воді, за допомогою інфрачервоних ламп та ін.

Попереднє пробивання отворів діаметром, меншим номінального, виконують східчастим пуансоном (рис. 2.20). Діаметр першого східця пуансона $D_в$ складає 0,7—0,8 номінального діаметра отвору D_n, висота східця $h_в = 0{,}8 \div 09$ товщини штампованого листа.

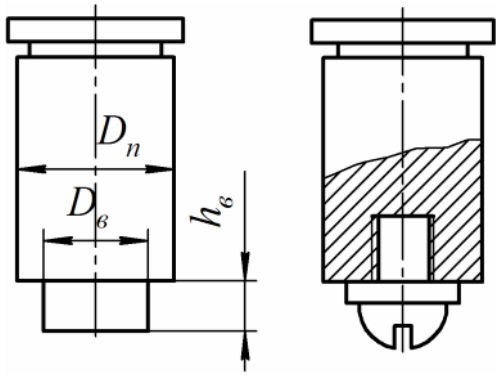


Рис. 2.20. Пуансони для пробивання неметалевих матеріалів

Перший східець пуансона заздалегідь пробиває отвір діаметром $D_в$, при цьому в результаті відколювання поверхня поділу виходить нерівною. Другий східець пуансона, по суті, зачищає одержану поверхню поділу, тимчасово знімаючи концентрацію напружень, що виникла під час появи тріщин сколення у початковий період пробивання. Застосування східчастих пуансонів (перший східець пуансона має назву «передруйнівний виступ») дозволяє поліпшити якість кромок отворів, одержуваних пробиванням у ламких неметалевих матеріалах.

У разі штампування гетинаксу й текстоліту зазор між пуансоном і матрицею береться значно меншим, ніж у випадку штампування металів (1,5 – 4 % від товщини матеріалів), а перемичка між контурами деталей, що будуть вирубані, – приблизно на 50 % більшою, ніж під час вирубки з маловуглецевої листової сталі. Це зумовлене уже відзначеними особливостями шаруватих пластиків, зокрема їх ламкістю.

2.2.6. Послідовне та суміщене (комбіноване) штампування

Суть комбінованого штампування полягає в об'єднанні кількох операцій в одному штампі, при цьому поєднувані операції називають *переходами*. Наприклад, якщо шайбу одержують вирубкою на одному пресі, а потім пробиванням на іншому, то це дві *однопереходні операції*, а якщо шайбу одержують у комбінованому штампі, у якому відбувається пробивання й вирубка на одному пресі, то це *двоперехідна операція*.

Поєднуватися можуть: розділові операції з розділовими (вирубка, пробивання), формозмінні з формозмінними (наприклад, першого і подальших переходів витяжки), розділові з формозмінними (вирубка, витяжка). Можливості поєднання операцій в одному штампі залежать від співвідношення зовнішніх і внутрішніх розмірів штампованих деталей. У разі комбінованого штампування окремі переходи можна виконувати послідовно під час переміщення заготовки у вигляді штаби або стрічки з однієї позиції штампування на іншу за декілька ходів преса (послідовне штампування) або одночасно на одній позиції штампування за один хід преса (суміщене штампування).

Якщо не брати до уваги ходи преса, виконувані на самому початку штампування (кількість яких на одиницю менша загальної кількості переходів), то в процесі послідовного штампування незалежно від кількості переходів за кожний ро-

бочий хід преса одержують готову деталь.

Комбіноване штампування виконують у штампах послідовної і суміщеної дії. У штампах послідовної дії робочі інструменти (пуансони, матриці) розташовані послідовно, один за одним (рис. 2.21, *а*), у штампах суміщеної дії — один в одному (рис. 2.21, *б*). Штампи суміщеної дії більш компактні, ніж штампи послідовної дії, їх конструкція виключає можливість зсуву зовнішнього контуру штампованої деталі щодо внутрішнього та згинання деталі в процесі штампування.

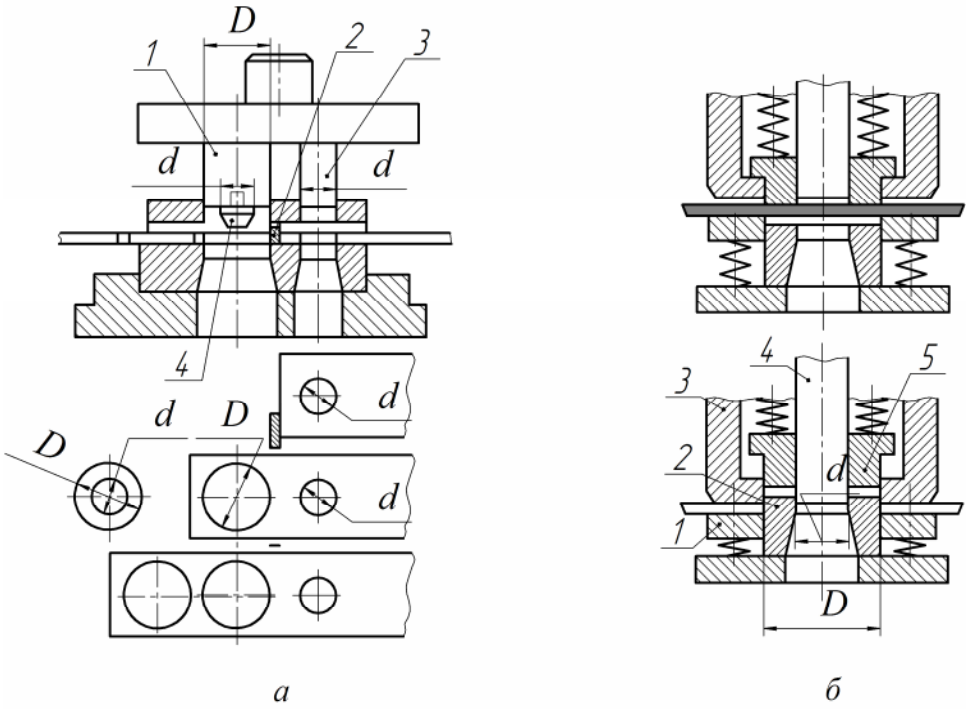


Рис. 2.21. Штампи для штампування шайби:
а – послідовної дії (*1* – пуансон для вирубки; *2* – упор; *3* – пуансон для пробивання; *4* – знімач відходу); *б* – суміщеної дії (*1* – знімач відходу; *2* – пуансон-матриця; *3* – матриця для вирубки; *4* – пуансон для пробивання; *5* – виштовхувач)

Суміщене штампування застосовують для отримання деталей із малими допусками на ексцентричність і підвищеними вимогами до площинності виробу. Трудомісткість виготовлення штампів суміщеної дії в 1,5—2 рази вища, ніж штампів послідовної дії.

2.2.7. Матриці й пуансони в операціях вирубки та пробивання отворів

Матриці. Конструкція робочого отвору матриць для вирубки й пробивання залежить від товщини штампованої деталі (або заготовки), її форми та розмірів, необхідної точності, типу виробництва й інших факторів. На рис. 2.22 показані різні типи робочих отворів матриць для вирубки і пробивання: із призматичним поясом (*а*), конічні по всій висоті (*б*), призматичні по всій висоті (*в*), із циліндричним пояском і розширеним провальним отвором (*г*).

Матриці типу *а* застосовують під час штампування деталей складної форми

або підвищеної точності. Висота пояска h залежить від товщини заготовки й змінюється від 3 до 15 мм за відповідної зміни товщини заготовки від 0,5 до 10 мм, кут конуса провального отвору складає 3 – 5°. Даний тип отвору забезпечує стабільність розмірів штампованої деталі після перешліфування матриці, проте довговічність таких матриць невелика.

Матриці типу *б* використовують з метою отримання невеликих деталей простої форми та невисокої точності, оскільки в процесі перешліфування робочий отвір матриці збільшується (у разі шліфування на 3 мм розмір отвору збільшується на 0,1 мм). Кут конуса робочого отвору складає від 15' до 1°, довговічність матриці вища, ніж матриці з робочим отвором типу *а*.

Матриці типу *в* призначені для штампування зі зворотним виштовхуванням деталі на поверхню матриці (у більшості випадків у штампах суміщеної дії).

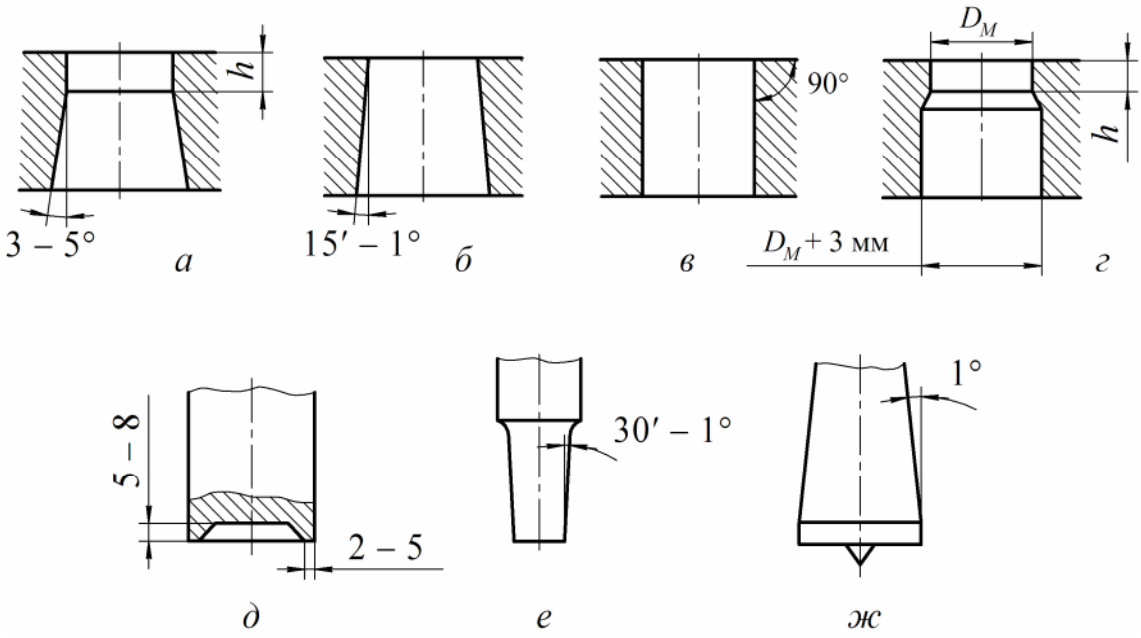


Рис. 2.22. Форми отворів матриць для вирубки й пробивання та робочих частин пуансонів для вирубки й пробивання отворів

Матриці типу *г* застосовують для пробивання отворів діаметром до 40 мм. Висота h циліндричного пояска матриці повинна бути не меншою 3 мм, із збільшенням товщини штампованої деталі висота пояска збільшується; діаметр провального отвору в матриці на 3 мм більший, ніж діаметр d робочого отвору матриці.

Пуансони. Конструкція робочої частини пуансонів, як і матриць, залежить від діаметра пробиваного отвору (або заготовки, що вирубається), товщини металу, типу виробництва, необхідної точності розмірів отвору та ін. На рис. 2.22 наведені чотири типи пуансонів із різними робочими частинами. Тип *д* найбільш простий, у зв'язку з чим він найпоширеніший. При діаметрі пуансона понад 50 мм на його торцевій частині робиться заглибина для полегшення перешліфування.

Ширина кільцевої частини пуансона повинна бути ширшою осередку пластичної деформації, що виникає під час вирубки-пробивання. Цій умові відповідає ширина 2 – 5 мм.

У процесі пробивання отворів у товстому листі (s > 8 мм) з'являється необхідність зменшити зусилля знімання, для цього робочу частину пуансона роблять злегка конусною з кутом нахилу твірної 30′ – 1° (тип *е*), а за потреби зменшити зусилля проштовхування й під час пробиванні отворів по розмітці керном (наприклад, у дрібносерійному виробництві) застосовують пуансони зі зворотним конусом в 1° і конічним виступом (тип *ж*). Пробивання отворів, діаметр яких менший товщини заготовки, призводить до виникнення стискаючих напружень, які перевищують критичні, у зв'язку з чим відбувається втрата стійкості, що завершується руйнуванням пуансона. Тому основна умова розробки конструкції штампа для пробивання малих отворів — забезпечення стійкості пуансонів. Це досягається використанням напрямних для пуансонів по всій їх довжині у вигляді телескопічних втулок, набору штифтів або шайб.

Залежно від умов штампування стійкість інструмента (до перешліфування), виготовленого з інструментальної сталі, складає $5 \cdot 10^4 – 1 \cdot 10^5$ ударів. Стійкість твердосплавного інструмента досягає $1 \cdot 10^6$ і більше ударів.

2.3. Чистова вирубка й пробивання, зачистка в штампах

2.3.1. Чистова вирубка й пробивання

У ряді галузей машинобудування, а також у приладобудуванні (виробництво годинникових механізмів, радіоелектроніка) ставляться підвищені технічні вимоги до якості бічної поверхні й точності розмірів плоских деталей. Зокрема, вимагається, щоб точність розмірів відповідала 8 – 11-му квалітету, а шорсткість бічної поверхні (по всій товщині) відповідала параметру R_a = 2,5 ÷ 1,25 мкм для сталевих і R_a = 1,25 ÷ 0,63 мкм для кольорових пластичних металів за ГОСТ 2789–73.

У масовому та багатосерійному виробництві найефективнішими способами отримання плоских деталей, що задовольняють указані вимоги, є чистова вирубка й пробивання, а також зачистка. Застосування цих операцій дозволяє у деяких випадках замінити механічну обробку і цим істотно підвищити продуктивність праці, знизити питому витрату металу й собівартість продукції, що випускається.

Значного поширення набула чистова вирубка й пробивання з попереднім стисненням заготовки при досить малому зазорі між пуансоном і матрицею.

Особливість цих процесів полягає в тому, що заготовка перед вирубкою-пробиванням стискається поблизу осередку деформації кільцевим клиноподібним ребром, виконаним як одне ціле з притискним кільцем штампа. При цьому дотичні напруження концентруються в осередку деформації, збільшується компонента кульового тензора напруження (гідростатичний тиск), пластичність металу під-

вищується. Відділення однієї частини заготовки від іншої відбувається тільки в результаті зсуву під дією дотичних напружень, що дозволяє одержати високу точність розмірів виробу й чисту бічну поверхню.

Механізм пластичної деформації чистової вирубки-пробивання досліджений недостатньо. Науково обґрунтованих рекомендацій щодо здійснення цих операцій мало, є лише дані, одержані експериментально й на основі використання виробничого досвіду.

Чистову вирубку-пробивання з попереднім локальним стисненням заготовки проводять у штампі (рис. 2.23). Притискне кільце *3* притискує заготовку до матриці *1*, при цьому відбувається проникнення клиноподібного ребра в заготовку. Потім пуансоном *4* вирубують деталь і заштовхують її в матрицю *1*, долаючи протитиск контрпуансона *2*. Під час зворотного ходу відхід звільняють від притискного кільця *3*, а вирубану деталь виштовхують із матриці *1* контрпуансоном *2* і видаляють із робочого простору штампа. Нормальні стискаючі напруження, створювані притискним кільцем *3*, повинні бути не меншими за границю текучості матеріалу заготовки.

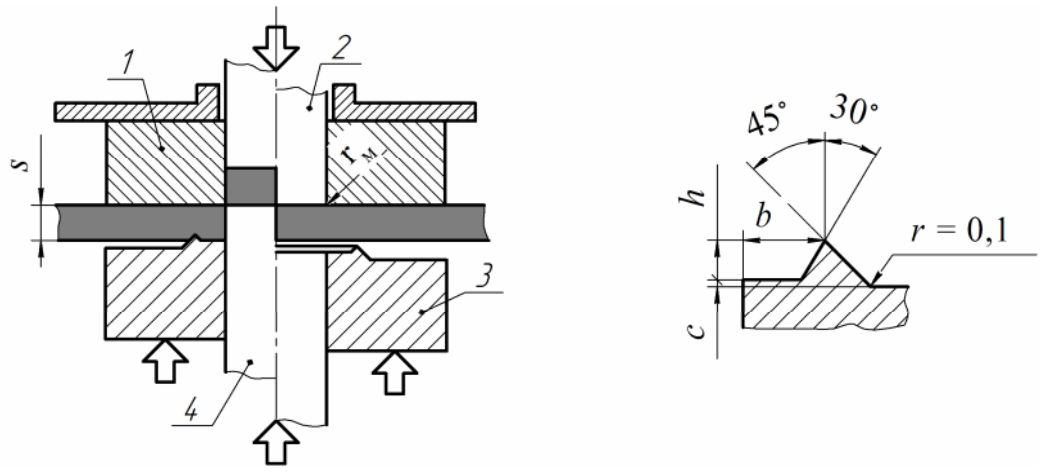


Рис. 2.23. Робочий інструмент для чистової вирубки

Чистову вирубку й пробивання виконують на пресах-автоматах із механічним приводом при номінальному зусиллі до 6,3 МН для штампування деталей завтовшки до 16 мм і з гідравлічним приводом з номінальним зусиллям до 25 МН для штампування деталей завтовшки до 40 мм. Особливість пресів-автоматів полягає в тому, що вони послідовно розвивають: зусилля притиску заготовки до матриці до початку вирубки та проникнення в заготовку клиноподібного ребра; зусилля вирубки; зусилля, необхідне для протитиску та виштовхування з матриці готових деталей. За відсутності пресів-автоматів для чистової вирубки й пробивання можна використовувати модернізовані універсальні механічні преси, обладнані гідравлічними пристроями для притиску заготовки й створення протитиску в процесі штампування деталей.

Повне (сумарне) зусилля преса P, необхідне для чистової вирубки-пробивання з попереднім стисненням заготовки, в 1,65 – 2,25 разу більше, ніж під час вирубки-пробивання без попереднього стиснення.

Чистову вирубку й пробивання застосовують для отримання деталей із конструкційних і низьколегованих сталей, латуні, електролітичної міді, алюмінію і алюмінієвих сплавів. Залежно від виду устаткування і його номінального зусилля чистовою вирубкою й пробиванням одержують деталі певних розмірів. На пресах-автоматах із номінальним зусиллям до 4,0 МН штампують сталеві дрібні та середнього розміру деталі завдовжки до 250 – 300 мм при товщині металу до 10 мм; на пресах-автоматах з номінальним зусиллям до 25 МН — середні за розміром і великі деталі завдовжки до 800 мм при товщині металу до 40 мм.

Особливості інструменту. У штампах для чистової вирубки й пробивання клиноподібне ребро для всієї товщини штампованого металу передбачається на притискному кільці (рис. 2.23). У разі штампування товстолистового металу (s > 4 мм) клиноподібне ребро виконують і на матриці.

Оптимальні розміри клиноподібних ребер встановлені експериментально (рис. 2.23). За геометрично простої форми контуру штампованої деталі клиноподібне ребро розташовується еквідистантно йому, за складної форми — ребро повинне плавно огинати кутові ділянки. У випадку чистового пробивання отворів діаметром, більшим чотирьох товщин заготовки, клиноподібне ребро передбачається і на виштовхувачі відходу.

Для зменшення згинаючого моменту під час чистової вирубки-пробивання зазор між пуансоном і матрицею повинен бути дуже малим (або зовсім відсутнім), значення його встановлюють за емпіричною формулою $z = 0{,}02s^{+\Delta z}$, де z – двосторонній зазор; Δ_z – граничне відхилення, яке збільшується зі збільшенням товщини металу; при s = 2 мм Δ_z = 0,005 мм, при s = 12 мм Δ_z = 0,03 мм.

Робочий отвір матриці виконують без уклону, оскільки штампування ведеться зі зворотним виштовхуванням. Робочі кромки матриць мають бути округлені малим радіусом ($r_м$ = 0,1 ÷ 0,6 мм при s = 2 ÷ 12 мм) або притуплені невеликою фаскою (рис. 2.23). Притупляється тільки одна з робочих кромок штампа (матриці — у разі вирубки, пуансона — під час пробивання), інша повинна залишатися гострою для запобігання утворенню задирок торця. Притуплені кромки зменшують концентрацію напружень і деформацій, що виникають поблизу робочих кромок інструмента. У зв'язку з цим тріщини сколення з'являються при більшій глибині проникнення пуансона в метал, ніж у разі вирубки-пробивання інструментом із гострими кромками (або зовсім не з'являються), при цьому висота блискучого пояска збільшується.

Матриці та притискні кільця з клиноподібним ребром повинні мати конусну посадочну частину з невеликим кутом нахилу (приблизно 30′), що необхідне для їх закріплення в штампі.

Окрім чистової вирубки й пробивання з попереднім локальним стисненням заготовки існують інші способи, а саме: вирубка пуансоном, більшим вікна матриці (так звана вирубка з «негативним зазором»), чистова вирубка з радіальним обтисканням та ін. Суть цих способів, як і вищерозглянутого, полягає в штучному створенні нерівномірного стиснення в осередку пластичної деформації, що викликає підвищення пластичності матеріалу заготовки, у поєднанні з використанням контактних сил тертя для загладжування бічної поверхні штампованого виробу.

У разі вирубки пуансоном, більшим вікна матриці (рис. 2.24, *а*), пуансон не повинен доходити до дзеркала матриці на u = 0,10 – 0,15 мм. При цьому половина різниці відповідних поперечних розмірів пуансона й матриці, яка дорівнює ширині перекриття b, має складати на прямолінійних ділянках контуру $0{,}1s$ і на кутових — $0{,}2s$.

Під час вирубки з радіальним обтисканням (рис. 2.24, *б*) зазор між пуансоном і матрицею дуже малий (z = 0,1 ÷ 0,2 мм), тому для створення нерівномірного стиснення в осередку деформації й полегшення заштовхування виробу в матрицю її робочі кромки округляють радіусом $z = z/2$.

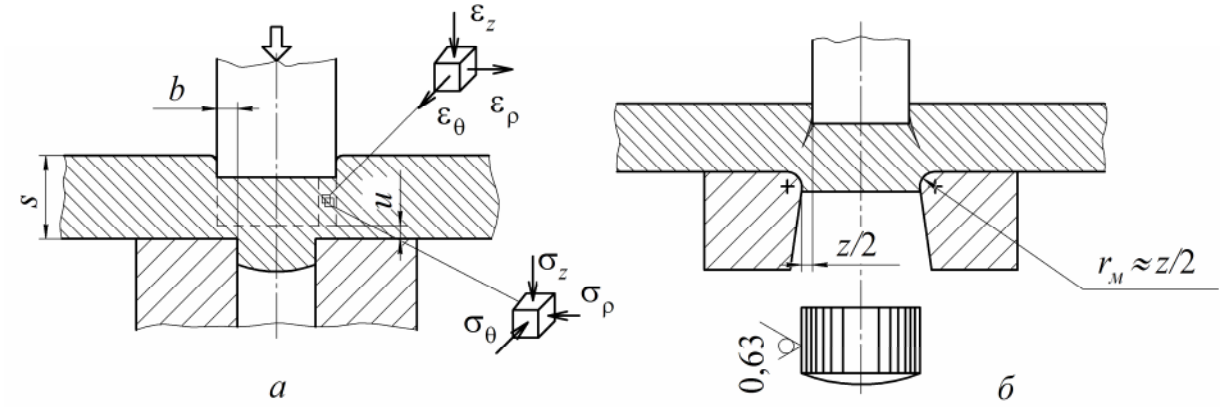


Рис. 2.24. Схема чистової вирубки:
а – пуансоном, більшим вікна матриці; *б* – із радіальним обтисканням

Розглянуті способи чистової вирубки застосовуються для отримання дрібних і середнього розміру деталей із пластичних металів завтовшки до 4 – 5 мм (латунь, мідь, алюміній, маловуглецева сталь), необхідне зусилля штампування при цьому в 2 – 2,5 рази більше, ніж у разі вирубки з оптимальним зазором.

2.3.2. Зачистка

Зачистка застосовується з метою підвищення точності розмірів оброблюваних заготовок і якості бічних поверхонь деталей (порівняно зі звичайними вирубкою та пробиванням). Розміри деталей, що піддаються зачистці, не перевищують 150 – 200 мм при товщині матеріалу 3 – 4 мм. Зачистка більших деталей пов'язана з труднощами, які виникають під час виготовлення штампів. Зачистку деталей за-

втовшки понад 3 – 4 мм (до 8 – 10 мм) виконують за декілька операцій. Шорсткість поверхні після зачистки R_a = 1,25 – 0,32 мкм при товщині матеріалу до 3 мм і R_a = 2,5 – 1,25 мкм при товщині матеріалу понад 3 мм. При цьому досягається точність розмірів, відповідна 8 – 11-му квалітету.

Зачисткою обробляють заготовки з кольорових металів і їх сплавів (мідь, латунь, алюміній та ін.), низьковуглецевої і корозійностійкої сталей і титанових сплавів. Ширина відокремлюваного зачисткою шару матеріалу завжди менша товщини заготовки, процес його відділення принципово інший, ніж за звичайних вирубки та пробивання. Відділення припуску у вигляді стружки відбувається поступово в міру опускання пуансона аж до опорної поверхні заготовки, а не шляхом сколювання, як у випадку вирубки та пробивання.

Залежно від того, який контур обробляють (зовнішній чи внутрішній), працює або ріжуча кромка матриці, або ріжуча кромка пуансона (рис. 2.25).

Зачистку застосовують в основному в приладобудуванні замість механічної обробки, що істотно знижує трудомісткість виготовлення деталі.

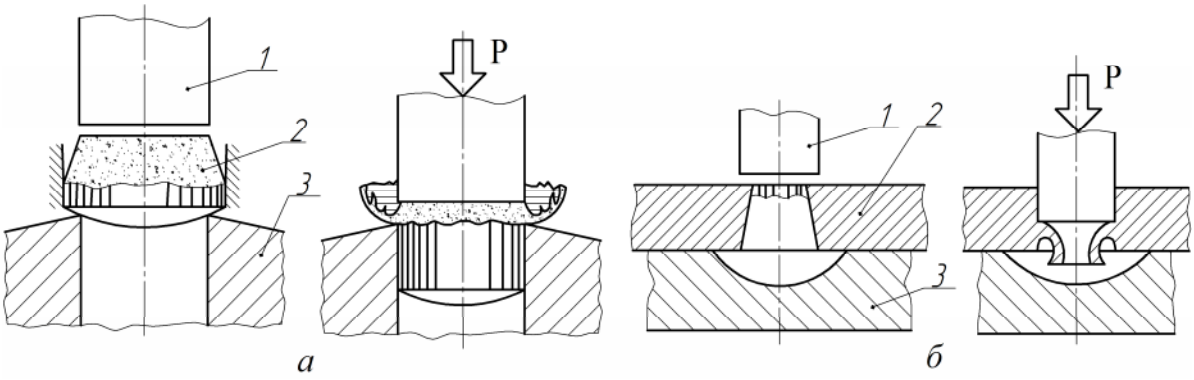


Рис. 2.25. Схема зачистки зовнішнього (*а*) і внутрішнього (*б*) контурів деталі:
1 – пуансон; *2* – деталь; *3* – матриця

Наприклад, заміна фрезерування зубців храповика діаметром 26 мм і завтовшки 2 мм зачисткою в штампі дозволила знизити трудовитрати з 10,4 до 0,28 хв на штуку за істотного підвищення якості обробленої поверхні. Крім того, зачистка дозволяє механічним шляхом видалити наклепаний (зміцнений) шар, розташований по контуру деталі або отвору, одержаного звичайною вирубкою чи пробиванням. Під час виконання формозмінних операцій (наприклад, відбортовка отвору) відсутність наклепаного шару по контуру заготовки дозволяє підвищити граничний ступінь деформації.

Припуски на зачистку. Деталі й заготовки, одержані вирубкою та пробиванням, мають злегка конусну бічну поверхню. Тому відповідні один одному поперечні розміри зовнішнього контуру заготовки (або отвору в заготовці) неоднакові. Найбільший поперечний розмір заготовки (отвору) дорівнює розміру робочого отвору матриці ($D_{max} = D_м$), якнайменший – розміру пуансона ($D_{min} = D_п$), а їх різ-

ниця дорівнює значенню двостороннього оптимального зазору $z_{опт}$ між матрицею і пуансоном: $D_{max} - D_{min} = z_{опт}$.

Для того щоб відповідні один одному розміри зовнішнього контуру заготовки (або отвору в ній) були однакові в усіх перерізах, паралельних площині листа, необхідно зачисткою видалити припуск шириною $z/2$. Проте за такого припуску не можна гарантувати отримання чистової блискучої поверхні зрізу по всій товщині й особливо біля її кромки (рис. 2.26, точка *а*). Тому односторонній припуск на зачистку П/2 повинен бути більшим $z/2$ на деякий розмір $y/2$. Отже, $П = z + y$, де П – повний двосторонній припуск на зачистку; y – додатковий двосторонній припуск.

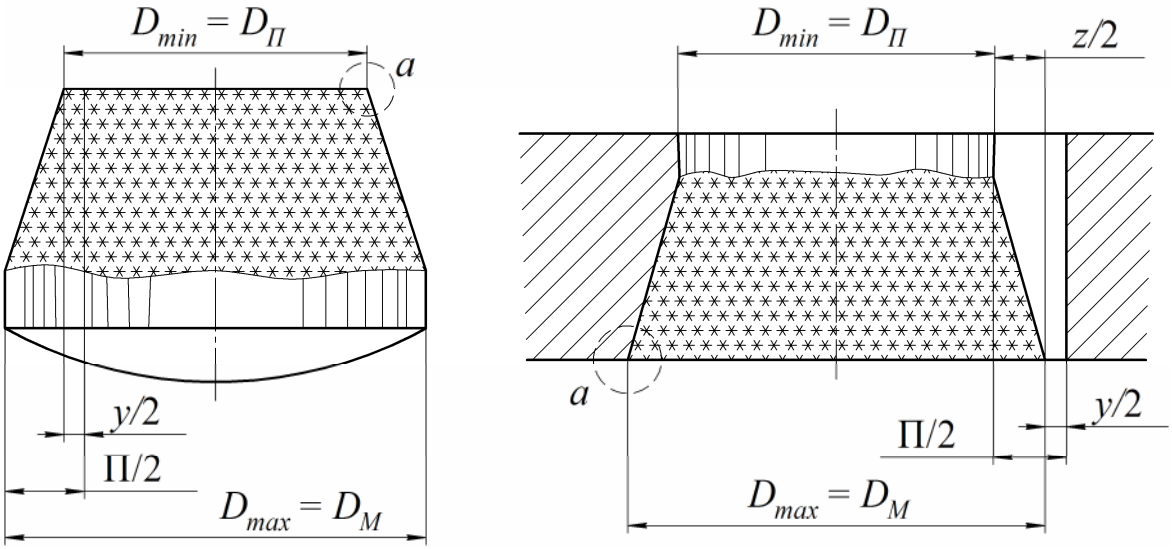


Рис. 2.26. Схема розташування припуску на зачистку

Припуск y залежить від виду матеріалу, його товщини та форми контуру деталі, що зачищається. Відповідно до нормативних даних додатковий припуск на зачистку складає: для металів — 0,1 – 0,6 мм, для гетинаксу й текстоліту — 0,2 – 0,5 товщини листа.

Для отворів невеликого діаметра ($d \le s$) припуск на зачистку складає: після свердлення — 0,10 – 0,15 мм, після пробивання — 0,15 – 0,20 мм. Для багаторазової зачистки повний двосторонній припуск на зачистку дорівнює

$$П = y(0{,}7N + 0{,}3) + z,$$

де N – кількість операцій зачистки.

Деформуюче зусилля зачистки зрізанням припуска залежить: від периметра контуру, що зачищається; товщини металу; характеристик міцності металу; припуска на зачистку. Визначаючи зусилля зачистки зовнішнього контуру, слід враховувати зусилля, необхідне для проштовхування деталі, що зачищається, крізь робочий отвір матриці. Оскільки процес зачистки теоретично досліджений недостатньо, сумарне зусилля зачистки й проштовхування приблизно можна встанови-

ти за формулою, одержаною емпірично: $P \approx L\sigma_{зр}$ [П + (0,15 ÷ 0,20)ns], де L – периметр контуру, який зачищається; n – кількість деталей, що знаходяться одночасно в матриці для зачистки [1]. Орієнтовно можна вважати, що зусилля зачистки складає приблизно 25 % зусилля вирубки-пробивання.

Під час виконання розділових операцій, особливо в разі чистової вирубки-пробивання, зносостійкість пуансонів і матриць може бути істотно підвищена (у 2 – 4 рази) у результаті використання спеціальних мастильно-охолодних технологічних засобів (МОТЗ) замість масла індустріального И-45. До різних МОТЗ, одержаних на основі масел середньої в'язкості з присадками хлору та сірки, належать: ХС-147, ХС-163, ХС-164, Укринол 5/5 та ін. [2]. Указані мастильні матеріали мають високу адгезію і теплопровідність, їх використання зменшує контактне тертя, оберігає інструмент від налипання штампованого металу, виключає мікровириви, дряпини й ін.

2.4. Розкрій листового прокату

2.4.1. Показники ефективності розкрою

У собівартості продукції листового штампування витрати на матеріал складають 50 – 70 %, тому найефективнішим способом зниження собівартості є економія металу за рахунок зниження маси відходів. Підраховано, що кожний відсоток зменшення маси відходів дозволяє понизити собівартість штампованої деталі на 0,4 – 0,5 % . У зв'язку з цим виникає проблема оптимізації розкрою листового й сортового прокату.

Розкрій — це знаходження найефективнішого розміщення заготовок (або плоских деталей) у листі (штабі, стрічці) відносно одна одної і кромок листового прокату.

У технічній літературі зустрічається й інше, традиційне, трактування терміну «розкрій», а саме розміщення заготовок з подальшим розрізанням (розкроєм) листового і сортового прокату на штаби, стрічки й окремі заготовки. Недолік цього трактування полягає в тому, що воно не відповідає термінології, регламентованій ГОСТ 18970–84.

Згідно з ГОСТ 18970–84 мірою ефективності розкрою служать коефіцієнт використання металу $K_в$ (КВМ), що являє собою відношення маси деталі до норми витрати металу на її виготовлення, і коефіцієнт розкрою $K_р$, що дорівнює відношенню маси деталей, одержаних з однієї заготовки (листа, прутка), до маси початкової заготовки.

Якщо вважати, що товщина деталей, штампованих із листового прокату, незмінна в усіх точках і дорівнює товщині початкової заготовки (листа), то коефіцієнт використання металу можна розглядати як відношення площі всіх деталей (або заготовок), штампованих з листа, $n \times f$ до площі листа $B \times L$, із якого вони оде-

ржуються вирубкою:

$$K_в = (n \times f) / (B \times L). \quad (2.31)$$

Площа деталі f, яка має отвори, дорівнює різниці площі її зовнішнього контуру $f_к$ і сумарної площі отворів $f_{отв}$, у цьому випадку

$$K_в = n\,(f_к - f_{отв}) / (B \times L). \quad (2.32)$$

Виходячи з умови незмінності товщини металу й заготовки, коефіцієнт розкрою $K_р$ можна подати як відношення площі, обмеженої зовнішнім контуром деталі (без площі отворів, якщо вони є), до площі листа, із якого їх штампують:

$$K_р = (n \times f_к) / (B \times L). \quad (2.33)$$

Неважко помітити, що коли деталь не має отворів ($f_{отв} = 0$), то $f = f_к$ і $K_в = K_р$.

Якщо коефіцієнт розкрою $K_р$ залежить від форми зовнішнього контуру деталей і їх взаємного розташування, то коефіцієнт використання металу $K_в$ окрім указаних факторів, залежить ще і від наявності в деталі отворів.

Коефіцієнт використання металу — головний показник, що визначає як ефективність використання металу, так і технологічність конструкції штампованої деталі. Чим він вищий, тим вища ефективність розкрою і тим більш технологічна штампована деталь.

2.4.2. Типи розкрою листового прокату, сфера їх застосування

Існує три типи розкрою листового прокату: із відходами, маловідходний і безвідходний.

У випадку *розкрою з відходами* деталь (або заготовку) одержують вирубкою по замкненому контуру. Між деталями, а також між деталями й кромкою стрічки або листа залишають перемички (рис. 2.27, *а*). Розкрій із перемичками по всьому контуру застосовують під час штампування деталей, що мають переважно криволінійні контури та підвищену точність розмірів.

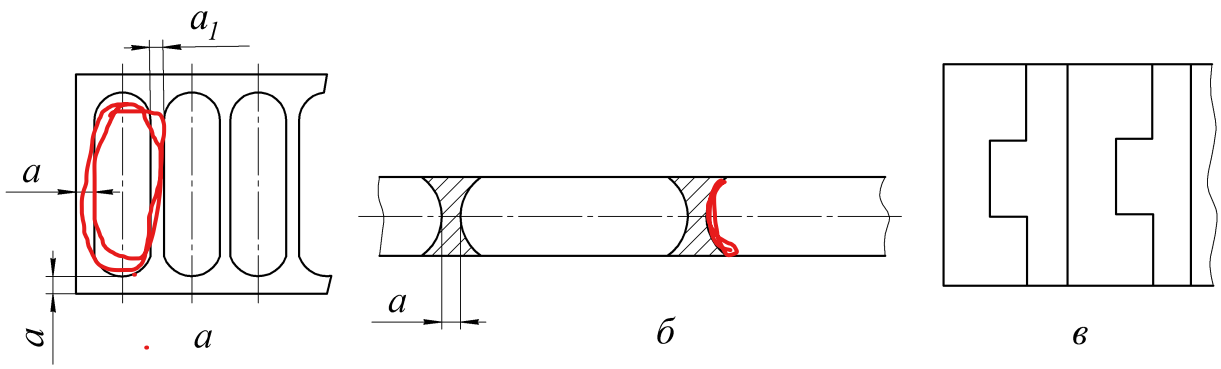


Рис. 2.27. Типи розкрою:
а – з відходом; *б* – маловідходний; *в* – безвідходний

Розрізняють два види перемичок: між краями сусідніх деталей a_1 і між краями деталі та кромкою листа або смуги a (рис. 2.27, *а*), останні називають бічними

перемичками, вони в 1,15 – 1,3 разу більші, ніж перемички між деталями. Це пояснюється можливими відхиленнями розміру стрічки по ширині (у межах допуску) і можливою непрямолінійністю її бічних кромок.

Ширина перемичок визначає $K_в$, точність розмірів деталей і стійкість пуансонів і матриць. Чим ширша перемичка, тим менший коефіцієнт $K_в$ і, отже, більше відходів. Перемички повинні бути достатньо жорсткими. За малої жорсткості вони втрачають стійкість і можуть бути втягнуті в зазор між пуансоном і матрицею, що призводить до зниження стійкості інструмента і навіть до його руйнування. Крім того, недостатня жорсткість перемичок знижує точність кроку штампування через пружне згинання за автоматичної гакової подачі або ручної подачі з упором у перемичку.

Ширина перемички залежить від товщини штампованого матеріалу і його механічних властивостей, довжини прямолінійних ділянок штампованої деталі (чим вона більша, тим пружні деформації перемички більші), конструкції штампа (особливо його упорів), конструкції автоматичної подачі стрічки в штамп та інших факторів. Її визначають за спеціальними таблицями, складеними на основі узагальнення виробничого досвіду.

Залежно від перерахованих факторів ширина перемичок змінюється від 1,0 до 3,2 мм при товщині металу, меншій 4 мм, і від 2,5 до 6,5 мм при товщині металу 4 – 10 мм [2; 5].

Маловідходний розкрій характеризується відсутністю бічних перемичок, при цьому ширина стрічки повинна дорівнювати ширині штампованої деталі. Маловідходний розкрій застосовують, наприклад, під час розкрою ланок ланцюгів пластинчастих конвеєрів у разі штампування їх зі стрічки (рис. 2.27, *б*). Коефіцієнт використання $K_в$ при маловідходному розкрої вищий, ніж у випадку штампування з відходами.

Безвідходний розкрій застосовують для штампування деталей, контури яких суміщаються один з одним. За безвідходного розкрою перемички відсутні, отже $K_в$ близький до одиниці. Прикладом безвідходного розкрою різних за формою деталей може служити розкрій заготовок віконних або дверних петель (рис. 2.27, *в*).

У разі *маловідходного і безвідходного розкрою* відбувається відрізання по незамкненому контуру на відміну від вирубки по замкненому контуру у випадку розкрою з відходами. Указана особливість спричиняє зниження стійкості інструмента у зв'язку з тим, що згинаючі моменти, які виникають під час відрізання, і розпірні зусилля взаємно не врівноважуються. У результаті цього пуансон штампа може пружно деформуватися, що зумовлене зміною зазору між пуансоном і матрицею. Збільшення зазору порівняно з оптимальним призводить до утворення торцевої задирки, а його зменшення — до зростання питомих зусиль на робочих кромках пуансона й матриці, у зв'язку з чим їх притуплення і зношення відбувається більш інтенсивно.

Розрізняють *шість основних видів розкрою деталей* (або заготовок) у стріч-

ці, сфера застосування яких визначається формою та розмірами штампованих деталей. Так, у разі штампування деталей простої геометричної форми — прямокутної, овальної — застосовують *прямий розкрій* (рис. Т–1, *а*), під час штампування деталей Г-подібної або іншої схожої форми — *нахилений розкрій* (рис. Т–1, *б*); для штампування деталей Т- і Ш-подібної форми — зу*стрічний розкрій* (рис. Т–1, *в*); у випадку штампування деталей різної форми, але однакової товщини, з одного й того ж матеріалу — *комбінований розкрій* (дрібні деталі розташовуються в проміжках між деталями великих розмірів або в кутових ділянках стрічки (листа), коли великі деталі мають круглу або овальну форму) (рис. Т–1, *г*).

Під час штампування деталей невеликих розмірів у багатосерійному та масовому виробництві застосовують *багаторядний розкрій* (рис. Т–1, *д*), у випадку штампування дрібних і дуже вузьких деталей (зокрема, стрілок годинника) з мірної штаби або стрічки — *розкрій із вирізкою перемичок* (це єдиний вид розкрою, коли штучно збільшується відхід металу з метою збільшення площі поперечного перерізу пуансона для пробивання вікон) (рис. Т–1, *е*).

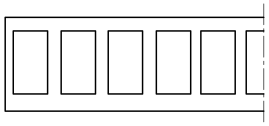
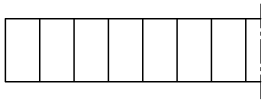
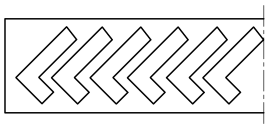
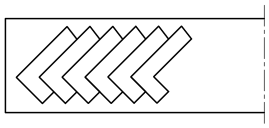
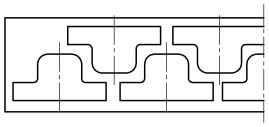
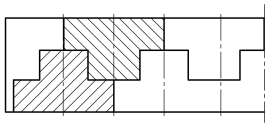
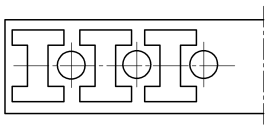
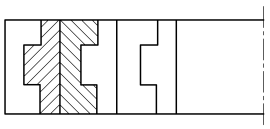
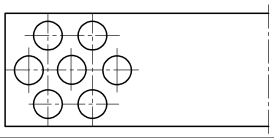
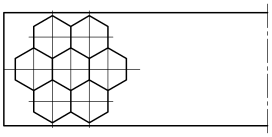
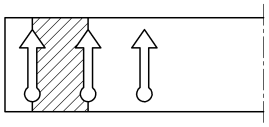
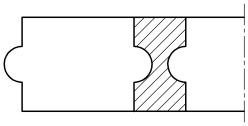
Тип розкрою		З відходами	Маловідходний і безвідходний	Тип деталі (заготовки)
а	Прямий			Із витягнутою віссю
б	Нахилений			Г-подібні
в	Зустрічний			Т- і Ш-подібні
г	Комбінований			Різної форми, однакової товщини
д	Багаторядний			Круглі, шестигранні та ін.
е	З вирізанням перемичок			Вузькі (стрілки та ін.), подовжені

Рис. Т–1. Основні види розкрою

2.4.3. Вибір виду розкрою листового прокату

Спосіб розкрою листа на штаби й стрічки так само, як і спосіб розташування деталей у штабі чи стрічці, впливає на $K_в$. Розкрій листа на штаби й стрічки виконується з урахуванням не тільки економії металу, але й технологічних факторів, а також продуктивності праці у випадку відрізання на ножицях (рис. 2.28). Так, під час розкрою листа на штаби й стрічки необхідно враховувати орієнтування подовжньої осі деталі (або заготовки) щодо напряму волокон металу. Якщо заготовки, які відрізаються чи вирубуються, піддають подальшому згинанню, то напрям волокон металу повинен бути перпендикулярний лінії вигину або в крайньому випадку має складати з нею кут, не менший 30°. У ході розкрою найдоцільніше штаби й стрічки розташовувати вздовж більшого боку листа, оскільки в разі подовжнього відрізання продуктивність більша, ніж у випадку поперечного. Проте подовжнє відрізання не завжди забезпечує якнайкраще використання металу і є незручне в роботі (довга штаба чи стрічка більше провисає, ніж коротка).

Наступний етап розрахунку $K_в$ — визначення кількості деталей у штабі чи стрічці для різних способів розкрою за подовжнього і поперечного відрізання листа на штаби і стрічки.

Вибір найраціональнішого виду розкрою здійснюється дослідно-графічним або розрахунковим (аналітичним) шляхом. Дослідно-графічний спосіб застосовують у дрібносерійному виробництві під час розкрою деталей (або заготовок) складної форми.

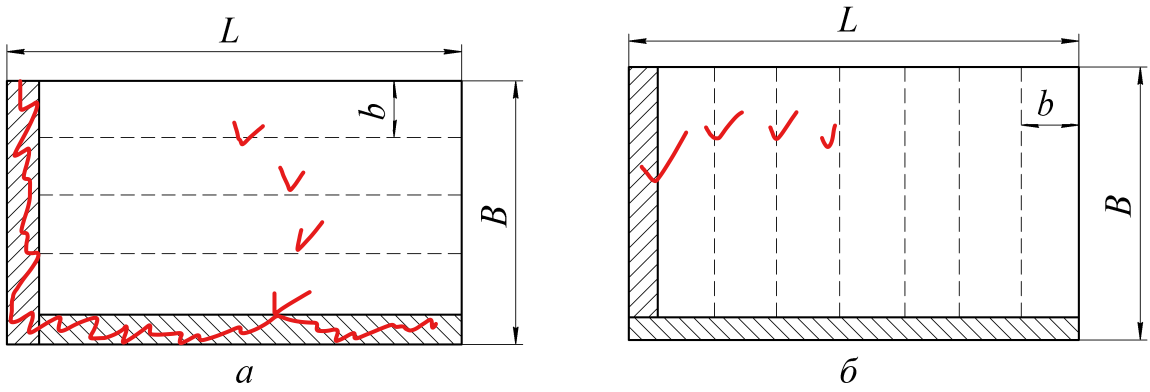


Рис. 2.28. Варіанти розрізання листа розміром $B \times L$ на штаби чи стрічки шириною b:
а – поздовжнє; *б* – поперечне

Для знаходження оптимального розкрою вирізають 2 – 3 шаблони штампованої деталі з паперу або картону. Цим шаблонам надають різноманітного взаємного розташування в штабі чи стрічці, шукають таке, за якого відхід матеріалу буде якнайменшим. Остаточно встановлюючи ширину штаби чи стрічки й крок штампування, враховують подовжні та бічні перемички. Розрахунковий (аналітичний) спосіб визначення розкрою може бути застосований лише в тому випадку, коли встановлений функціональний зв'язок між параметрами розкрою і коефіцієнтом використання металу $K_в$.

3. ФОРМОУТВОРЮЮЧІ ОПЕРАЦІЇ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ

3.1. Згинання

3.1.1. Стадії згинання, розподіл деформацій і напружень по товщині заготовки

Згинання — це операція листового штампування, що дозволяє одержувати зігнуті просторові деталі з плоскої або профільної заготовки. На рис. 3.1 показані різні схеми згинання плоского матеріалу: вільне без калібрування (*а*), з притиском на кут α_n (*б*), із правкою (*в*).

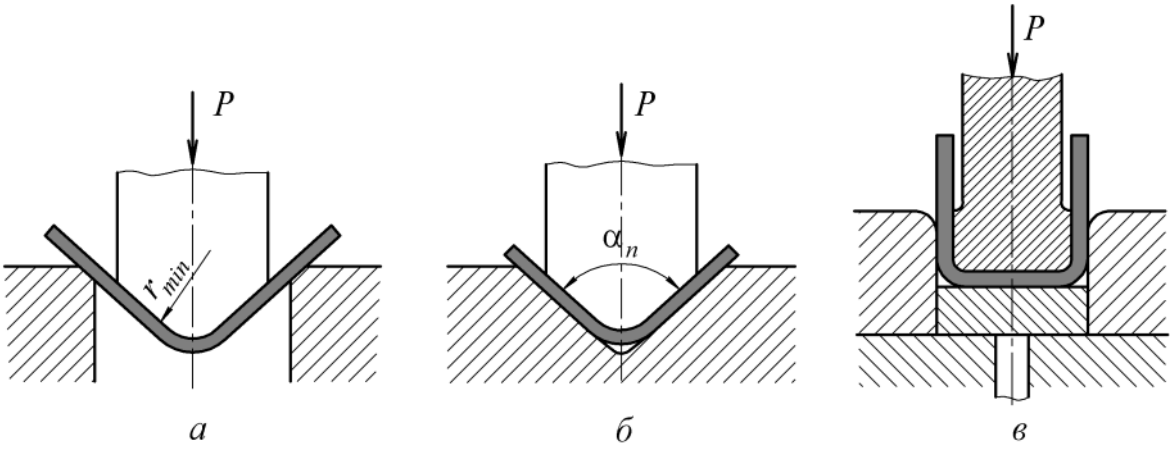


Рис. 3.1. Схеми згинання

Згинання виконується на кривошипних і гідравлічних пресах, валкових листозгинальних машинах, спеціальних профілезгинальних машинах для згинання з розтягуванням, а також на універсальних згинальних автоматах.

У машинобудуванні найчастіше здійснюють згинання в штампах, встановлених на кривошипних пресах.

Під час згинання в штампах на заготовку одночасно діють пуансон і матриця, причому точки прикладення сил *P* і *Q* знаходяться на певній відстані одна від одної (рис. 3.2). Сили *P* і *Q* утворюють згинаючий момент, достатній для виконання формозміни. У процесі згинання кривизна ділянки заготовки, що деформується, збільшується, при цьому одночасно відбувається розтягування зовнішніх і стиснення внутрішніх шарів. У міру зменшення радіуса згинання пластична деформація охоплює всю товщину заготовки. Форма зони пластичної деформації і її протяжність при згинанні на кут $\alpha = 90°$ складає близько однієї чверті плеча згинання (рис. 3.2).

Після згинання форма й розміри поперечного перерізу заготовки в зоні пластичної деформації змінюються. Ці зміни тим більші, чим менший радіус згинання.

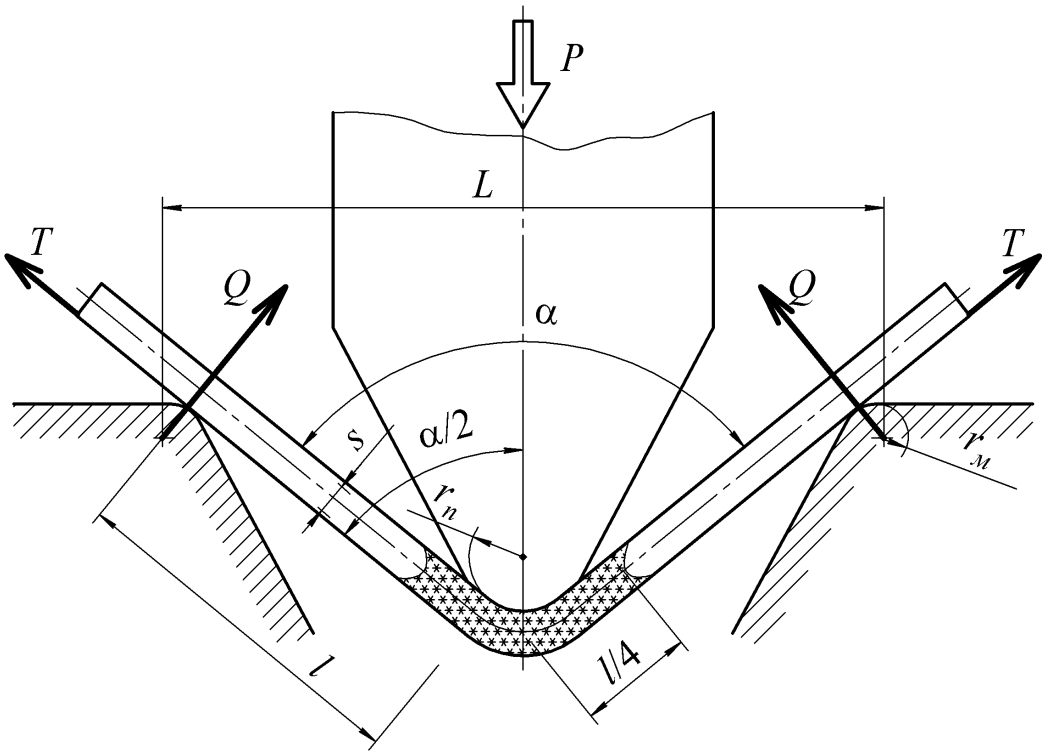


Рис. 3.2. Схема дії сил під час згинання в штампі

Зміни поперечного перерізу заготовки відбуваються внаслідок того, що пластична деформація в коловому напрямі відповідно до умови незмінності об'єму супроводжується пластичними деформаціями протилежного знака в одному або двох взаємно перпендикулярних напрямах — радіальному й аксіальному. При згинанні стрічки на ребро спочатку прямокутна форма поперечного перерізу перетворюється на трапецієподібну (рис. 3.3, *а*), висота перерізу в зоні пластичної деформації зменшується. У разі згинання широкої смуги або листа форма поперечного перерізу в зоні пластичної деформації змінюється неістотно, зменшується лише її товщина *s* (рис. 3.3, *б*).

Напружений стан зони пластичної деформації під час згинання характеризується нормальними напруженнями σ_θ в коловому напрямі та нормальними напруженнями σ_ρ — у радіальному, останні виникають унаслідок натиску подовжніх шарів заготовки один на одного (рис. 3.3, *а, б*).

У процесі згинання широкої заготовки виникають також нормальні напруження σ_a в аксіальному (осьовому) напрямі. Їх виникнення пояснюється пружною зміною форми і розмірів елементарної (за шириною) ділянки заготовки, що знаходиться на деякій відстані від її країв (рис. 3.3, *б*). Під час згинання широкої заготовки (на відміну від згинання на ребро стрічки) аксіальні деформації зустрічають опір сусідніх щодо елементарної ділянки шарів металу, який і викликає появу аксіальних напружень σ_a. У зоні розтягнення аксіальні напруження розтягальні, у зоні стиснення — стискаючі (рис. 3.3, *б*). Таким чином, у разі згинання широкої смуги напружений стан є *об'ємний*.

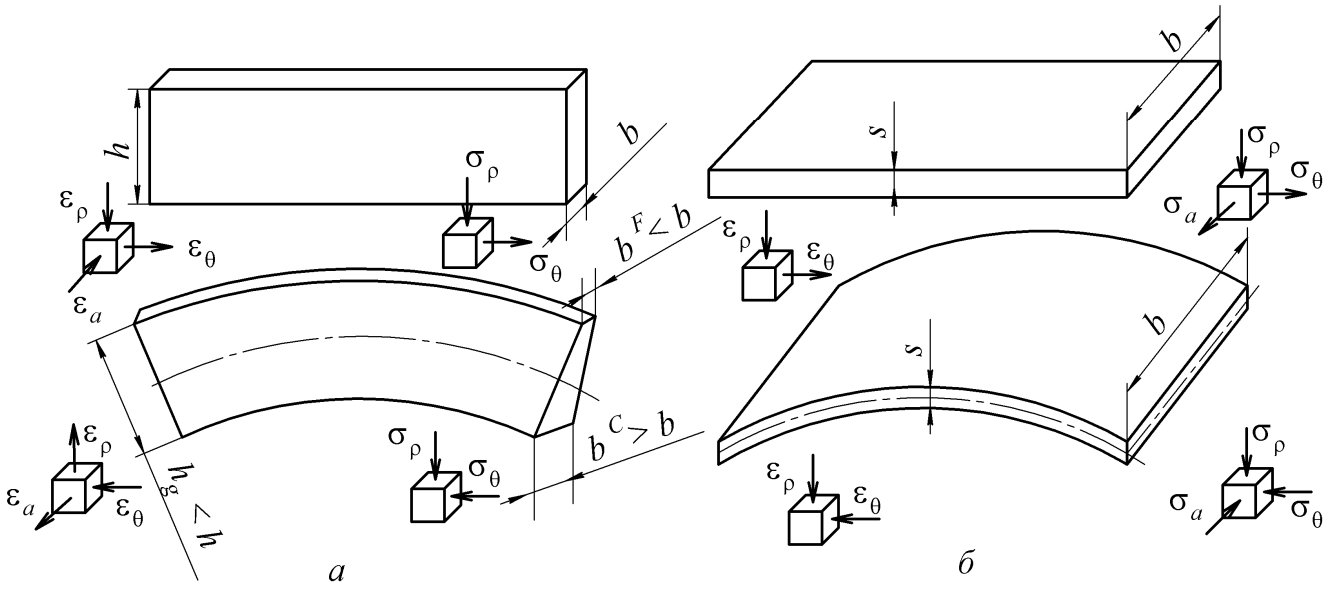


Рис. 3.3. Схема згинання вузької (*а*) і широкої (*б*) смуг металу

У випадку згинання вузької металевої смуги аксіальні напруження малі порівняно з напруженнями текучості, тому ними можна нехтувати ($\sigma_a \approx 0$). Це дозволяє вважати, що під час згинання на ребро вузької смуги напружений стан *плоский*.

Значення і характер розподілу напружень, що виникають у зоні пластичної деформації, залежать від радіуса кривизни заготовки, що згинається. На початковій стадії її радіус кривизни великий, заготовка деформується тільки пружно, дана стадія згинання називається *пружною*.

У міру зменшення радіуса згинання периферійні шари заготовки починають деформуватися пластично, оскільки значення колових напружень σ_θ, що виникають у цих шарах, досягає напруження текучості. Цю стадію називають *пружно-пластичною*. Епюра розподілу напружень σ_θ показана на рис. 3.4, *а*.

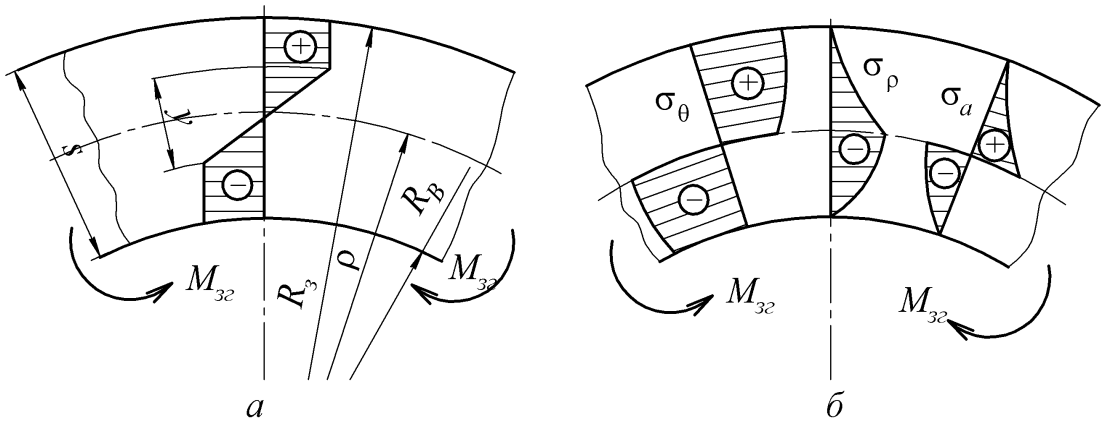


Рис. 3.4. Епюри напружень по товщині заготовки на стадіях:
а – пружно-пластичній; *б* – пластичній

За подальшого зменшення радіуса вигину пластична зона росте, а пружна — зменшується і при відносному внутрішньому радіусі вигину $R_в/s$ майже весь поперечний переріз заготовки знаходиться в пластичному стані, починається суто пластична стадія згинання. На цій стадії відбувається помітний зсув нейтральної поверхні в бік стиснених волокон заготовки, який збільшується зі зменшенням радіуса вигину. Епюри напружень σ_θ, σ_ρ і σ_a по товщині заготовки на стадії суто пластичного згинання показані на рис. 3.4, *б*.

Енергосилові характеристики згинання (згинаючий момент, деформуюче зусилля), так само як і пружні деформації заготовки, що виникають після зняття навантаження, визначають відповідно до стадії згинання, оскільки в міру зменшення радіуса вигину змінюються напружено-деформований стан осередку деформації, значення напружень, що виникають, і радіус кривизни нейтральної поверхні.

3.1.2. Розміри листових заготовок під час згинання

Довжину заготовки, необхідну для одержання зігнутої деталі з необхідними розмірами, визначають з умови рівності її довжини довжині нейтральної поверхні деформацій $L_{нпд}$ (поверхні, на якій відсутні деформації).

Для встановлення довжини заготовки контур деталі розбивають на прямолінійні та криволінійні ділянки з постійними радіусами кривизни. Довжину заготовки розраховують як суму довжин прямолінійних і криволінійних ділянок, причому довжину криволінійних ділянок підраховують за нейтральною поверхнею деформацій:

$$L_{заг} = L_{нпд} = \sum l_i + \sum \frac{\pi \alpha_i}{180} \rho_{\partial i}\,, \qquad (3.1)$$

де l_i – довжина прямолінійних ділянок; $\rho_{\partial i}$ – радіус нейтральної поверхні деформацій криволінійних ділянок.

Встановлення довжини заготовки, по суті, зводиться до знаходження радіуса нейтральної поверхні, а вже потім — до визначення її довжини.

На стадіях пружно-пластичного і плоского суто пластичного згинання, коли радіус згинання відносно великий, нейтральна поверхня деформацій проходить через центр ваги поперечного перерізу заготовки.

Якщо поперечний переріз товщиною s прямокутний, $\rho_\partial = R_{вн} + s/2$, де $R_{вн}$ – внутрішній радіус заготовки, що згинається.

У розглянутому випадку довжину заготовки визначають шляхом розгортки криволінійних ділянок деталі по поверхні, що проходить через центр ваги її поперечного перерізу.

На стадії об'ємного суто пластичного згинання, як це встановлене в теорії обробки металів тиском, нейтральна поверхня деформацій зміщується щодо серединної в бік стиснених волокон заготовки, причому цей зсув тим більший, чим

менший радіус згинання. Це явище необхідно враховувати, визначаючи довжину заготовки.

Радіус кривизни нейтральної поверхні напружень під час згинання можна знайти з умови рівності найбільших радіальних стискаючих напружень на цій поверхні:

$$\rho_0 = \sqrt{R_з R_{вн}} = \sqrt{(R_{вн} + s)R_{вн}}, \qquad (3.2)$$

де ρ_0 – радіус нейтральної поверхні напружень; $R_з$ і $R_{вн}$ – зовнішній і внутрішній радіуси заготовки, що згинається, відповідно. Зміцнення, що виникає під час згинання заготовки в холодному стані, на величину ρ_0 впливає неістотно.

Формулу (3.2) вперше одержали І. П. Ренне і Р. Хілл незалежно один від одного. Її можна застосовувати для визначення радіуса нейтральної поверхні деформацій. Розрахунки за формулою (3.2) показують, що при $R_{вн} = s$ $\rho_0 = 1{,}4s$, а при $R_{вн} = 5s$ $\rho_0 = 5{,}5s$. У першому випадку нейтральна поверхня зміщена щодо серединної на відстань $0{,}1s$ у бік стиснених волокон, у другому випадку вона збігається з серединною поверхнею.

Радіуси кривизни нейтральної поверхні деформацій можна обчислити за допомогою коефіцієнта зсуву нейтральної поверхні x, значення якого залежить від відносного радіуса згинання $r = R_{вн}/s$ [5]. Коефіцієнт зсуву нейтральної поверхні тим більший, чим більший відносний радіус згинання. При $r = 0{,}1$ $x = 0{,}3$, а при $r = 5$ $x = 0{,}5$. Знаючи x, можна визначити радіус кривизни нейтральної поверхні деформацій:

$$\rho_д = R_{вн} + xs. \qquad (3.3)$$

Із наведених даних випливає, що зі зменшенням радіуса заготовки $R_{вн}$ положення нейтральної поверхні деформацій зміщується в бік стиснених волокон, вона збігається з серединною поверхнею при $R_{вн} \geq 5s$, оскільки при цьому $x = 0{,}5$.

Знаючи положення нейтральної поверхні деформацій, можна визначити довжину цієї поверхні, а отже, і довжину заготовки, необхідну для одержання зігнутої деталі з необхідними розмірами.

*Зміна розмірів і форми поперечного перерізу заготовки в зоні вигину***.** Особливо істотної зміни форми і розмірів зазнає поперечний переріз стрічки, що згинається на ребро; спочатку прямокутний поперечний її переріз перетворюється після згинання на трапецеїдальний. Під час згинання широкої смуги помітно змінюється лише її товщина. Формули для обчислення ширини поперечного перерізу стрічки після згинання в будь-якому її перерізі на відстані ρ від центру кривизни мають вигляд:

– у зоні розтягнення: $b_\rho^p = b(\rho_0/\rho)^{\frac{1}{2(2-\rho/R_з)}}$; (3.4)

– у зоні стиснення: $b_\rho^c = b(\rho_0/\rho)^{\frac{3}{2\sqrt{R_{вн}/\rho}}} - 1$; (3.5)

– при $\rho = R_з$: $$b_{min} = b\sqrt{\rho_0 / R_з}\,; \tag{3.6}$$

– при $\rho = R_{вн}$: $$b_{min} = b\sqrt{\rho_0 / R_{вн}}\,. \tag{3.7}$$

При $\rho = \rho_0$, як і слід було чекати, $b_\rho = b$. Наведені формули (3.4) і (3.5) одержані в результаті сумісного розв'язання рівнянь зв'язку між напруженнями і деформаціями, рівнянь рівноваги, пластичності й незмінності об'єму [6; 8].

Стоншення листової заготовки в зоні пластичної деформації під час згинання приблизно можна визначити так [3]:

$$s - s_д = \Delta s = \frac{s^2}{4(2R_{вн} + s)^2}\,. \tag{3.8}$$

Розрахунки за цією формулою показують, що стоншення стає помітним при малих радіусах вигину, наприклад при $R_{вн} = 2s$ значення Δs складає близько 1 % товщини заготовки.

Товщина листової заготовки в зоні пластичної деформації після згинання може бути визначена й на основі експериментальних даних як добуток коефіцієнта зменшення товщини η та первинної (до згинання) товщини заготовки s:

$$s_д = \eta s\,. \tag{3.9}$$

Залежно від значення відносного радіуса вигину коефіцієнт η змінюється під час згинання смуг на кут 90° зі сталей 10 і 20 від 0,82 при r = 0,1 до 0,99 при r = 4,0 [5].

Звідси випливає, що при відносному радіусі $r > 4{,}0$ зменшення товщини заготовки практично відсутнє, що добре узгоджується з теоретичними даними.

3.1.3. Енергосилові характеристики згинання

Згинаючий момент, необхідний для гнуття заготовки, визначається як сума моментів, створюваних у зонах розтягнення і стиснення коловими напруженнями σ_θ щодо центру кривизни заготовки (рис. 3.5):

$$M = M^p + M^c = b\int_{\rho_0}^{R_з}\sigma_\theta^p \rho d\rho + b\int_{R_{вн}}^{\rho_0}(-\sigma_\theta^c)\rho d\rho\,. \tag{3.10}$$

Якщо припустити, що на стадії плоского суто пластичного згинання широкої заготовки нормальні напруження σ_θ в зонах розтягнення і стиснення постійні по її товщині і відповідно дорівнюють $\sigma_\theta^p = \beta\sigma_s$, $-\sigma_\theta^c = \beta\sigma_s$, а нейтральна поверхня напружень збігається з серединною і $\rho_д = R_{вн} + 0{,}5s = 0{,}5\,(R_{вн} + R_з)$, то згинаючий момент дорівнюватиме

$$M = \beta b\int_{\rho_0}^{R_з}\sigma_\theta^p \rho d\rho + \beta b\int_{R_{вн}}^{\rho_0}(-\sigma_\theta^c)\rho d\rho = \beta\sigma_s b s^2/4 = 1{,}5\beta W\sigma_s\,, \tag{3.11}$$

де W – момент опору поперечного перерізу заготовки; $\beta = 1 \div 1{,}15$ – змінний коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження на умову переходу

металу в пластичний стан, яка досягає найбільшого значення при плоскому деформованому стані (коефіцієнт Лоде).

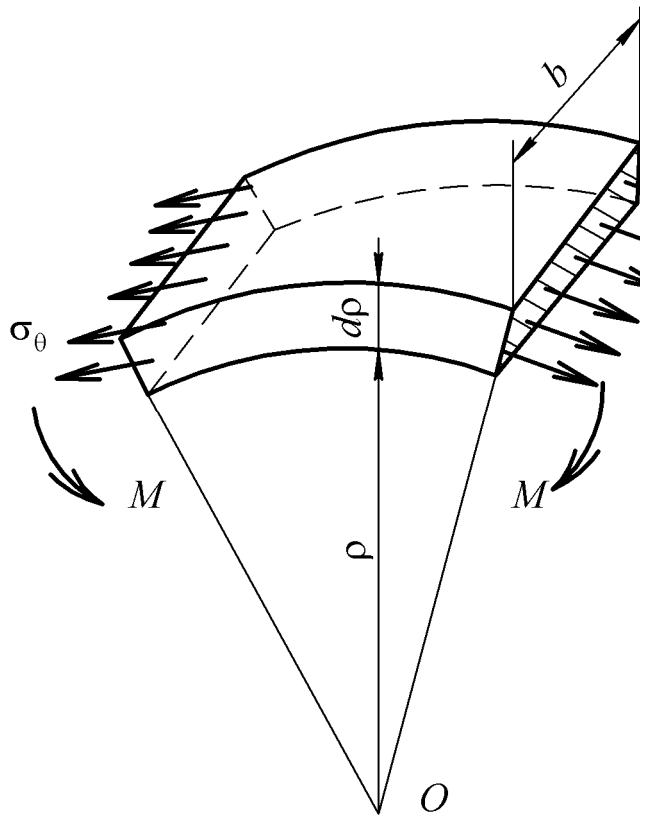


Рис. 3.5. Схема до визначення згинаючого момента

На стадії об'ємного суто пластичного згинання нормальні напруження σ_θ змінні по товщині заготовки і нейтральна поверхня зміщена в бік стиснених волокон, проте згинаючий момент залишається незмінним і визначається за формулою (3.11). Таким чином, вид напруженого стану осередку деформації під час згинання, як і зсув нейтральної поверхні, не робить впливу на значення згинаючого моменту.

У разі об'ємного суто пластичного згинання зменшується товщина заготовки в зоні деформації, і це приводить до зменшення згинаючого моменту тим більшою мірою, чим менший радіус гнуття. При $R_{вн} = s$ згинаючий момент зменшується приблизно на 10 %.

На стадії пружно-пластичного згинання (див. рис. 3.3, *а*), коли зона пружних деформацій порівнянна із зонами пластичної деформації, згинаючий момент визначають як суму моментів, що діють у пружній і пластичній зонах:

$$M = M_y + M_{пл} = \frac{by^2}{6}\beta\sigma_s + \frac{b}{4}(s^2 - y^2)\beta\sigma_s = \frac{bs^2}{12}\beta\sigma_s\left[3 - \left(\frac{y}{s}\right)^2\right], \qquad (3.12)$$

де y – висота пружної зони деформації.

Формула (3.12) при $y = s$ перетворюється на формулу для визначення згинаючого моменту для пружної стадії згинання $M = \beta\sigma_s s^2/6$, а при $y = 0$ – на формулу для розрахунку згинаючого моменту для суто пластичного згинання (3.11).

3.1.4. Пружні деформації під час згинання, способи їх зменшення

Пружні деформації в разі згинання однокутних деталей. Пластичне згинання, як і інші види пластичної деформації, супроводжується пружними деформаціями, які викликають зміну форми та розмірів заготовки, зокрема радіуса кривизни і кута між прямолінійними ділянками заготовки (рис. 3.6). Це пояснюється тим, що під час розвантаження шари заготовки, що знаходяться в зоні розтягнення, унаслідок пружної деформації коротшають, а шари, які знаходяться в зоні стиснення, подовжуються.

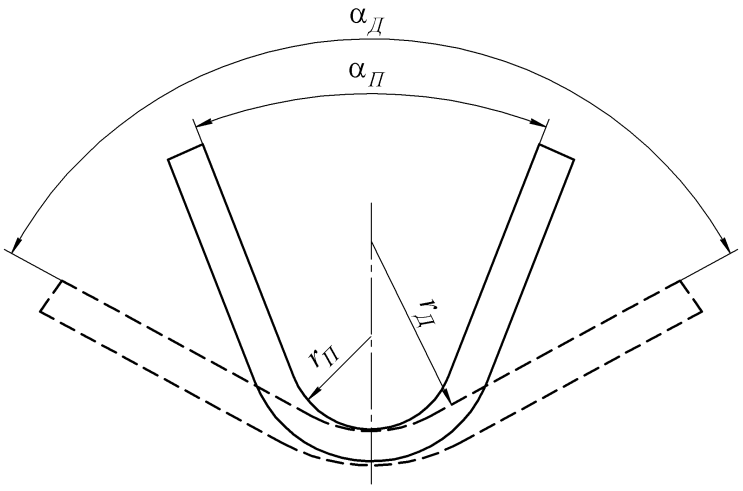


Рис. 3.6. Схема пружних деформацій при згинанні:
$r_П$, $\alpha_П$ – радіус згинання і кут згинання пуансона; $r_Д$, $\alpha_Д$ – радіус згинання і кут згинання деталі

Різнойменні пружні деформації в зонах розтягнення і стиснення викликають поворот поперечних перерізів заготовки на так званий *кут пружності* $\Delta\alpha$, унаслідок чого відбувається зміна радіуса її кривизни і, отже, кута вигину. Пружні деформації (пружність) слід враховувати, обчислюючи розміри інструментів для згинання. Це дозволяє усунути трудомісткі операції ручної правки після штампування. Якщо відоме значення пружності, що характеризується зміною радіуса згинання Δr і зміною кута згинання $\Delta\alpha$, то розміри інструментів (пуансона і матриці) визначають за такими залежностями:

$$r_n = r_д - \Delta r; \tag{3.13}$$

$$\alpha_з = \alpha_д \pm \Delta\alpha. \tag{3.14}$$

Найпростіший розв'язок задачі визначення пружних деформацій за суто пластичного згинання широкої смуги з ізотропного матеріалу, що не зміцнюється, при досить великому радіусі згинання (коли впливом радіальних стискаючих напружень σ_ρ можна знехтувати, зважаючи на відносно малу їх величину), був одержаний у праці [4]:

$$\Delta\alpha = 3\frac{P}{E}\left(\frac{r_n}{s}+1\right)\alpha_з, \tag{3.15}$$

де $\alpha_з$ – кут згинання, який дорівнює $180° - \alpha$.

Способи зменшення пружних деформацій під час згинання. Один зі способів зменшення пружних деформацій під час згинання однокутних деталей полягає в конструктивних змінах гнутих деталей, а саме в проектуванні ребер жорсткості, які перетинають лінію вигину. Ребра жорсткості стримують пружні деформації деталі при розвантаженні, чим сприяють зменшенню кута пружності.

Інший спосіб зменшення пружних деформацій у процесі згинання полягає в застосуванні спеціальних машин і штампів, за допомогою яких заготовка не тільки згинається, але й розтягується (або стискається) подовжніми силами. Один зі способів зменшення пружних деформацій під час згинання двокутних деталей — це зменшення зазору між пуансоном і матрицею. Кут пружності істотно зменшується в разі згинання в штампах із зазором, меншим товщини заготовки ($z = 0{,}9s$). Проте при цьому виникає високий нормальний тиск на інструмент, що призводить до налипання металу і, отже, до появи задирок. Для запобігання цьому слід застосовувати мастильні матеріали з наповнювачем і хромувати інструмент.

3.1.5. Мінімально допустимий радіус згинання

Мінімально допустимий радіус згинання визначають з умови збереження стійкості периферійних шарів заготовки, що згинається. У разі згинання широкої заготовки втрата стійкості призводить зрештою до появи тріщин у зоні розтягнення, у випадку згинання на ребро стрічки — до виникнення тріщин у зоні розтягнення або складок у зоні стиснення.

Мінімально допустимий радіус згинання залежить від характеристик пластичності й анізотропії матеріалу заготовки, її товщини, якості поверхні, стану кромок. Крім того, на значення мінімально допустимого радіуса згинання впливають спосіб згинання, кут згинання і ширина заготовки.

У науково-технічній літературі опублікована велика кількість формул для визначення мінімально допустимого радіуса згинання. Зокрема, формула, яка ґрунтується на припущенні, що допустимий ступінь деформації периферійного шару в зоні розтягнення не перевищує відносної рівномірної деформації під час розтягування, має вигляд

$$r_{min} = r_{min} / s \geq (1 - 2\psi_p), \tag{3.16}$$

де ψ_p – рівномірне звуження зразка в процесі розтягування.

На значення мінімально допустимого радіуса згинання впливає ширина заготовки: чим вона більша, тим більший мінімально допустимий радіус згинання. Це пояснюється тим, що зі збільшенням ширини заготовки в зоні розтягнення збільшуються осьові (аксіальні) розтягальні напруження σ_a, у зв'язку з чим знижується пластичність металу, що характеризується значенням деформації в момент руйнування. Аксіальні розтягальні напруження σ_a розподіляються по ширині заготовки нерівномірно: біля краю вони дорівнюють нулю, а в середині досягають максимуму. Цим можна пояснити появу тріщин під час згинання посередині дета-

лі, а не коло її краю, а також появу сідловини в зоні вигину деталі.

На значення мінімально допустимих радіусів згинання впливає спосіб установлення заготовки в штамп. Якщо заготовку, одержану вирубкою, встановити в штамп задирками до пуансона, то під час згинання вони стискатимуться і навіть при малих радіусах згинання тріщини не з'являться. У разі встановлення заготовки задирками до матриці останні розтягуються (розкриваються), з'являються тріщини.

Експериментально встановлено, що для більшості матеріалів, широко використовуваних у машинобудуванні, мінімально допустимий радіус згинання змінюється від 0 до 8 товщин заготовки [5].

3.1.6. Згинання профілів і труб

Використання гнутих профілів із листового й штабового прокату замість профілів, одержаних безпосередньо гарячою прокаткою, дозволяє істотно знизити масу деталей і складальних одиниць машин, що виготовляються з них.

Гнуті профілі (рис. 3.7), форма та розміри яких регламентовані державними стандартами, можуть бути виготовлені згинанням в універсальних штампах, установлюваних на листозгинальних пресах, листозгинальних машинах із поворотною балкою та профілезгинальних верстатах.

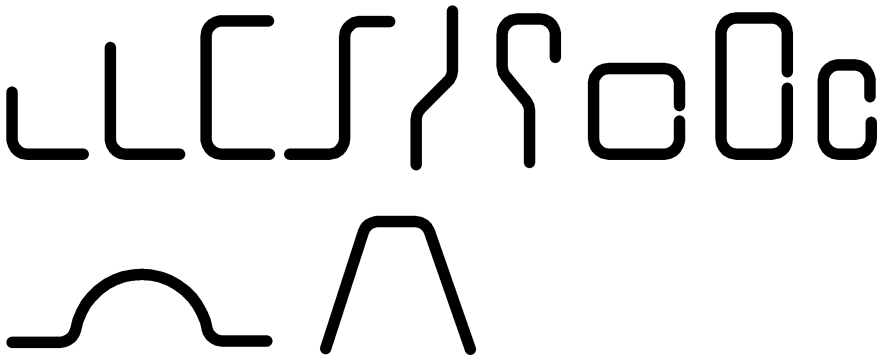


Рис. 3.7. Варіанти поперечних перерізів гнутих профілів

Сфера застосування того або іншого способу виготовлення гнутих профілів залежить від форми, розмірів, товщини вихідного матеріалу і масштабів виробництва.

У дрібносерійному виробництві гнуті профілі середніх і великих розмірів виготовляють послідовно поелементним згинанням на листозгинальних пресах і листозгинальних машинах спеціального призначення (рис. 3.8, операції *1 – 8*). У масовому й багатосерійному виробництві (наприклад, виробництво легкових автомобілів) тонкостінні гнуті профілі невеликих розмірів виготовляють на профілезгинальних верстатах.

Сортамент гнутих профілів складається з сортових, листових гофрованих профілів і профілів спеціального призначення, виготовлених із рулонних заготовок завтовшки 0,5 – 8 мм і шириною 30 – 1 500 мм із вуглецевих і низьколегова-

них сталей з тимчасовим опором до 650 МПа. Ефективність використання гнутих профілів замість профілів, одержаних гарячою прокаткою, очевидна. Технологія виготовлення гнутих профілів викладена в працях [4; 7].

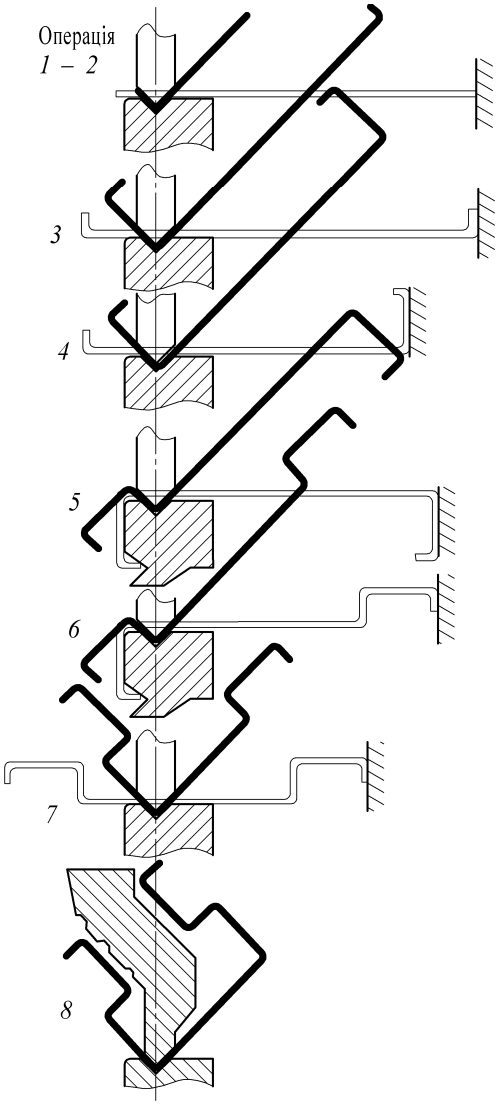


Рис. 3.8. Приклад поелементного послідового згинання

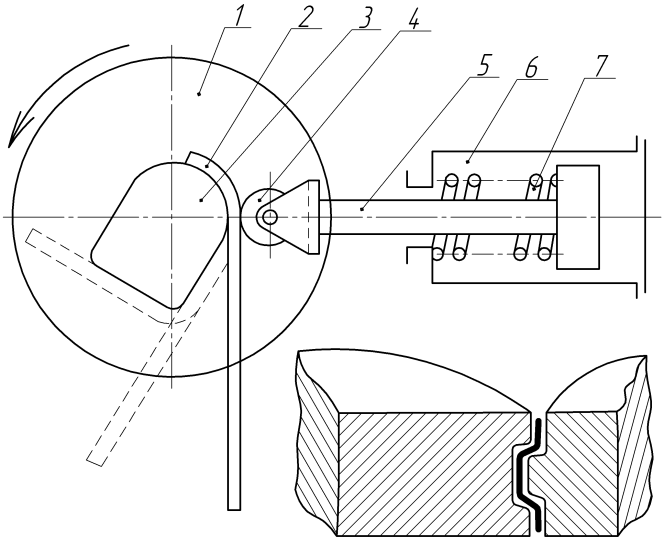


Рис. 3.9. Схема машини з поворотним столом для згинання профільних заготовок

Згинання профільованих заготовок і труб із відносно малою товщиною стінки ускладнюється через можливу втрату стійкості (складкоутворення) у зоні стиснення або зміну кута між полицями гнутих профілів, а також у разі великих радіусів кривизни вигину — значною пружною деформацією (пружністю). Тому під час згинання профільованих заготовок, сортового металопрокату, гнутих профілів і труб застосовують спеціальні прийоми і устаткування.

Для *згинання тонкостінних гнутих профілів* широко використовують *згинальні машини з поворотним столом* (рис. 3.9), що працюють за принципом намотування. Ця машина має поворотний стіл *1* і пневматичний або гідравлічний циліндр *6*, на штоку поршня *5* закріплений натискний ролик (або натискна колодка) *4*. На столі машини встановлений шаблон *3*, форма і розміри якого відповідають

внутрішньому контуру деталі, що згинається. Заготовка одним кінцем закріплюється на шаблоні затискачем *2*, після чого стіл машини починає повертатися й намотувати на шаблон заготовку, яка протягом усього процесу згинання притискається до шаблона роликом або колодкою. Після вимкнення тиску в циліндрі колодка (або ролик) відсовується в початкове положення під дією пружини *7*.

Згинання з розтягуванням полягає в тому, що крім зовнішнього згинаючого моменту до заготовки прикладаються подовжні розтягальні сили, які зменшують згинаючий момент. При цьому точність розмірів зігнутої деталі, залежна від її пружних деформацій, підвищується пропорційно зменшенню згинаючого моменту. Для згинання з розтягуванням використовують спеціальні профілезгинальні машини з розтягуванням різних моделей.

Згинання труб на відносно малі радіуси має свої особливості, пов'язані з втратою стійкості, що призводить до складкоутворення в зоні стиснення. Критичний радіус згинання, при якому заготовка знаходиться на межі втрати стійкості, залежить від відносної товщини стінки труби, механічних властивостей її матеріалу, радіуса згинання, допустимого стоншення стінки, допустимої овальності поперечного перерізу труби в зоні вигину й ін. Приблизно відносний критичний радіус згинання труби, при якому відсутні складки, можна визначити за емпіричною формулою:

$$\bar{r} = r_{min} / D_з \cong 9{,}25\sqrt{0{,}2 - s / D_з}\,, \qquad (3.17)$$

де $D_з$ – зовнішній діаметр труби; s – товщина стінки труби.

Розрахунок за цією формулою показує, що за зміни відносної товщини стінки s/D_0 від 0,01 до 0,1 відносний критичний радіус згинання труби змінюється від 4,1 до 3,0.

Окрім складкоутворення під час згинання труб відбувається зміна форми її поперечного перерізу, що можна розглядати як один із видів втрати стійкості, коли спочатку круглий поперечний переріз стає овальним.

За необхідності згинання труб на радіуси, менші критичних, застосовують різні способи згинання, до яких належить *згинання намотуванням з оправкою-дорном* (рис. 3.10), що знаходиться всередині труби.

Заготовка у вигляді відрізка труби надівається на оправку-дорн *2* до упора, встановленого на необхідний розмір, і закріплюється в канавці шаблона *1* за допомогою затискних колодок *4*. Після ввімкнення машини шаблон *1* повертається на необхідний кут згинання й зупиняється, при цьому заготовка намотується на шаблон і одночасно знімається з дорна-оправки *2*, жорстко закріпленої на станині машини. Натискна колодка *3*, захоплювана силою тертя, переміщається разом із прямолінійною ділянкою труби, підтримуючи її і притискуючи до шаблона *1*. Профіль робочої канавки ролика-шаблона *1* виконується напівкруглим із невеликими ребрами, що виступають за півколо. Канавка-струмок такої форми перешкоджає збільшенню ширини поперечного перерізу труби, що згинається.

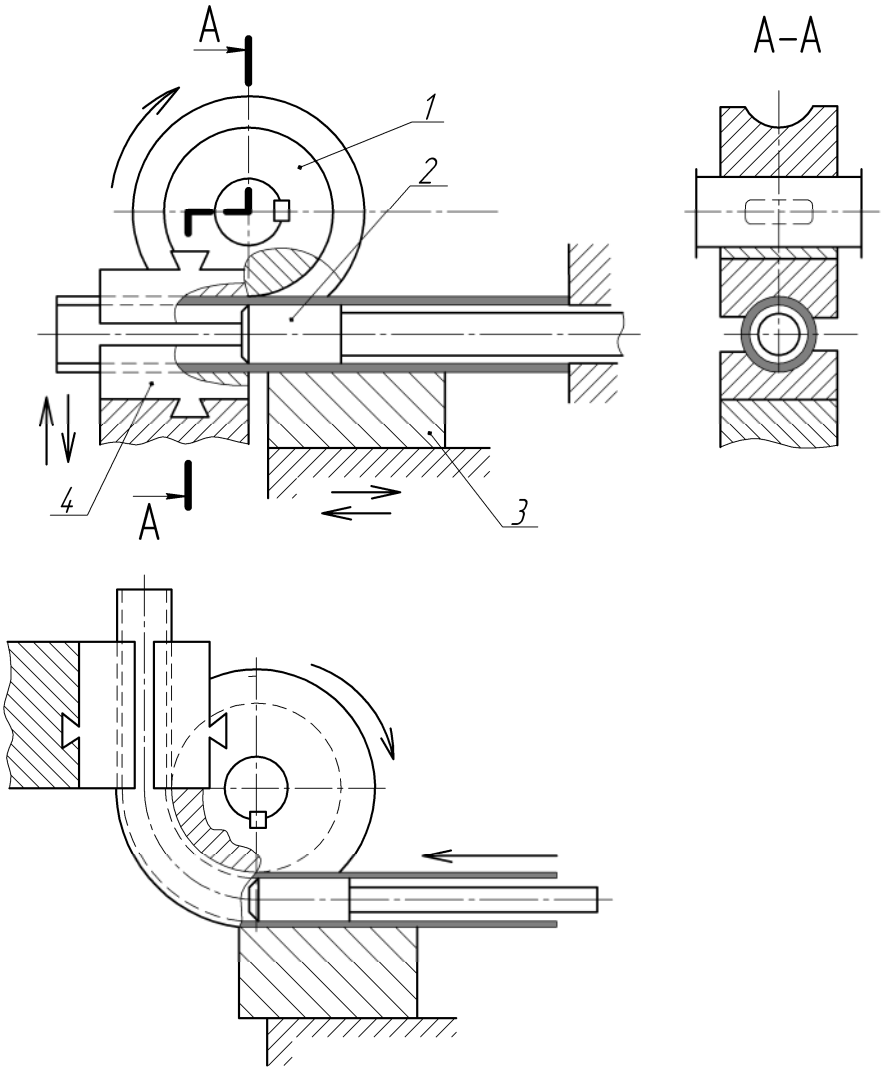


Рис. 3.10. Згинання труб намотуванням з оправкою-дорном

3.2. Витяжка

3.2.1. Способи витяжки

Витяжкою одержують порожнисті деталі різноманітної форми з плоских листових або порожнистих тонкостінних заготовок, що не потребують, як правило, подальшої обробки, окрім обрізання нерівного краю або технологічного припуску. До них належать деталі:

– що мають форму тіл обертання (вісесиметричні деталі): днища різних циліндричних резервуарів, днища баків й елементи аеродинамічних обтічників виробів ракетно-космічної техніки, металевий посуд, деталі освітлювальної апаратури (наприклад, автомобільних фар) і под.;

– коробчастої форми: паливні баки двигунів внутрішнього згоряння, бідони

для паливно-мастильних матеріалів, тара для продуктів консервного виробництва й ін.;

– які мають одну вісь симетрії або є асиметричні, наприклад деталі кузовів автомобілів, зокрема дах, крила, двері, капот та ін.;

– циліндричні, у яких товщина дна більша товщини стінок: заготовки для сильфонів трубопроводів виробів ракетно-космічної техніки, артилерійські гільзи та гільзи стрілецької зброї, металевий посуд із товстим дном та ін.

Перераховані деталі можуть мати діаметр (або довжину) від кількох міліметрів до кількох метрів і товщину стінки від десятих часток до десятків міліметрів.

Деталі, одержувані витяжкою, залежно від відносної висоти штампують в одну або декілька операцій (або переходів). На першому переході плоску заготовку витягають у порожнисту, відкриту з одного кінця деталь (або в напівфабрикат) (рис. 3.11, *а*); на подальших переходах відбувається збільшення висоти за одночасного зменшення поперечних розмірів напівфабрикатів, одержаних на попередніх переходах витяжки (рис. 3.11, *б*).

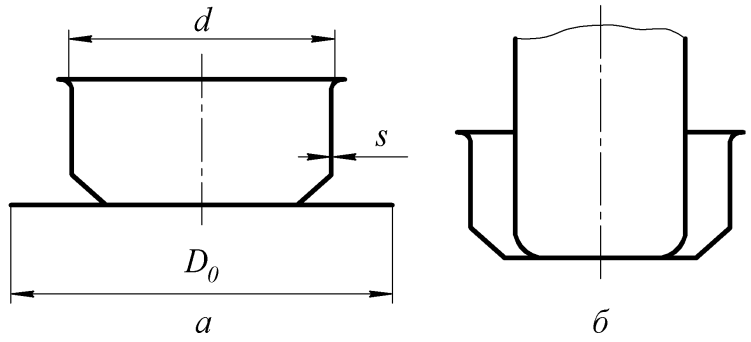


Рис. 3.11. Переходи витяжки:
а – перший; *б* – подальший

Виготовлення деталей витяжкою здійснюється без нагрівання заготовки. Виняток — витяжка товстолистового металу (завтовшки понад 20 мм), коли заготовку нагрівають для того, щоб знизити деформуюче зусилля. У разі витяжки заготовок з алюмінієвих сплавів для підвищення ступеня деформації за одну операцію застосовують місцеве електронагрівання зони пластичної деформації. Для виготовлення деталей витяжкою використовують листовий метал, який відзначається високою пластичністю: низьковуглецеву якісну і конструкційну низьколеговану сталь, алюміній і різні його сплави, мідь, латунь, інші метали.

Витяжку здійснюють у спеціальних штампах із такими робочими елементами, як: матриця *1* з закругленою робочою кромкою $r_м$, пуансон *2* і за необхідності притискне кільце *3* (рис. 3.12). Між пуансоном і матрицею є зазор *z*, у який пуансон втягує заготовку. Під час витяжки зовнішня сила, яка передається пуансоном, прикладена до донної частини деталі, що витягається. Край деталі залишається вільним, не навантаженим зовнішнім зусиллям.

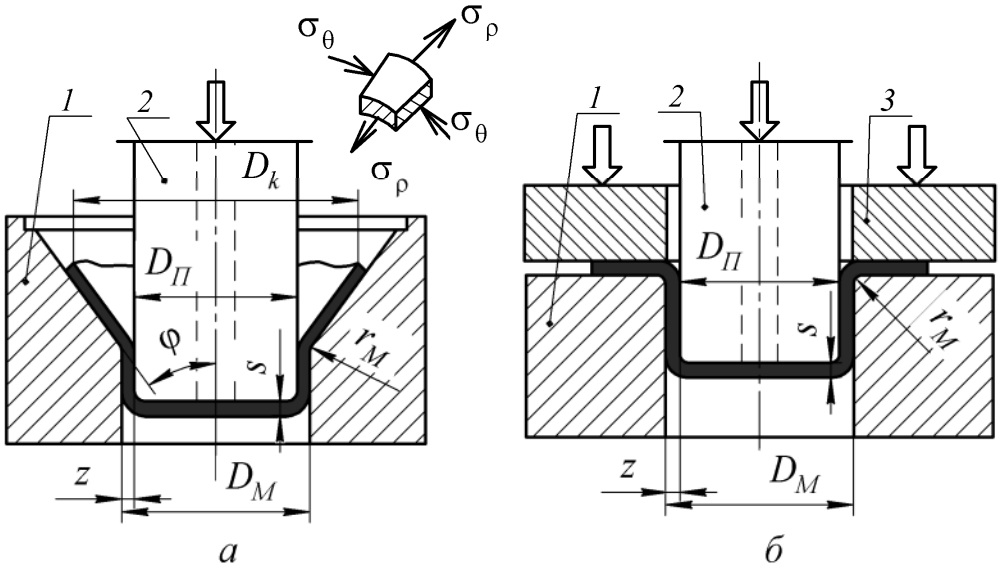


Рис. 3.12. Схеми штампів для першого переходу витяжки:
а – без притискного кільця; *б* – із притискним кільцем

Застосовують два основні способи витяжки:

1) без штучного зменшення товщини стінки (витяжка);

2) зі штучним зменшенням товщини стінки (витяжка зі стоншенням), у тому числі комбінована витяжка.

Витяжка без стоншення стінки характеризується значним зменшенням діаметра заготовки за приблизно незмінної товщини стінки деталі, що витягається. Витяжку здійснюють у штампі із зазором між пуансоном і матрицею, що дорівнює або є більший товщини заготовки ($z \geq s$).

Витяжка зі стоншенням відзначається істотним зменшенням товщини стінки за відносно малого зменшення діаметра заготовки. У разі витяжки зі стоншенням зазор $z < s$.

У процесі *витяжки без стоншення* в крайовій частині заготовки, ще не втягнутої в матрицю (у фланці, рис. 3.12, *а*), одночасно виникають розтягальні радіальні σ_ρ і стискаючі тангенціальні σ_θ напруження. Стискаючі напруження σ_θ, які діють в коловому напрямі, за певного співвідношення діаметрів заготовки й деталі, що витягається, можуть викликати появу складок у фланці (явище втрати стійкості), що призводять під час втягування складок у зазор між пуансоном і матрицею до масового браку внаслідок відриву дна. У штампах для витяжки передбачають притискне кільце, яке притискує фланець до матриці й цим перешкоджає утворенню складок (рис. 3.12, *б*). У зв'язку з цим розрізняють два способи витяжки без стоншення — *з притиском і без притиску заготовки*.

Витяжкою за одну операцію можна одержати відносно неглибокі деталі, висота яких не перевищує 0,7 – 0,8 діаметра заготовки. Під час витяжки більш високих деталей розтягальні напруження, що виникають у стінці, зростають настільки, що можуть спричинити відрив дна. З огляду на це процес витяжки необхідно роз-

діляти на кілька переходів, що дозволяє зменшити радіальні розтягальні напруження в стінках деталі, що витягається.

У процесі витяжки матеріал заготовки зміцнюється, його пластичні властивості погіршуються. Надмірне зміцнення металу призводить до втрати пластичності і зрештою до руйнування. Тому процес виготовлення високих деталей (висотою, більшою діаметра деталі, що витягається) полягає в чергуванні операцій витяжки, які йдуть одна за одною, в проміжку між якими в міру необхідності проводиться рекристалізаційний відпал напівфабрикатів для зняття зміцнення (рис. 3.13).

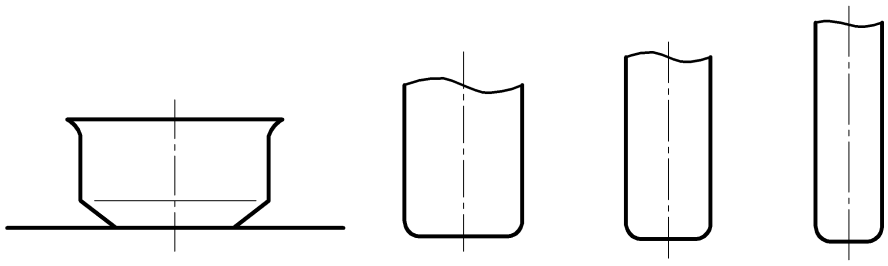


Рис. 6.3. Схема технологічного процесу витяжки деталей

Подальші операції витяжки здійснюються в штампах із притиском (рис. 3.14, *а*) або без нього (рис. 3.14, *б*) залежно від відносної товщини заготовки й ступеня деформації.

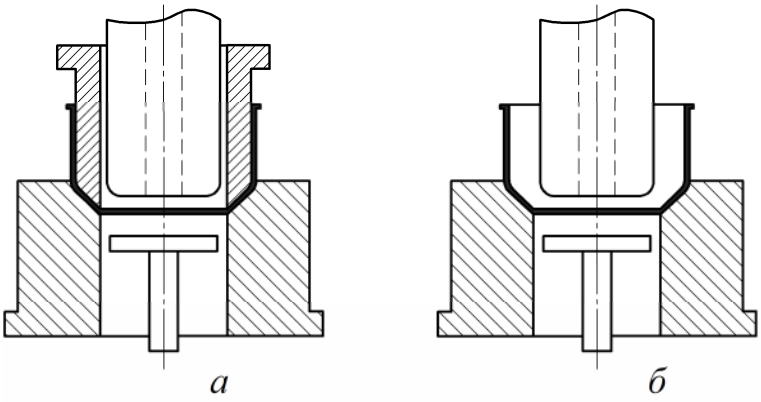


Рис.6.4. Схеми штампів для подальшого витягування

Наступні операції витяжки можуть бути виконані *прямим або реверсивним способом*. У тому випадку, коли пуансон передає тиск на порожнисту заготовку з внутрішнього боку дна (рис. 3.14), спосіб витяжки називають прямим.

Якщо пуансон передає тиск на порожнисту заготовку із зовнішнього боку дна (рис. 3.15, *а*), спосіб витяжки називають *реверсивним* або зворотним, оскільки при цьому заготовка втягується в матрицю у зворотному напрямі порівняно з напрямом витяжки на першій операції.

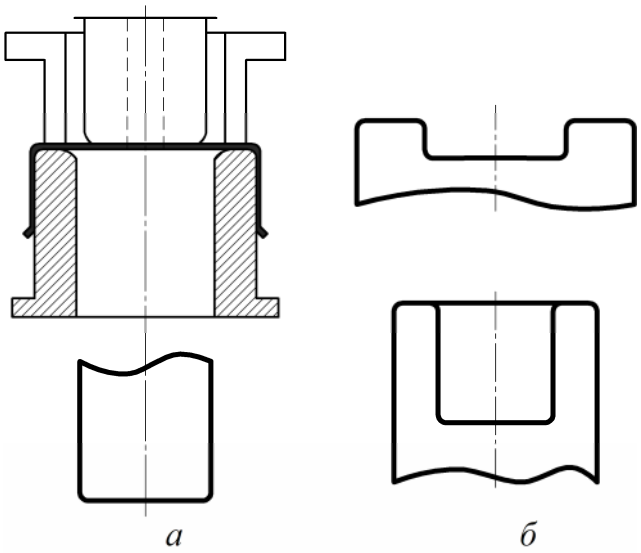


Рис. 6.5. Реверсивна витяжка:
а – схема штампа; *б* – вироби

Реверсивну витяжку застосовують для одержання деталей або напівфабрикатів складної форми, наприклад із подвійним дном або подвійними стінками (рис. 3.15, *б*). Крім того, реверсивну витяжку застосовують, коли необхідно сумістити перший і подальший переходи витяжки в одному штампі, а також у разі витяжки деталей сферичної форми, зокрема сферичних днищ баків ракетоносіїв.

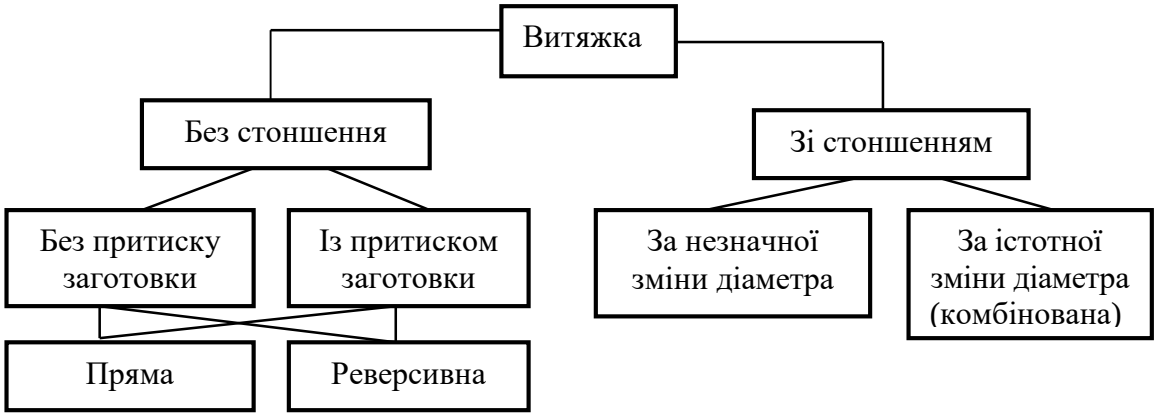


Рис. 3.16. Схема класифікації різних способів витяжки

У масовому та багатосерійному виробництві витяжку здійснюють на кривошипних пресах простої й подвійної дії. Як правило, деталі великих і середніх розмірів витягають на гідравлічних пресах подвійної дії, дрібні — на кривошипних пресах простої дії.

Дослідженню процесу витяжки присвячена велика кількість праць вітчизняних і зарубіжних учених. Проте вивчення витяжки продовжується, оскільки деякі завдання виконані недостатньою мірою і потребують уточнення, також виникають нові завдання у зв'язку з появою нових способів витяжки, поєднанням витяжки з іншими операціями листового штампування та ін. Схема, що узагальнює різні способи витяжки, наведена на рис. 3.16.

3.2.2. Витяжка без притиску заготовки

Витяжку без притиску заготовки здійснюють у штампі без складкоутворення на пресі простої дії. Осередок пластичної деформації знаходиться у фланці конічної форми, у якому виникають радіальні й тангенціальні розтягальні та стискаючі напруження σ_ρ і σ_θ (див. рис. 3.12) складкоутворення.

Можливість застосування витяжки без притиску визначається факторами розривів деталі в зоні сполучення фланця деталі й стінки, а також дна і стінки:

– за відносно малої товщини заготовки виникає складкоутворення конічного фланця внаслідок дії тангенціальних стискаючих напружень σ_θ. Складки, втягуючись в отвір матриці, викликають руйнування у вигляді відриву фланця;

– у разі відносно великої локальної деформації по товщині стінки деталі відбувається її значне стоншення, яке викликає її руйнування у вигляді відриву донної частини.

Можливість витяжки без притиску заготовки приблизно можна встановити, використовуючи умову

$$D_0 - d \le (18 \div 22)s .$$

У початковий момент витяжки без притиску заготовки в радіальній матриці спостерігається згинання фланця щодо робочої кромки на деякий кут γ (рис. 3.17).

Поворот фланця відбувається під дією згинаючого моменту, який виникає внаслідок зсуву сил, прикладених до заготовки з боку пуансона й матриці. У зв'язку з підйомом над площиною матриці фланець набуває конічної форми (рис. 3.17).

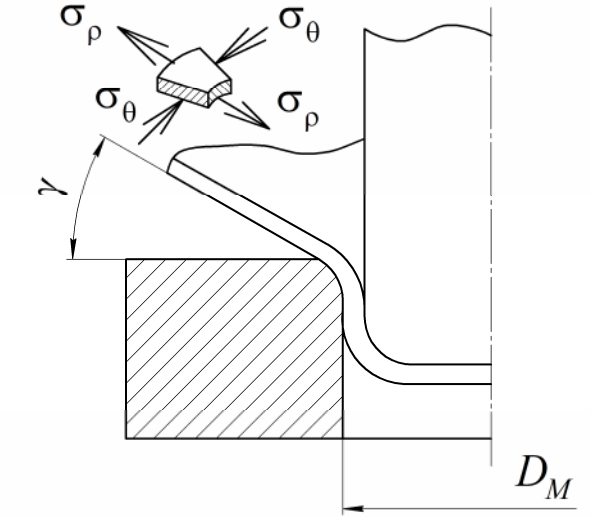


Рис. 3.17. Початковий момент витяжки без притиску заготовки

Як правило, витяжку без притиску заготовки проводять у матриці з конічною вхідною частиною, оскільки ймовірність складкоутворення в таких матрицях менша, ніж у циліндричних із радіальною вхідною частиною. Складкоутворення під час витяжки в конічній матриці залежить не тільки від відносної ширини фла-

нця й радіуса округлення матриці, але й від кута нахилу її твірної, який беруть таким, що дорівнює 30 – 45° за витяжки тонкостінних деталей на зразок стаканів (деталей, що мають циліндричну стінку) із $d/s > 30$ і 15 – 20° у разі витяжки товстостінних стаканів із $d/s < 30$.

Діаметр вхідної частини конічної матриці $D_в$ повинен бути ненабагато меншим діаметра заготовки (рис. 3.18) [8]:

$$D_в \approx 0{,}9D_0. \tag{3.18}$$

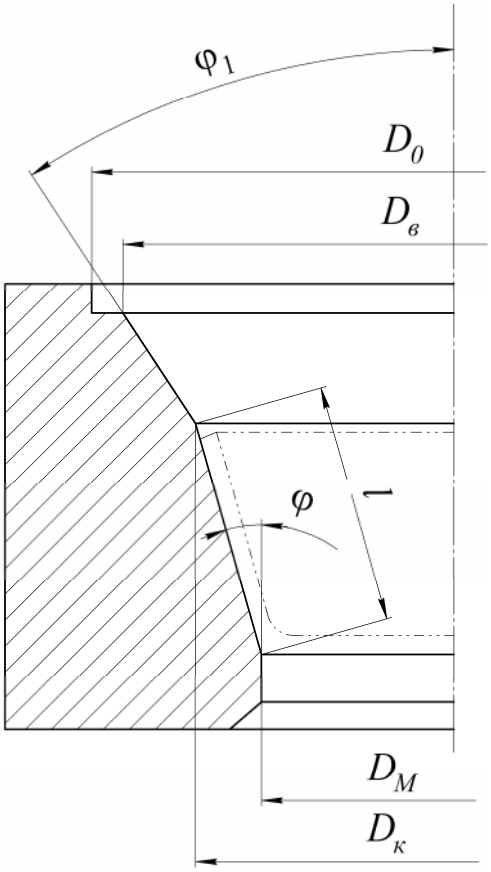


Рис.3.18. Схематичне зображення матриці з двома конусами для витягування

При куті нахилу твірної φ = 15° і дотриманні умови (3.18) матриця виходить відносно високою. Наприклад, за співвідношення $R_0/r = 2$ її висота дорівнює майже двом діаметрам деталі типу стакана, що витягається. Висоту матриці можна зменшити, якщо використовувати матрицю з двома конусами, що складається з двох порожнин (рис. 3.18):

– верхньої (вхідної), яка має кут нахилу твірної $\varphi_1 = 30 \div 45°$;

– нижньої з кутом нахилу твірної $\varphi = 12 \div 15°$.

Діаметр вхідного отвору нижньої конічної порожнини матриці $D_к$ (рис. 3.18) визначається з умови, згідно з якою витяжка в циліндричній порожнині матриці

повинна початися після зменшення (спаду) деформуючого зусилля в конічній порожнині матриці, що знаходиться над нею. У цей момент зовнішній діаметр меншої основи напівфабрикату дорівнює діаметру циліндричної порожнини матриці $D_м$, а діаметр більшої основи конічної порожнини матриці — діаметру $D_к$. Поділ процесу витяжки на окремі стадії дозволяє одержати високий сумарний ступінь деформації за помірних ступенів деформації на кожній стадії процесу [3].

Використовуючи умову рівності площ поверхонь заготовки і напівфабрикату в даний момент витяжки (рис. 3.12)

$$\frac{\pi D_o^2}{4} = \frac{\pi(D_к + D_м)l}{2} + \frac{\pi D_м^2}{4},$$

де $l = \frac{D_к - D_м}{2\sin\varphi}$ – довжина твірної (рис. 3.18), можна визначити діаметр вхідного отвору нижньої конічної порожнини матриці $D_к$ у функції коефіцієнта $K_в = \frac{D_0}{D_м}$ і кута φ:

$$D_к = D_м\sqrt{(K_в^2 - 1)\sin\varphi + 1}. \qquad (3.19)$$

Розрахунки за формулою (3.19) показують, що при $K_в$ = 2 і φ = 15° діаметр вхідного отвору матриці $D_к$ = 1,34 $D_м$.

У разі витяжки без притиску заготовки в матриці з конічною вхідною частиною коефіцієнт витяжки дорівнює відношенню діаметра заготовки до діаметра витягнутої деталі (напівфабрикату): $K_в = D_0/d$ (рис. 3.12, *а*).

Найбільше в осередку деформації радіальне напруження $\sigma_{\rho\ max}$, у «піковий» момент витяжки (коли зусилля витяжки досягає найбільшого значення) з урахуванням контактних сил тертя й додаткових напружень, що виникають під час згинання та випрямлення заготовки в процесі втягування її пуансоном у циліндричну порожнину матриці, визначається таким чином (див. рис. 3.12, *а*):

$$\sigma_{\rho\ max} = \beta\sigma_{s\ сер}\left[\left(\frac{D_к}{D_м} - 1\right)(1 + \mu\operatorname{ctg}\varphi) + \frac{s}{2r_м + s}\right](1 + \mu\varphi), \qquad (3.20)$$

де $\sigma_{s\ сер}$ – середнє значення напруження текучості; $D_к$ – найбільший діаметр краю напівфабрикату, приблизно визначуваний за формулою (3.10); β – коефіцієнт Лоде умови пластичності Губера — Мізеса; μ – коефіцієнт тертя.

Формула (3.20) одержана методом сумісного розв'язання рівнянь рівноваги й пластичності заготовки (умова пластичності Губера — Мізеса) за відомої граничної умови, згідно з якою при $\rho = R$ $\sigma_\rho = 0$. Зміцнення металу, що відбувається в процесі витяжки, враховане у формулі (3.20) за допомогою середнього значення напруження текучості $\sigma_{s\ сер}$, яке знаходиться за допомогою кривих зміцнення. Аналіз формули (3.20) показує, що зі зростанням ступеня деформації, сил тертя,

напруження текучості й товщини заготовки радіальне напруження $\sigma_{\rho\ max}$ збільшується, збільшення ж радіуса округлення робочої кромки матриці $r_м$ приводить до його зменшення.

Витяжку без притиску заготовки можна проводити в матриці з твірною робочої порожнини, що має форму подвійної кривизни. Деформуючись у такій матриці, фланець заготовки набуває подвійної кривизни, що сприяє підвищенню його несучої здатності. При цьому підвищується критичний ступінь деформації за одночасного збільшення зносостійкості матриці.

Експериментально встановлено, що гранично допустимий ступінь деформації під час витяжки в конічній матриці ($\varphi = 30°$) вищий, ніж у разі витяжки в радіальній, а за витяжки в матриці з подвійною кривизною — вищий, ніж у конічній.

Незважаючи на переваги, матриці з подвійною кривизною значного поширення не набули у зв'язку з більшою вартістю їх виготовлення порівняно з вартістю виготовлення конічних матриць.

3.2.3. Витяжка з притиском заготовки

Розрізняють дві стадії витяжки з притиском заготовки: початкову, коли тільки починається втягування заготовки в матрицю і кут обхвату заготовкою округлих робочих ділянок пуансона й матриці малий: $\alpha < \pi/2$ (рис. 3.19, *а*), і подальшу, коли $\alpha \approx \pi/2$ (рис. 3.19, *б*).

На початковій стадії витяжки відбувається зменшення товщини заготовки в осередку деформації (кільцева ділянка завширшки $c - d$, рис. 3.19, *а*), при цьому радіус заготовки R_0 не зменшується. За досить високих значень деформуючого зусилля й зусилля притиску має місце руйнування заготовки на ділянці $c - d$, тому на даній стадії витяжки ділянка $c - d$ є небезпечна, як найменш міцна.

У міру збільшення зусилля витяжки осередок пластичної деформації росте, поступово розширюється на фланець і частково — на донну частину заготовки. Після охоплення всього фланця пластичною деформацією починається друга стадія витяжки, що характеризується збільшенням кута обхвату α і зменшенням радіуса фланця ($R_ф < R$).

Коли кут обхвату α наближається до $\pi/2$ (повний обхват), центри радіусів округлення $r_п$ і $r_м$ робочих кромок пуансона й матриці знаходяться приблизно на одному рівні (рис. 3.19, *б*).

У довільно фіксований момент другої стадії витяжки, після того, як пуансон уже втягнув заготовку в матрицю на певну глибину, принаймні три ділянки цієї заготовки знаходяться в різних умовах напруженого стану (кільцева *1*, циліндрична *2* і донна *3* ділянки) (рис. 3.19, *в*).

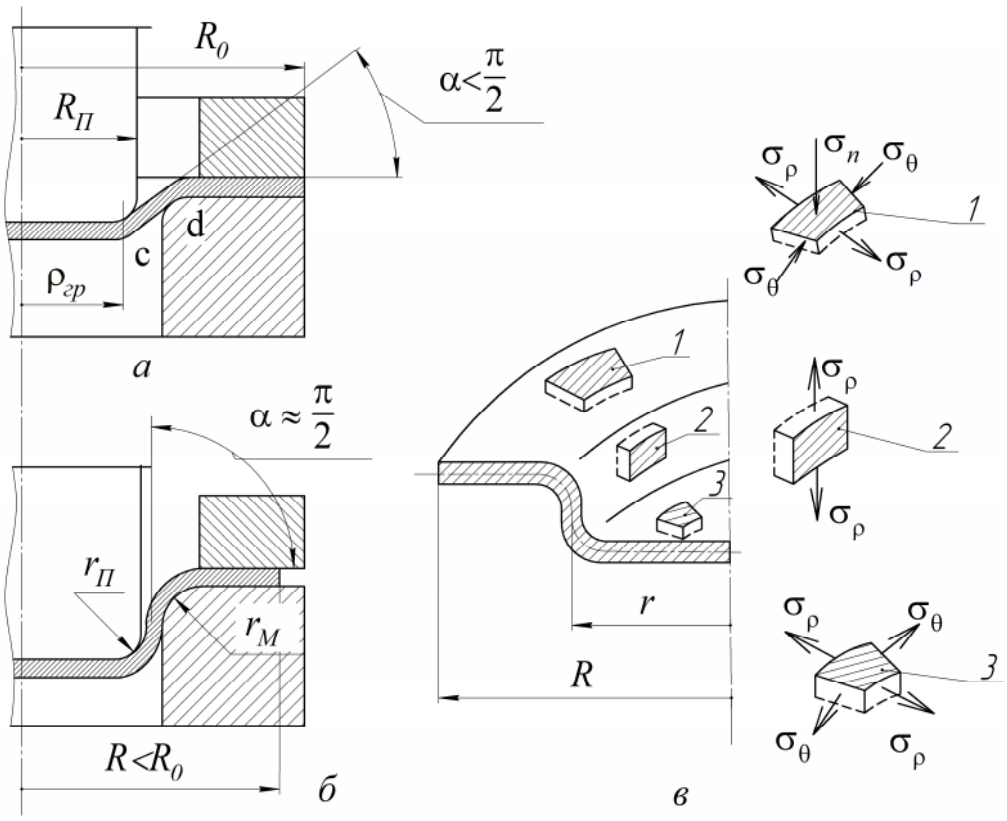


Рис. 3.19. Схема витяжки з притиском заготовки

Кільцевий фланець *1*, обмежений двома колами, радіуси яких *R* і *r*, знаходиться в плоскому напруженому стані, оскільки напруження стиснення σ_n, викликане тиском притискного кільця штампа, мале порівняно з напруженням текучості σ_s, а в разі витяжки без притиску — зовсім відсутнє. На елементарний об'єм, виділений у фланці дугами двох концентрично розташованих кіл і радіально спрямованими лініями, у радіальному напрямі діють розтягальні напруження σ_ρ і в тангенціальному напрямку — стискаючі напруження σ_θ (рис. 3.19, *в*).

Під час витяжки діаметр фланця зменшується, саме в ньому наявний осередок пластичної деформації. Проте для початку й подальшого перебігу пластичної формозміни фланця необхідно, щоб співвідношення між напруженнями σ_ρ і σ_θ було цілком визначеним. Відповідно до умови пластичності Губера—Мізеса

$$\left|\sigma_\rho\right| + \left|\sigma_\theta\right| = \beta\sigma_s . \qquad (3.21)$$

Циліндрична ділянка *2* внаслідок тиску пуансона, який передається на донну частину заготовки, знаходиться в умовах, близьких до лінійного розтягування. У цьому випадку виникають розтягальні напруження σ_ρ, які повинні бути меншими напруження текучості ($\sigma_\rho < \sigma_s$). Якщо ця умова не буде виконана, відбудеться локальне стоншення стінки, що завершиться відривом дна. Дана ділянка деформується пружно на відміну від фланця, який деформується пластично, незважаючи на те, що в ньому $\sigma_\rho < \sigma_s$ (3.21).

Донна ділянка *3* піддається двовісному розтягуванню. Так само, як і цилінд-

рична ділянка, дно стакана деформується пружно, при цьому нормальні розтягальні напруження, які діють у радіальному й тангенціальному напрямах, завжди менші напруження текучості матеріалу заготовки: $\sigma_\rho < \sigma_s$ і $\sigma_\theta < \sigma_s$.

Кільцевий фланець деталі, що витягається, називають зоною пластичної деформації, а циліндричний і донний — зонами передачі зусиль.

Розподіл напружень по осередку деформації встановлений у результаті сумісного розв'язання рівнянь статики й пластичності за відомих граничних умов, зокрема, для ідеальних умов деформації були одержані такі рівняння [6]:

$$\sigma_\rho = \beta\sigma_s \ln\frac{R}{\rho}; \tag{3.22}$$

$$\sigma_\rho = -\beta\sigma_s\left(1 - \ln\frac{R}{\rho}\right). \tag{3.23}$$

Наведені дані дозволяють прослідити характер зміни напружень по осередку деформації: радіальне напруження σ_ρ змінюється від нульового значення на кромці фланця ($\rho = R$) до найбільшого значення в місці сполучення фланця з циліндричною ділянкою деталі ($\rho = r$), а тангенціальне напруження σ_θ — від максимального значення на кромці фланця при $\rho = R$ до мінімального в місці сполучення фланця з циліндричною ділянкою при $\rho = r$. Епюра розподілу напружень σ_ρ і σ_θ по ширині фланця показана на рис. 3.20, *а*. Аналізуючи епюру, можна зробити висновок про те, що на ділянці фланця з переважаючими (за абсолютним значенням) стискаючими напруженнями $|\sigma_\theta| > |\sigma_\rho|$ відбудеться стовщення, а на ділянці з переважаючими радіальними розтягальними напруженнями $|\sigma_\rho| > |\sigma_\theta|$ — стоншення. При $|\sigma_\theta| = |\sigma_\rho|$ товщина фланця залишається незмінною: дорівнює товщині початкової заготовки. *Деформований стан* за цієї умови є *плоский*. Схеми деформованого стану різних ділянок фланця показані на рис. 3.20, *б*.

Межу між ділянками стовщення й стоншення фланця можна встановити, використовуючи умову плоского деформованого стану, яка в прийнятих позначеннях має такий вигляд:

$$\frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2} = \sigma_n,$$

де σ_n – напруження по нормалі до поверхні, яке діє в товщинному напрямі.

Оскільки під час витяжки $\sigma_n \cong 0$, то умова плоского деформованого стану набуває вигляду

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \tag{3.24}$$

Підставивши в умову (3.24) значення σ_ρ і σ_θ згідно з формулами (3.22) і (3.23) з урахуванням знаків, одержимо

$$\beta\sigma_\rho \ln\frac{R}{\rho} - \beta\sigma_s\left[1 - \ln\frac{R}{\rho}\right] = 0, \tag{3.25}$$

звідки знаходимо радіус кола, що розмежовує ділянки стовщення і стоншення фланця, $\rho_{гр} = 0{,}606R$ (рис. 3.20, *б)*.

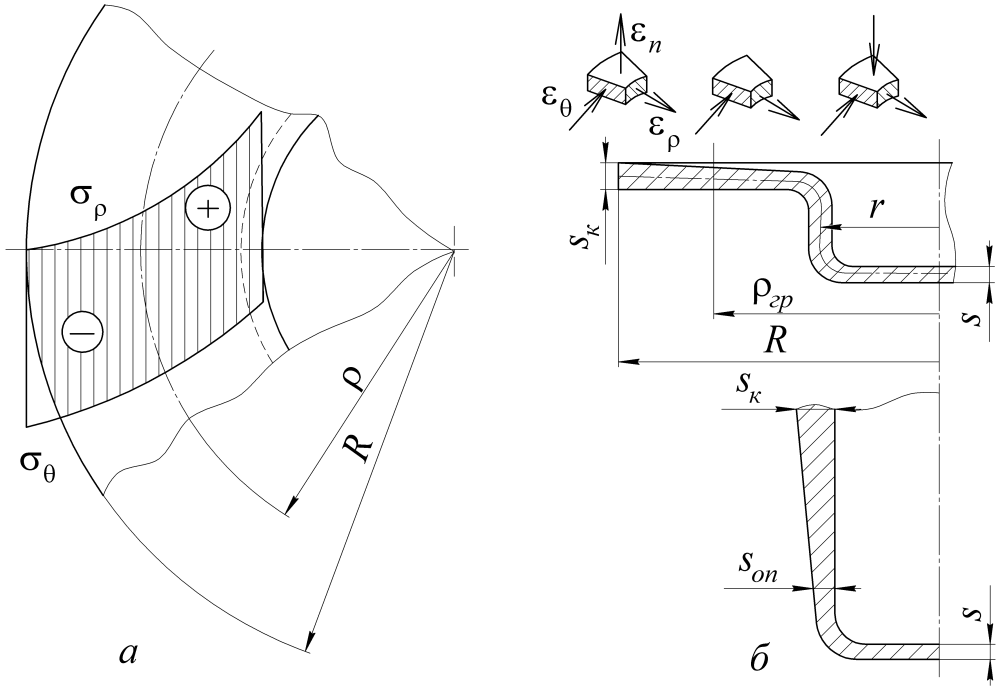


Рис. 3.20. Розподіл напружень і деформацій по фланцю деталі під час витяжки

Найбільша товщина фланця по осередку деформації знаходиться на його кромці, де напружений стан близький до лінійного ($\sigma_\rho \cong 0$, $\sigma_n \cong 0$). За лінійного стиснення в радіальному й аксіальному напрямах ступені деформації дорівнюють один одному: $|\varepsilon_\rho| = |\varepsilon_\theta|$, при цьому умова незмінності об'єму набуває вигляду $\varepsilon_\theta + 2\varepsilon_n = 0$, звідки $\varepsilon_n = -\varepsilon_\theta/2$.

Враховуючи, що $\varepsilon_n = \ln\frac{s_к}{s}$ і $\varepsilon_\theta = \ln\frac{R}{R_0}$, одержуємо $\ln\frac{s_к}{s} = -\frac{1}{2}\ln\frac{R}{R_0}$, звідки

$$s_к = s\sqrt{\frac{R}{R_0}}.$$

У разі повного втягування заготовки в матрицю фланець відсутній, відповідно $R = r$, отже,

$$s_к = s\sqrt{\frac{R_0}{r}} \tag{3.26}$$

або з урахуванням нормальної анізотропії металу [8]

$$s_к = s\left(\frac{R_0}{r}\right)^{\frac{1}{1+R^*}}. \tag{3.27}$$

Для ізотропного металу коефіцієнт анізотропії $R^* = 1$, при цьому значенні формула (3.27) переходить у формулу (3.26), яку можна застосовувати для набли-

женого розрахунку зазору z між пуансоном і матрицею штампа для витяжки, узявши $z = s_к$. Точно значення z визначають за таблицями, наведеними в праці [5].

Таким чином, деформований стан по осередку пластичної деформації під час витяжки неоднорідний, він залежить від співвідношення головних нормальних напружень (рис. 3.20, *б*). У зв'язку з цим *товщина стінки деталі, одержаної витяжкою, не рівномірна по висоті: біля кромки вона більша, а на ділянці з'єднання з дном — менша товщини вихідної заготовки; товщина дна приблизно дорівнює товщині вихідної заготовки* (рис. 3.20, *б*).

Поперечний переріз деталі з якнайменшою товщиною стінки називають небезпечним, саме в ньому деталь руйнується, відбувається відрив дна (рис. 3.21).

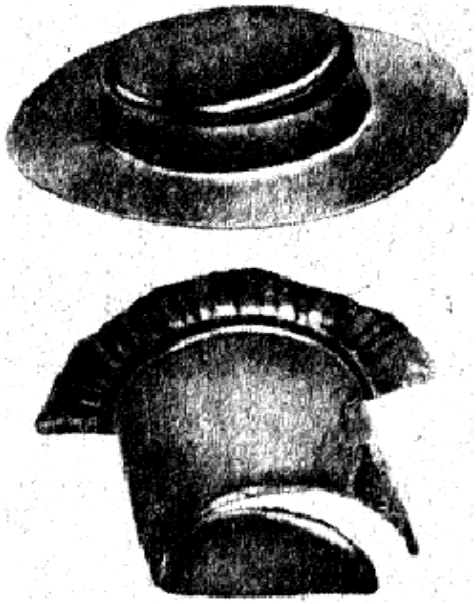


Рис. 3.21. Деталі з відірваним під час витяжки дном

Розглянутий переріз небезпечний ще й з тієї причини, що кільцевий шар металу, який знаходиться в цьому перерізі, менш зміцнений, ніж шари металу, що знаходяться у вищерозташованих поперечних перерізах.

Якщо ступінь деформації не перевищує допустимий, товщину стінки в небезпечному перерізі приблизно можна визначити так [3]:

$$s_{min} = \frac{s}{\left(\frac{R_0}{r}\right)^{\frac{s}{2r_м}}}. \qquad (3.28)$$

Недолік формули (3.28) полягає в тому, що в ній не врахований вплив характеристик механічних властивостей матеріалу заготовки на s_{min}.

У реальних умовах деформації на характер розподілу напружень, що виникають у процесі витяжки, істотно впливає ряд факторів: зміцнення металу, сили контактного тертя, згинання і випрямлення елементів заготовки під час втягування її в матрицю, анізотропія механічних властивостей металу й ін.

Методика врахування впливу названих факторів детально описана в науко-

во-технічній літературі й підручниках [3; 6]. За цією методикою із застосуванням степеневої апроксимації кривої зміцнення одержана така формула для визначення найбільшого в осередку пластичної деформації радіального розтягального напруження в довільно фіксований момент витяжки для ізотропного металу [3]:

$$\sigma_{\rho\ max} = \sigma_в \left[\frac{1}{1-\psi_p} \left(\frac{x}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1-\psi_p}} \left(\ln \frac{R_0}{x} - x \right) + \frac{\mu Q}{\pi R_0 s \sigma_в} + \frac{s}{2r_м + s} \right] (1+1{,}6\mu), \qquad (3.29)$$

де $x = \dfrac{R_0 - R}{R_0}$ – відносний зсув краю фланця в процесі витяжки.

Перший доданок у наведеній формулі — напруження, викликане опором деформації фланця заготовки з урахуванням зміцнення металу; другий — напруження, що виникає під час подолання контактних сил тертя, прикладених до плоскої частини (дзеркала) матриці й притискного кільця з двох боків; третій — напруження, зумовлене згинанням і випрямленням заготовки в процесі втягування її в матрицю. Множник (1 + 1,6μ) враховує вплив додаткових розтягальних напружень, що з'являються в ході подолання контактних сил тертя на робочій кромці матриці.

Зі збільшенням x перший множник другого доданка формули (3.29) збільшується, а другий — зменшується. Отже, дана функція повинна мати екстремальне значення. Це пояснюється тим, що в міру втягування заготовки в матрицю зовнішній радіус її фланця R зменшується, при цьому значення $\sigma_{\rho\ max}$ теж зменшується. Водночас зі зменшенням R ступінь деформації збільшується, що приводить до збільшення напруження текучості внаслідок зміцнення металу і, отже, до збільшення $\sigma_{\rho\ max}$.

У зв'язку з цим у процесі витяжки $\sigma_{\rho\ max}$ змінюється немонотонно, і максимум цього напруження виникає в деякий проміжний момент деформації, коли $R_0 > R > r$. Дослідження формули (3.29) на максимум і мінімум дозволяє встановити екстремальне значення відносного зсуву фланця:

$$x^e = \frac{R_0 - R^e}{R_0} = \psi_p \ln \frac{R_0}{r}, \qquad (3.30)$$

де R_e – екстремальний радіус фланця.

Перетворюючи формулу (3.30), можна одержати

$$R_e = R_0 \left[1 - \psi_p \ln \frac{R_0}{r} \right]. \qquad (3.31)$$

Екстремальний радіус фланця R_e тим менший, чим вищі інтенсивність зміцнення матеріалу заготовки, показником якої є величина ψ_ρ, і ступінь деформації,

що характеризується логарифмом відношення R_0/r. При $\psi_\rho = 0{,}2$ і $R_0/r = 2$ екстремальний радіус фланця $R_e = 0{,}86R_0 + 1{,}72r$, що узгоджується з експериментальними даними. Підставивши у формулу (3.29) замість x величину x^e згідно з (3.30), одержимо екстремальне значення $\sigma^e_{\rho max}$:

$$\sigma^e_{\rho max} = \sigma_в \left[\ln\left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{1-\psi_p}} + \frac{\mu Q}{\pi R_0 s \sigma_в} + \frac{s}{2r_м + s} \right](1 + 1{,}6\mu). \qquad (3.32)$$

За допустимого співвідношення радіусів заготовки й стакана (для пластичних матеріалів $R_0/r < 2$), що витягається, уся заготовка перетягується в матрицю без руйнування, у цьому випадку $\sigma^e_\rho < \sigma_s$. У разі витяжки з більш високим ступенем деформації ($R_0/r > 2$) екстремальне напруження σ^e_ρ може досягти напруження текучості σ_s, що, як встановлено експериментально, у момент обриву дна деталі дорівнює $(1{,}1 \div 1{,}2)\sigma_в$; приблизно беруть $\sigma^e_{\rho max} \cong \sigma_в$ [3]. У цьому випадку без руйнування можлива лише незавершена витяжка з так званим широким фланцем.

У момент обриву дна деталі фланець має певний радіус, який називають критичним, $R_{кр}$. Критичний радіус фланця приблизно визначають з умови $\sigma^e_{\rho max} = \sigma_в$. Застосовуючи формулу (3.29) і припускаючи, що $\ln\frac{R_0}{r} + x \cong \ln\frac{R_0}{x}$, можна обчислити критичний відносний зсув фланця $x_{кр}$ [3]:

$$\sigma_{\rho max} = \psi_p \left[\frac{1-\psi_p}{\ln\frac{R_0}{r}} \left(\frac{1}{1+1{,}6\mu} - \frac{\mu Q}{\pi R_0 s \sigma_в} - \frac{s}{2r_м + s} \right) \right]^{\frac{1-\psi_p}{\psi_p}}. \qquad (3.33)$$

З урахуванням формули (3.33) критичний радіус фланця

$$R_{кр} = R_0(1 - x_{кр}).$$

Якщо фланець деталі, яка витягається, має радіус, більший критичного ($R > R_{кр}$), то він вважається широким. Витяжка деталей із широким фланцем можлива з більш високим ступенем деформації, ніж витяжка деталей без фланця (із повним втягуванням заготовки в матрицю) або з фланцем, радіус якого менший критичного. Особливості технології витяжки деталей із широким фланцем розглянуті далі.

Подальші переходи витяжки виконуються в матрицях із конічною вхідною частиною. Заготовкою служить стакан, одержаний на першому переході. Процес здійснюється без притиску заготовки, якщо відносна товщина

$\frac{s}{D_0}\cdot 100 \geq (5\div 7)(1-m)$, і з притиском заготовки, якщо $\frac{s}{D_0}\cdot 100 \leq (5\div 7)(1-m)$, де $m = r/R_0$.

Під час виконання подальших переходів витяжки осередок деформації охоплює три кільцеві ділянки — дві тороподібні й одну конічну, обмежену радіусами $R_з$ і r (рис. 3.22).

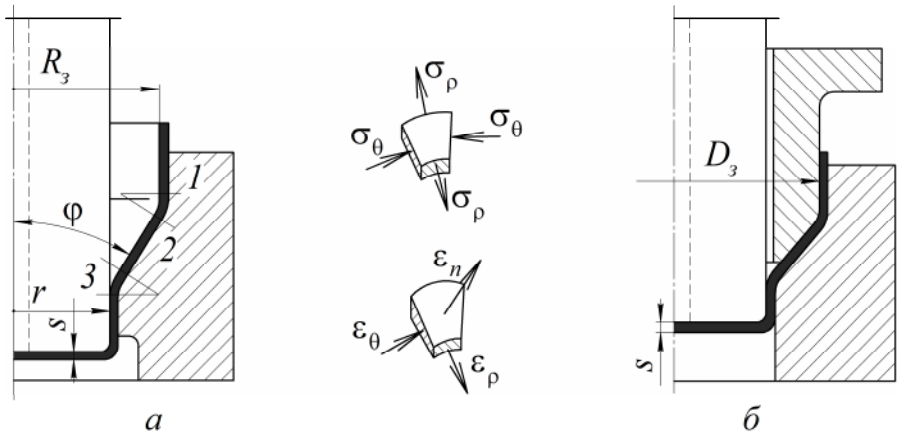


Рис. 3.22. Стала стадія витяжки на подальших переходах:
а – без притиску заготовки; *б* – з притиском заготовки

У період сталого процесу витяжки протяжність осередку деформації залишається незмінною, тоді як на першому переході в міру втягування заготовки в матрицю осередок пластичної деформації скорочується.

Умови деформації на подальших переходах витяжки більш складні, ніж на першому переході, у зв'язку з тим, що заготовка (стакан), яка зміцнилась після першого переходу, має змінні напруження текучості й товщину стінки по висоті, які зростають у міру віддалення від донної ділянки.

Один із варіантів розв’язання задачі про розподіл напружень на сталій стадії витяжки виконаний на базі безмоментної теорії оболонок після встановлення розподілу напружень по трьох простих геометричних ділянках осередку деформації: *1*, *2* і *3* (рис. 3.22). У результаті сумісного розв’язання рівнянь, що визначають рівновагу й пластичність кожної ділянки осередку пластичної деформації окремо, і використання граничних умов на межах цих ділянок одержана формула для обчислення найбільшого радіального розтягального напруження $\sigma_{\rho\ max}$, що виникає під час витяжки відпаленої заготовки в штампі без притискного пристрою [3]:

$$\sigma_{\rho_{max}} = \sigma_{s\ сер}\left[\left(1-\frac{r}{R_з}\right)(1+\mu\operatorname{ctg}\varphi)+\sqrt{\frac{s}{2R_0}}\sin\varphi+\frac{s}{2r_м+s}\right](1+1{,}6\mu). \qquad (3.34)$$

Середнє за осередком деформації напруження текучості $\sigma_{s\ сер}$ можна визначити в результаті застосування лінійної апроксимації кривої зміцнення першого вигляду:

$$\sigma_{s\ сер} = \sigma_m + 0{,}5П\left(1 - \frac{r}{R_0}\right).$$

З аналізу формули (3.34) випливає, що існує оптимальний кут нахилу конічної матриці твірної для витяжки, при якому значення $\sigma_{\rho\ max}$ найменше. Приблизно значення оптимального кута розраховується так:

$$\sin\varphi_{опт} = \sqrt{\mu\left(1 - \frac{r}{R_з}\right)\sqrt{2\frac{R_з}{s}}}\ . \qquad (3.35)$$

Залежно від умов деформації оптимальні кути матриці змінюються від 10 до 35°.

Подальші переходи витяжки можуть виконуватися як у конічних, так і в радіальних (циліндричних) матрицях з округленою (тороподібною) вхідною частиною, наприклад для витяжки деталей із широким фланцем.

На сталій стадії подальшого (другого) переходу витяжки в конічній матриці відбувається істотна зміна кривизни серединної поверхні твірної, яка зумовлює виникнення згинаючих моментів на межі пружної і пластичної зон деформації. При цьому в циліндричній ділянці заготовки, ще не втягнутій у матрицю, виникають тангенціальні розтягальні напруження σ_θ, здатні в певних умовах викликати появу подовжніх тріщин. До цього призводить ще й деформаційне зміцнення заготовки після першого переходу витяжки, у зв'язку з чим її пластичні властивості погіршуються.

Якщо вважати, що напруження σ_θ постійне по висоті пружної зони заготовки висотою h, то його значення можна встановити з умови рівності згинаючих моментів, які діють на межі пружної й пластичної зон заготовки:

$$0{,}25\sigma_s s^2 R_з d\gamma = \sigma_\theta s l^2 \sin\frac{d\gamma}{2},$$

де $d\gamma$ – центральний елементарний кут (рис. 3.23, *а*). Узявши $\sin\frac{d\gamma}{2} \cong \frac{d_\gamma}{2}$ і зробивши необхідні перетворення, одержимо

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_s R_з s}{2l^2}. \qquad (3.36)$$

У міру втягування заготовки в матрицю висота l зменшується, у зв'язку з чим згідно з формулою (3.36) тангенціальне напруження σ_θ зростає. Коли напруження σ_θ досягає напруження текучості σ_s, висота не втягнутої в матрицю ділянки заготовки [3]

$$l = \sqrt{\frac{sR_з}{2}}. \qquad (3.37)$$

Таким чином, крайова частина заготовки починає пластично деформуватися раніше, ніж увійде до конічної порожнини матриці (оскільки $l > 0$), при цьому діаметр заготовки дещо збільшується.

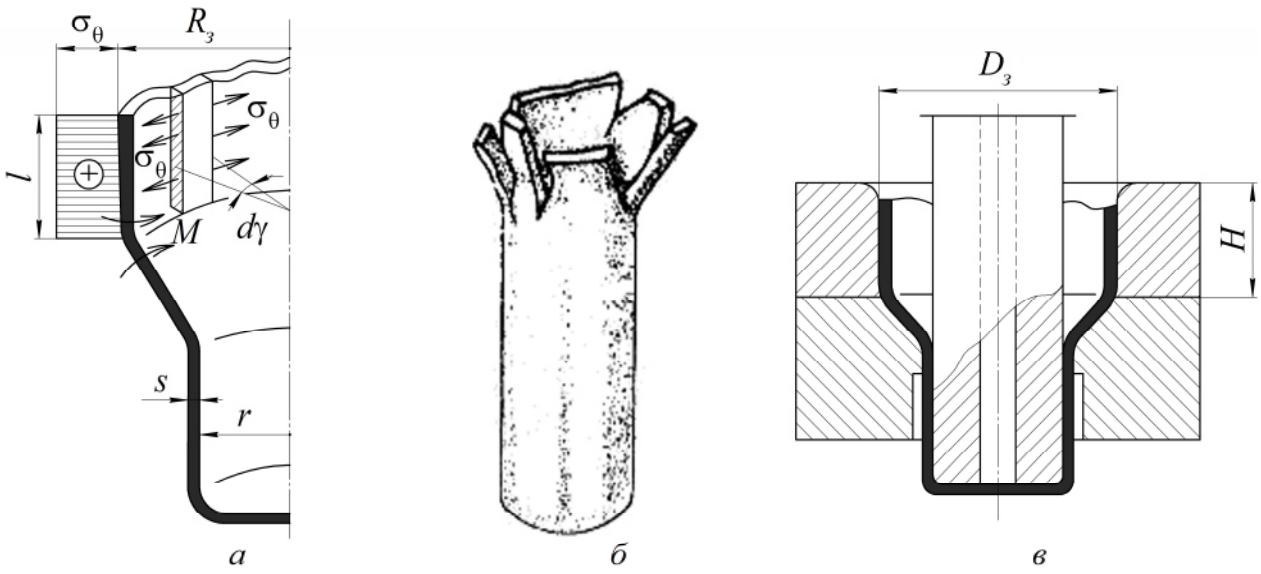


Рис.3.23. Графічне зображення особливостей витяжки на сталих переходах:
а – епюра розподілу розтягальних напружень; *б* – можливі подовжні тріщини;
в – матриця з реактивною порожниною

Дослідження показали, що тангенціальні розтягальні напруження σ_θ, які виникають у ще не втягнутій у матрицю частині заготовки, у певних умовах можуть викликати появу тріщин заготовки уподовж твірної (рис. 3.23, *б*). Для запобігання появі вказаного дефекту були запропоновані матриці для витяжки з реактивною порожниною у вигляді кільця заввишки $H = 0{,}4D$ (рис. 3.23, *в*), яке перешкоджає виникненню й розвитку тангенціальних деформацій. Використання матриць із реактивною порожниною дозволяє проводити багатоперехідну витяжку без міжопераційних (рекристалізаційних) відпалів.

3.2.4. Технологічні розрахунки для процесів витяжки

Розміри та форма заготовки. Виходячи з припущення про те, що приріст площі поверхні деталі, яка витягається, через стоншення стінки дорівнює зменшенню площі її поверхні внаслідок стовщення стінки, діаметр заготовки можна визначити з умови $F_{дет} = F_{заг}$.

Якщо ця умова не виконується, то вводиться поправковий коефіцієнт f_n, що враховує середню зміну площі поверхні заготовки в процесі витяжки. Коефіцієнт f_n можна обчислити з допомогою наближеної емпіричної формули:

$$f_n = \frac{F_{заг}}{F_{дет}} = \frac{1}{0{,}95 + 0{,}8\mu \dfrac{s}{r_м} K_в^2}. \qquad (3.38)$$

Найбільшою мірою на зміну f_n впливає коефіцієнт витяжки $K_в = \dfrac{D_0}{d}$ (можливе використання його оберненого значення $m_в = d/D_0$, $m_в = 1/K_в$). Чим він бі-

льший, тим менша величина f_n.

Залежно від співвідношення параметрів, що входять у формулу (3.38), f_n може бути більше або менше одиниці, у зв'язку з чим площа поверхні деталі після витяжки може збільшуватися ($f_n < 1$) і зменшуватися ($f_n > 1$) або залишатися незмінною ($f_n = 1$). Це пояснюється тим, що зі зміною $K_в$, μ і $r_м$ змінюються радіальні й тангенціальні напруження σ_ρ і σ_θ, таким чином, змінюються розміри ділянок фланця деталі, що витягається, із переважаючими напруженнями σ_ρ або σ_θ. Останнє пов'язане зі стоншенням або стовщенням фланця і, отже, зі збільшенням або зменшенням площі поверхні деталі після витяжки.

Для деталі з формою тіла обертання заготовка, як правило, має форму круга, тому умова рівності площ поверхонь заготовки й деталі при постійній товщині заготовки може бути подана у вигляді $F_{дет} = 0{,}785 D_0^2$, звідки діаметр заготовки

$$D_0 = 1{,}13\sqrt{F_{дет}}\,. \qquad (3.39)$$

Площа поверхні деталі обчислюється шляхом підсумовування площ поверхонь геометрично простих елементів, із яких складається деталь (рис. 3.24), діаметр заготовки можна визначити, застосовуючи таку залежність:

$$D_0 = 1{,}13\sqrt{f_1 + f_2 + f_3 + ... + f_4} = 1{,}13\sqrt{\sum f_i}\,, \qquad (3.40)$$

де f_i – площі поверхонь геометрично простих елементів деталі.

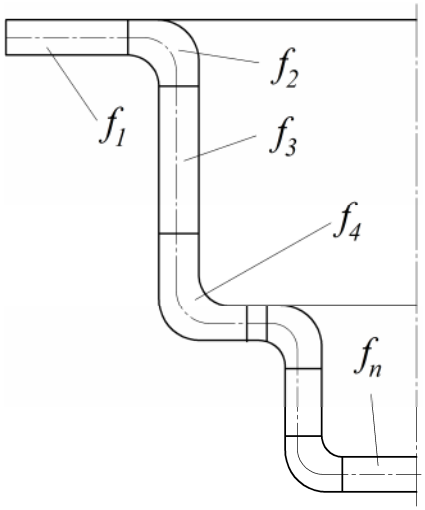


Рис. 3.24. Схема поділу поверхні деталі на геометрично прості елементи

Обчислюючи діаметр заготовки для витяжки вісесиметричної деталі, необхідно враховувати припуск на обрізання хвилястої кромки напівфабрикату, яка утворюється внаслідок площинної анізотропії механічних властивостей матеріалу заготовки. Опуклі ділянки кромки називають фестонами, їх висота досягає 20 % висоти деталі. Фестони розташовуються на ділянках кромки деталі симетрично відносно напрямку прокатки (рис. 3.25).

Розташування фестонів залежить від властивостей матеріалу заготовки, режимів прокатки й термічної обробки листа. Під час витяжки сталевих деталей фестони розташовуються під кутами 0° і 90°, а в разі витяжки деталей з алюмінієвих

сплавів і латуні — під кутом 45° щодо напряму прокатки листа.

Після витяжки фестони видаляються обрізанням, значення припуску на обрізання ΔH (рис. 3.25) залежить від співвідношення діаметра й висоти деталі, товщини заготовки, що витягається. Експериментально встановлено, що ΔH складає від 5 до 20 % висоти деталі, чим більша відносна висота і товщий метал, тим більший припуск на обрізання.

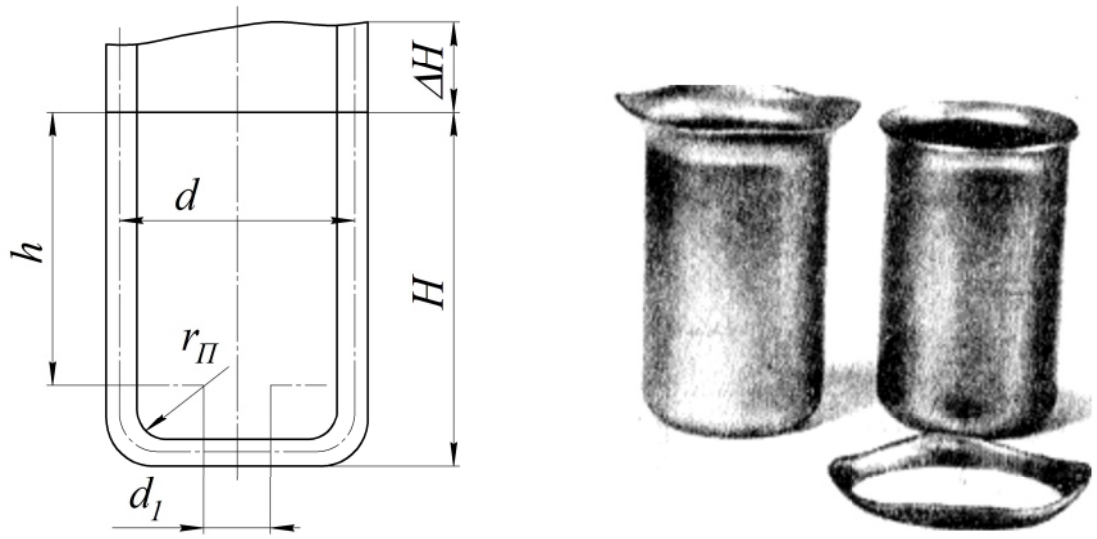


Рис. 3.25. Деталь із фестонами

У багатосерійному виробництві обрізання фестонів проводять східчастим пуансоном, що складається з робочої ділянки й уловлювача, діаметр якого на 0,2 – 0,3 мм менший внутрішнього діаметра деталі (рис. 3.26, *а*).

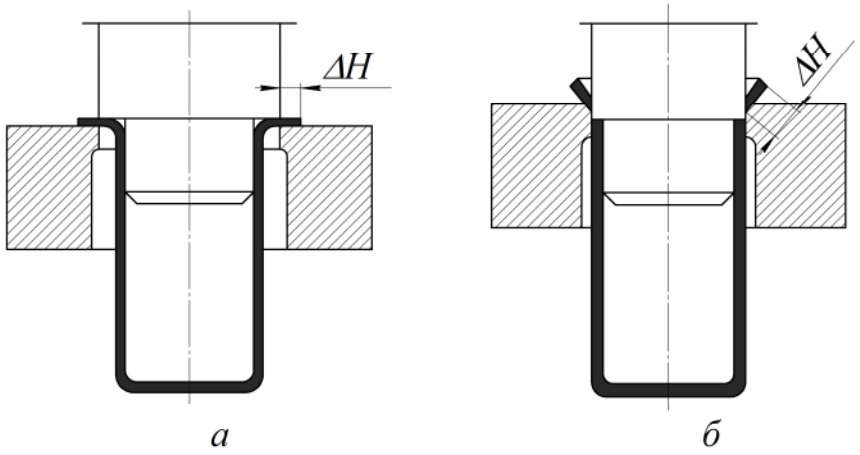


Рис. 3.26. Схеми способів видалення фестонів:
а – обрізання (із необхідною операцією витяжки для вирівнювання краю деталі); *б* – відділення нерівного краю деталі з фестонами (відкушування)

Під час обрізання діаметр матриці дорівнює різниці зовнішнього діаметра фланця деталі й подвоєного припуску на обрізання $2\Delta H$, після цього потрібна до-

даткова операція витяжки для вирівнювання деформованої ділянки деталі.

У разі обрізання фестонів за схемою, показаною на рис. 3.26, *б*, діаметр матриці дорівнює зовнішньому діаметру деталі. Під час опускання пуансона відбувається відділення нерівного краю деталі (відкушування), після чого пуансон проштовхує деталь крізь матрицю.

Один зі способів зменшення нерівномірності висоти витягнутої деталі — використання фігурних (профільних) заготовок, форма та розміри яких встановлюються з урахуванням анізотропії металу (рис. 3.27). Розміри фігурної заготовки для витяжки визначаються з умови рівності часу переміщення матеріальних точок *K* і *M*, розташованих на її контурі, уздовж осі симетрії фестонів і западин до контуру отвору матриці .

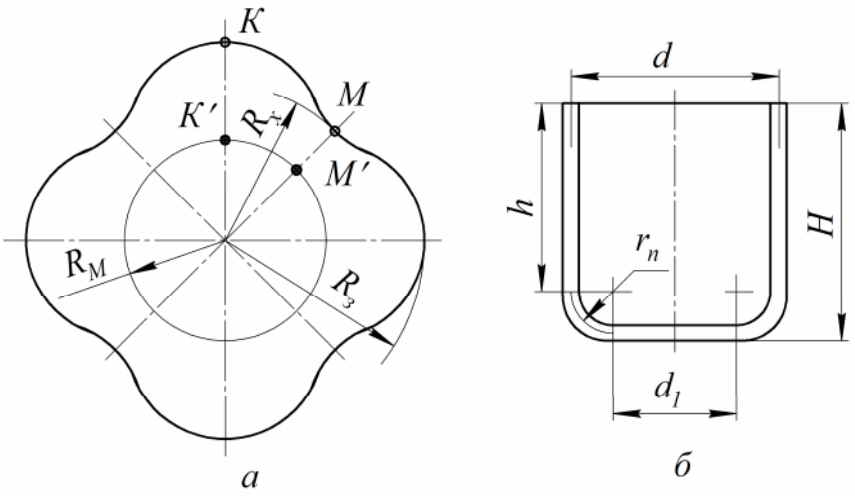


Рис.3.27. Схема фігурної (профільної) заготовки (*а*) для одержання деталей без фестонів (*б*)

Окрім фігурних заготовок для зменшення впливу анізотропії металу на нерівномірність висоти деталей, одержуваних витяжкою, застосовують матриці зі змінною (по контуру отвору) кривизною робочої кромки $r_м$, неоднакове нагрівання фланця, диференційований по контуру матриці притиск фланця й ін.

У процесі визначення діаметра заготовок для одержуваних витяжкою деталей зі стінкою завтовшки менше 2 мм розрахунок ведеться за зовнішніми розмірами деталі, а для деталей із стінкою завтовшки понад 2 мм — за її серединними розмірами.

Як приклад обчислимо діаметр заготовки для вісесиметричної деталі з урахуванням припуску на обрізання нерівного краю ΔH. Для циліндричного стакана без фланця (рис. 3.27, *б*) умова рівності площ поверхонь заготовки й деталі визначається рівнянням

$$\frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d(h + \Delta H) + \frac{\pi}{4}(2\pi d_1 r_n + 8r_n^2), \qquad (3.41)$$

звідки

$$D_0 = \sqrt{d_1^2 + 4d(h + \Delta H) + 2r_n(\pi d_1 + 4r_n)}. \quad (3.42)$$

Для приблизних розрахунків діаметр заготовки можна визначити за більш простою формулою, узявши $r_n = 0$, $h = H$ і $d_1 = d$, тоді

$$D_0 \cong \sqrt{d(d + 4H)}. \quad (3.43)$$

У даному випадку припуск на обрізання нерівного краю ΔH можна не призначати, оскільки за незмінних d і H і при $r_n = 0$ площа поверхні деталі більша, ніж при $r_n \neq 0$.

Діаметр заготовки для вісесиметричних деталей зі складною криволінійною твірною визначається двома методами: графічно-аналітичним із застосуванням теореми Гульдена—Паппуша і графічним із застосуванням правила «мотузяного» багатокутника. Силові умови розрахунку — деформуючі зусилля та зусилля притиску, робота деформування.

На початковій стадії формозміни *деформуюче зусилля* — функція кута обхвату α (рис. 3.28):

$$P_\alpha = 2\pi\rho s\sigma_{\rho\ max}\sin\alpha,$$

де $\rho = r - r_n(1 - \sin\alpha)$.

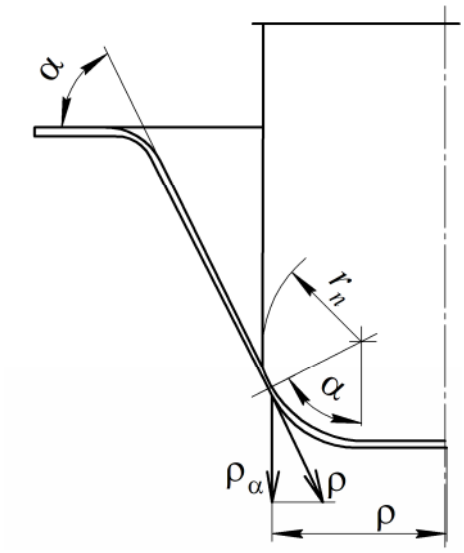


Рис.3.28. Схема дії сил на початковій стадії витяжки

Із наведеної формули випливає, що при куті α, близькому до нуля, деформуюче зусилля близьке до нуля навіть за великого значення $\sigma_{\rho\ max}$. Це пояснюється тим, що проекції елементарних сил, викликаних напруженнями $\sigma_{\rho\ max}$, на вісь пуансона малі.

У міру втягування заготовки в матрицю кут α наближається до $\pi/2$, після досягнення цього значення він залишається практично незмінним і на зусилля не впливає.

У разі збільшення кута α збільшується і проекція вектора $\sigma_{\rho\ max}$ на вісь пуа-

нсона, досягаючи найбільшого значення при $\alpha = \pi/2$:

$$P_{max} = 2\pi rs\sigma_{\rho\ max}. \qquad (3.44)$$

Підставляючи значення $\sigma_{\rho\ max}$ згідно з формулами (3.20), (3.32) і (3.34) в (3.44), можна одержати формули для розрахунку деформуючого зусилля з притиском і без притиску заготовки на першому й подальших переходах витяжки.

У тих випадках, коли треба підібрати устаткування за силовим параметром, деформуюче зусилля визначають приблизно за спрощеними формулами. Наприклад, зусилля витяжки можна обчислити як добуток найбільшого в осередку пластичної деформації радіального напруження (3.22) та площі поперечного перерізу деталі діаметром d. Після заміни у формулі (3.22) σ_s на $\sigma_в$ і розвинення в ряд логарифма відношення D_0/d, що є в цій формулі (коли до уваги береться тільки перший член ряду), формула для розрахунку деформуючого зусилля набуває вигляду

$$P_в \cong \pi ds(K_в - 1)\sigma_в, \qquad (3.45)$$

Вплив зміцнення й сил тертя в цій формулі до певної міри компенсується тим, що $\frac{D_0}{d} - 1 > \ln\frac{D_0}{d}$ і $\sigma_в > 0$.

Згідно з рекомендаціями В. П. Романовського [5] деформуюче зусилля визначається як добуток тимчасового опору розриву $\sigma_в$, площі поперечного перерізу деталі, що витягається, і поправкового коефіцієнта ξ, значення якого залежить від ступеня деформації, відносної товщини заготовки й порядкового номера переходу витяжки:

$$P_в \cong \xi\sigma_в\pi s.$$

Значення коефіцієнта ξ знаходять за таблицями, складеними на основі узагальнення експериментальних даних. Для першого переходу витяжки $\xi_1 = 0{,}28 \div 1{,}1$, для другого — $\xi_2 = 0{,}15 \div 1{,}1$ і т.д. Значення ξ збільшується зі збільшенням ступеня деформації та відносної товщини заготовки.

Зусилля притиску заготовки повинне задовольняти дві умови, а саме: воно має бути не настільки велике, щоб викликати відрив дна під час витяжки, і не настільки мале, щоб утворилися складки в зоні пластичної деформації (у зоні фланця заготовки).

Приблизно зусилля притиску Q можна подати як добуток середнього питомого зусилля q, яке задовольняє поставлені умови, та площі фланця деталі $F_{фл}$, що знаходиться під притискним кільцем у початковий момент витяжки:

$$Q = qF_{фл}.$$

У разі витяжки циліндричних деталей із плоскої заготовки зусилля притиску дорівнюватиме

$$Q = 0{,}785\left[D_0^2 - (d + 2r)^2\right]q. \qquad (3.46)$$

На подальших переходах витяжки зусилля притиску визначається за схо-

жою формулою:

$$Q = 0{,}785\left[d_{n-1}^2 - (d_n + 2r)^2\right]q, \qquad (3.47)$$

де n – порядковий номер переходу витяжки; d_{n-1} і d_n – діаметри напівфабрикатів на попередньому й подальшому переходах витяжки.

Питоме (середнє) зусилля притиску q залежить в основному від механічних властивостей матеріалу, товщини заготовки, а також від ступеня деформації. Залежно від перерахованих факторів згідно з даними, наведеними в довідковій літературі, q = 4,5 ÷ 0,8 МПа, чим тонша заготовка і більше $K_в = D_0/d$, тим питоме зусилля притиску більше [5].

Для обчислення зусилля притиску під час втягування плоскої заготовки в матрицю можна застосовувати наближену формулу, одержану в результаті обробки експериментальних даних [3]:

$$Q = 0{,}1\left[1 - \frac{18K_в s}{(K_в - 1)D_0}\right]K_в^2 P_в, \qquad (3.48)$$

де $P_в$ – деформуюче зусилля, визначуване за формулою (3.45).

Із формули (3.48) випливає, що зусилля притиску Q зростає зі збільшенням $K_в = D_0/d$, зусилля $P_в$ і зі зменшенням відносної товщини заготовки s/D_0. При $D - d < 18s$ $Q = 0$, тобто застосовувати притиск не потрібно.

Установлено, що під час витяжки зусилля притиску може змінюватися від Q_{max} до Q_{min}. Інтервал $Q_{max} - Q_{min}$ залежить від ступеня деформації заготовки: чим він вищий, тим інтервал зміни Q менший. Тільки в разі витяжки з гранично допустимим ступенем деформації зусилля притиску повинне бути цілком визначеним і єдиним.

Звідси випливає, що чим вищий ступінь деформації під час витяжки, тим ретельнішою повинна бути настройка процесу відносно зазору між дзеркалом матриці та дзеркалом притискного кільця штампа.

Дослідження показали, що в процесі витяжки зусилля притиску, яке забезпечує відсутність складок, змінюється одночасно зі зменшенням ширини фланця деталі, що витягається, і залежить від підсумкового ступеня деформації по товщині та механічних властивостей її матеріалу.

Роботу деформації A можна визначити інтегруванням рівняння, яке функціонально зв'язує деформуюче зусилля $P_в$ і шлях пуансона:

$$A = \int P_в dh = 2\pi r s \int \sigma_{\rho\ max} dh. \qquad (3.49)$$

За відсутності зміцнення ψ_p = 0 для даних умов деформування формула (3.32) для обчислення $\sigma_{\rho\ max}$ може бути подана у вигляді

$$\sigma_{\rho\ max} = \beta\sigma_s\left[\ln\frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_s} + \frac{s}{2r_м + s}\right](1 + 1{,}6\mu). \qquad (3.50)$$

У цій формулі радіус фланця R, що змінюється в процесі витяжки, визначається з умови рівності площ поверхонь заготовки і деталі. При малих порівняно з діаметром заготовки $r_м$ і $r_п$

$$R = \sqrt{R_0^2 - 2rH}\,. \qquad (3.51)$$

Сумісне розв'язання за формулами (3.49) – (3.51) з урахуванням перетворення логарифмічної функції, що входить у формулу (3.50), дозволяє визначити роботу деформації під час витяжки металу, що не зміцнюється [6]:

$$A = \pi r^2 (K_в - 1) s\sigma_s \left[\ln K_в - \frac{K_в^2 - 1}{4K_в^2} + \frac{2\mu Q}{\pi r s (K_в + 1)\sigma_s} + \frac{s}{2r_м + s} \right] (1 + 1{,}6\mu), \qquad (3.52)$$

де $K_в = D/d$.

Аналіз формули (3.52) показує, що робота деформації збільшується зі збільшенням $K_в$, коефіцієнта тертя μ, зусилля притиску Q, відносної товщини заготовки s/D і радіуса r деталі, що витягається. При $K_в = 1$ $A = 0$.

Граничний (критичний) ступінь деформації. Ступінь деформації в процесі витяжки характеризується відносним скороченням площі поперечного перерізу деталі, що витягається, за приблизно незмінної товщини стінки. З урахуванням цього ступінь деформації

$$\psi = \frac{d_{N-1} - d_N}{d_N} = 1 - \frac{d_N}{d_{N-1}}.$$

Ступінь деформації та коефіцієнт витяжки зв'язані залежністю

$$\psi = \frac{K_в - 1}{K_в}, \qquad (3.53)$$

з якої випливає, що чим вищий ступінь деформації (відносне зменшення діаметра напівфабрикату, що витягається), тим значення $K_в$ більше.

Існує граничний (критичний) ступінь деформації $\psi_к$ і, отже, граничний (критичний) коефіцієнт витяжки $K_{вг}$, при якому напруження в небезпечному перерізі напівфабрикату, що витягається, близькі до руйнівних.

Визначення граничного (критичного) коефіцієнта витяжки теоретичним шляхом досить складне. Це зумовлене тим, що розтягальні напруження, необхідні для пластичної формозміни фланця, залежать від великої кількості факторів, ступінь впливу яких встановлений лише приблизно з огляду на ряд припущень стосовно аналізу напружено-деформованого стану, а умови руйнування напівфабрикату ґрунтуються на експериментальних даних. Тому знайти граничний коефіцієнт витяжки теоретично можна тільки приблизно, основною метою при цьому є встановлення функціонального зв'язку між досліджуваним параметром і факторами, що впливають на його значення.

Один із розв'язків задачі визначення граничного коефіцієнта витяжки першої операції в ході штампування з притиском заготовки в циліндричній матриці,

яка має радіальну вхідну частину, був одержаний з урахуванням зміцнення металу, контактних сил тертя і згинаючих напружень у результаті застосування рівняння (3.32) і взятої умови рівності $\sigma_{\rho\ max}$ напруженню $\sigma_в$ [7]:

$$K_{вг} = \exp\left[0{,}9\left(\frac{1}{1+1{,}6\mu} - \frac{s}{2r_м + s} - \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_в}\right)^{1-\psi_p}\right]. \qquad (3.54)$$

Розрахунки за формулою (3.54) дають наближений результат, проте вона відображає фізичну суть процесу витяжки, оскільки її аналіз дозволяє встановити характер і ступінь впливу врахованих факторів на значення $K_{вг}$.

Зауважимо, що умова $\sigma_{\rho\ max} = \sigma_в$ наближена, оскільки значення $\sigma_{\rho\ max}$ дійсне, а значення $\sigma_в$ — умовне. Крім того, встановлена експериментально умова відриву дна в процесі витяжки має вигляд $\sigma_{\rho\ max} = (1{,}1 \div 1{,}2)\sigma_в$. Поправковий коефіцієнт $(1{,}1 \div 1{,}2)$ якоюсь мірою компенсує вказане припущення, не порушуючи функціональної залежності між $K_{вг}$ і факторами, що впливають на його значення.

Під час витяжки деталей із малою відносною товщиною стінки $\left(s/D\,100 < 0{,}1\right)$ утворення складок (гофрів) має своєрідний характер: замість хвиль, що перетинають увесь фланець, утворюється велика кількість дрібних складок малої довжини в радіальному напрямі. При цьому створюються умови, за яких питоме зусилля притискного кільця розподіляється по всій поверхні фланця рівномірно, отже,

$$q = \frac{Q}{\pi(R_0^2 - r^2)}.$$

З урахуванням цього одержується така формула для визначення радіального розтягального напруження [7]:

$$\sigma_{\rho\ max} = \beta\sigma_s\left[\ln\frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_s} + \frac{s}{2r_м + s}\right](1 + 1{,}6\mu). \qquad (3.55)$$

Порівнюючи результати розрахунків за формулами (3.55) і (3.32), можна встановити, що в разі рівномірного розподілу по поверхні фланця питомого зусилля притиску (отже, і сил тертя) напруження в небезпечному перерізі більші, ніж у випадку прикладення питомого зусилля (і сил тертя) тільки до крайової ділянки фланця.

Якщо в процесі розв'язання тієї самої задачі застосовувати степеневу апроксимацію кривої зміцнення вигляду $\sigma_s C\varepsilon^n$ (де $\varepsilon = \ln\frac{r}{r_м}$ – логарифмічний ступінь деформації), то одержати результат у вигляді аналітичної функції не вдається. Тому числове розв'язання задачі можна виконати тільки методами математичного моделювання з використанням ЕОМ.

На граничну формозміну під час витяжки позитивно впливає анізотропія механічних властивостей холоднокатаного листа. При коефіцієнті нормальної ані-

зотропії $R^* > 1$ метал добре чинить опір стоншенню, гранична формозміна за одну операцію збільшується. У даному випадку беруть до уваги мінімальний коефіцієнт анізотропії R^*_{min} (а не максимальний або середній), оскільки граничний стан (поява шийки) виникає між фестонами, у западині, тобто в напрямі R^*_{min}.

Граничний коефіцієнт витяжки з урахуванням анізотропії металу можна визначити, якщо використати умову текучості Мізіса—Хілла. Для трансверсально-ізотропного металу за плоского деформованого стану умова текучості в скороченому записі має вигляд

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s,$$

де

$$\beta = \frac{1 + R^*}{\sqrt{1 + 2R^*}}. \qquad (3.56)$$

Із формули (3.56) випливає, що зміна R^* від 1 до 2 викликає збільшення β приблизно в 1,2 разу і впливає на розрахункову величину $K_{кр}$.

Допустимі коефіцієнти витяжки можуть бути визначені на основі експериментів і виробничих даних. У довідковій літературі є спеціальні таблиці для встановлення допустимих коефіцієнтів витяжки, які широко використовуються в інженерній практиці в ході проектування технологічних процесів виробництва штампованих деталей. У праці [5] коефіцієнти витяжки ($m_в$) наведені у вигляді відношення d/D_0 або d_N/d_{N-1} (де N – номер переходу витяжки), тому їх значення менші одиниці. Зв'язок між $K_в$ і $m_в$ такий: $m_в = 1/K_в$.

Якщо багатоперехідна витяжка ведеться без міжопераційного відпалу, то під час збільшення порядкового номера переходу N значення $K_в$ зменшується внаслідок зростання зміцнення матеріалу заготовки. Різниця в значенні істотна лише на першому та другому переходах витяжки ($K_1 > K_2$). У разі виконання подальших переходів значення $K_в$ змінюється незначно. Із відомим наближенням можна вважати, що $K_2 \cong K_3 \cong K_4 \ldots K_N = \text{const}$. Указане явище пояснюється тим, що зі збільшенням ступеня деформації інтенсивність зміцнення металу поступово зменшується.

Визначення кількості операцій (або переходів) і розмірів напівфабрикатів під час витяжки циліндричних деталей. Якщо відомі допустимі коефіцієнти витяжки для першої та подальших операцій (розраховані або взяті згідно з експериментальними даними), діаметри напівфабрикатів за переходами витяжки легко визначаються відповідно до таких залежностей (рис. 3.29):

$$d_1 = \frac{D_0}{K_1}; \quad d_2 = \frac{d_1}{K_2}; \quad d_3 = \frac{d_2}{K_3} = \frac{D_0}{K_1 K_2 K_3}. \qquad (3.57)$$

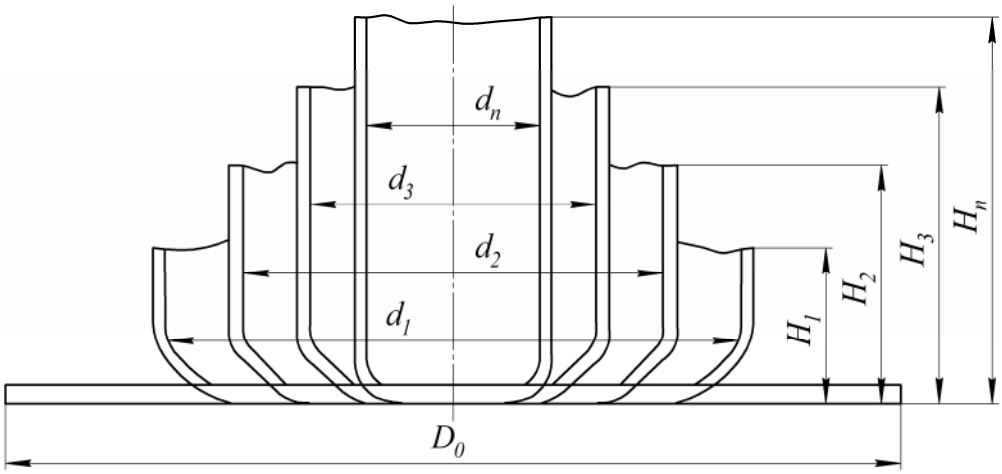


Рис. 3.29. Схема до визначення переходів (операцій) витяжки

Оскільки в разі витяжки без міжопераційних відпалів $K_2 \cong K_3 \cong \ldots \cong K'$,

$$d_2 = \frac{D_0}{K_1 K'}; \qquad d_3 = \frac{D_0}{K_1 (K')^2}; \qquad d_N = \frac{D_0}{K_1 (K')^{N-1}} \tag{3.58}$$

де N – кількість операцій (переходів) витяжки. Більш точно K' визначають як середньоарифметичне значення коефіцієнтів витяжки на подальших переходах: $K' = (K_2 + K_3 + \ldots + K_N)/(N - 1)$. Для обчислення N можна прологарифмувати рівняння (3.58):

$$N = 1 + \frac{\lg d_N - \lg(D_0 / K_1)}{\lg(1/K')}. \tag{3.59}$$

Розрахувавши діаметри напівфабрикатів після кожної операції витяжки й задавши радіус округлення r_n (див. рис. 3.27, *б*), визначають висоти напівфабрикатів $H_1, H_2, \ldots, H_N$ з умови рівності площ поверхонь заготовки й деталі:

$$0{,}785 D_0^2 = F_1 = F_2 = \ldots = F_N,$$

де $F_1, F_2, \ldots, F_N$ – площі поверхонь напівфабрикатів після кожної операції витяжки. Застосовуючи рівняння (3.41), можна одержати формулу для обчислення висоти циліндричного напівфабрикату без фланця:

$$H = \frac{D_0^2 - d_1^2 - 2r_n(\pi d_1 + 4r_n)}{4d} + r_n - \Delta H, \tag{3.60}$$

де ΔH – припуск на обрізання нерівного краю, решта позначень показана на рис. 3.27, *б*.

Висоти напівфабрикатів по переходах витяжки приблизно визначаються за формулою (3.60), у якій узяті $r_n = 0$ і $\Delta H = 0$, після чого вона набуває вигляду

$$H_N = \left(D_0^2 - d_N^2\right) \Big/ 4d_N, \tag{3.61}$$

де d_N – діаметр напівфабрикату після N переходів.

Формулу (3.61) застосовують у процесі розрахунку висоти робочої частини

пуансона для витяжки, висот притискних кілець і під час вибору преса за ходом повзуна.

Радіус округлення робочих кромок матриці $r_м$, як це випливає з формули (3.54), зумовлює значення граничного коефіцієнта витяжки $K_в$. Зі збільшенням $r_м$ коефіцієнт витяжки $K_в$ збільшується. Проте надмірне збільшення радіуса округлення кромки матриці спричиняє зменшення площі заготовки, яка знаходиться під притискним кільцем штампа, що може призвести до утворення гофрів (складок). Крім того, дослідження формули (3.54) показує, що збільшення радіуса округлення матриці більше ніж на 6 – 10 значень товщини заготовки не дає істотного збільшення $K_в$. Тому значення радіуса округлення робочих кромок матриці беруть такими, що дорівнюють $r_м = (6 \div 10)s$, де s – товщина заготовки. Менші значення — для металу товщиною понад 4 мм, а більші — для тоншого металу.

3.2.5. Витяжка вісесиметричних деталей, відмінних від циліндричних

Витяжкою можна одержувати вісесиметричні деталі, відмінні за своєю формою від циліндричних, а саме із широким фланцем, східчасті, конічні, із криволінійною твірною (зокрема, сферичні) та ін.

Виготовлення перерахованих деталей становить певні труднощі у зв'язку з тим, що умови їх формозміни менш сприятливі, ніж умови витяжки циліндричних деталей без фланця або з малим фланцем. Тому під час штампування вісесиметричних деталей, відмінних формою від циліндричних, застосовують певні прийоми, що дозволяють одержувати їх без руйнування.

Багатоперехідну витяжку деталей із широким фланцем можна здійснювати без притиску заготовки двома способами: втягуванням її в матрицю пуансоном (рис. 3.30, *а*) шляхом передачі тиску її донній ділянці з подальшою правкою фланця в окремому штампі або витяжкою з одночасним проштовхуванням заготовки в матрицю силою, прикладеною до ділянки торця заготовки, і правкою фланця в кінцевий момент витяжки (рис 3.30, *б*) на багатопозиційних листоштампувальних автоматах.

Другий спосіб витяжки має переваги порівняно з першим, оскільки під час проштовхування створюються осьові стискаючі напруження, які розвантажують небезпечний переріз деталі, і це дозволяє вести багатоперехідний процес без міжопераційного відпалу з високим ступенем підсумкової деформації.

Особливість технології витяжки деталей із широким фланцем полягає в тому, що після першого переходу одержують діаметр фланця, передбачений кресленням деталі (із припуском на обрізання). На всіх подальших переходах цей діаметр залишається незмінним, формозміна відбувається внаслідок зменшення діаметра циліндричної частини напівфабрикату, збільшення ширини фланця та висоти деталі (рис. 3.31).

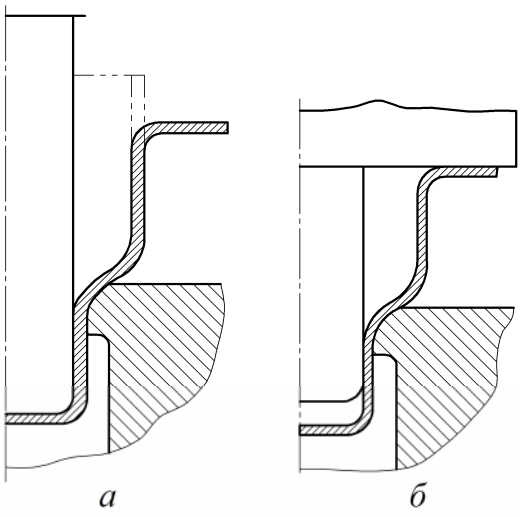


Рис.3.30. Схема витяжки проштовхуванням заготовки

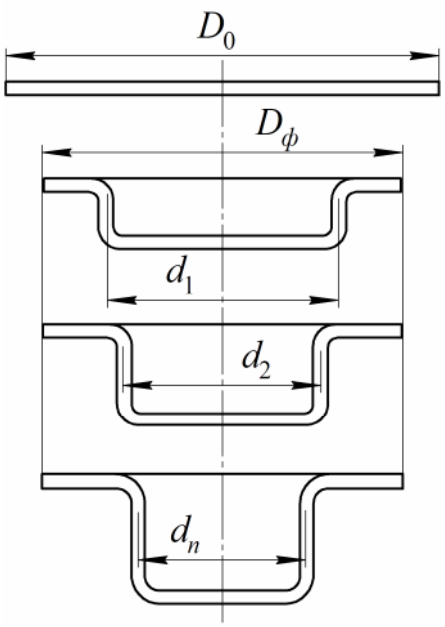


Рис.3.31. Схема переходів витяжки деталей із широким фланцем

Висота напівфабрикату на першому переході витяжки h визначається з умови рівності площ поверхонь заготовки і деталі:

$$h_1 = \frac{D_0^2 - d_ф^2}{4d_1} + 0{,}86r_n,$$

де d_1 – діаметр напівфабрикату після першої операції витяжки; $d_ф$ – діаметр фланця.

Висоту напівфабрикату на подальших переходах витяжки h_N обчислюють за формулою [5]

$$h_N = (h_{N-1} - 0{,}86r_{N-1})K_в + 0{,}86r_N,$$

де r_{N-1} і r_N – радіуси напівфабрикатів по переходах витяжки; $K_в = d_{N-1}/d_N$ – коефіцієнт витяжки.

На сумарний ступінь деформації в процесі витяжки з проштовхуванням істотно впливає розподіл об'єму металу за операціями. Під дією сили, що проштовхує напівфабрикат, стінка напівфабрикату стовщується і її стовщена ділянка частково витісняється у фланець, у зв'язку з чим об'єм напівфабрикату, який зазнає формозміни, зменшується. У результаті цього під час витяжки може бути відірване дно деталі. Для того щоб процес витяжки відбувався стійко, необхідно при розрахунку висот напівфабрикатів передбачити деякий надлишок металу на попередній операції порівняно з подальшою. На першій операції рекомендується набрати на 20 – 25 % металу більше порівняно з останньою операцією і рівномірно розподілити його за рештою операцій.

У разі витяжки деталей із широким фланцем проштовхування заготовки здійснюється передбаченим у штампі штовхачем, що спирається на буферний

пристрій, або пуансоном із буртом. Пуансон із буртом не тільки проштовхує заготовку в матрицю, але на заключній стадії процесу розгинає і править її фланець. Етапи формозміни деталі під час витяжки з широким фланцем показані на рис. 3.32. Надмірно велике зусилля проштовхування призводить до втрати стійкості напівфабрикату, внаслідок чого з'являються кільцеві опуклості в місці сполучення ділянки вільного вигину і циліндричної частини напівфабрикату, що не деформується. Втрата стійкості відбувається періодично, що спричиняє зміну зусилля проштовхування й утворення кільцевих смуг на циліндричній поверхні напівфабрикату. Для запобігання цьому необхідно зменшити зусилля проштовхування за рахунок зменшення контактних сил тертя (використання мастила) або збільшення радіуса округлення робочої кромки матриці.

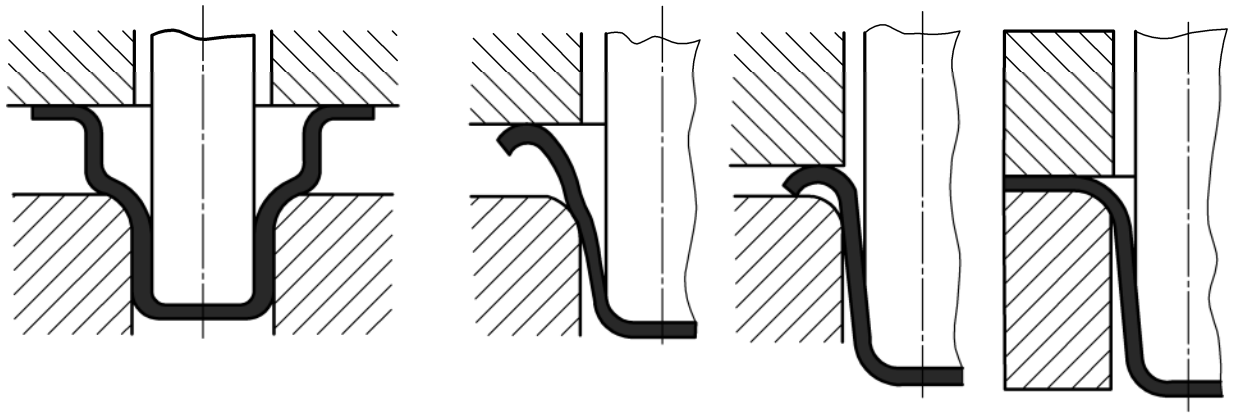


Рис. 3.32. Схематичне зображення стадій формозміни під час витяжки та проштовхування деталі з широким фланцем

Східчасті вісесиметричні деталі одержують, як правило, багатоопераційною витяжкою (рис. 3.33). Перший виступ діаметром d_1 витягають із плоскої заготовки за одну або декілька операцій, після чого діаметр d_1, як і діаметр фланця D_ϕ (якщо кресленням деталі передбачений фланець), залишається незмінним, а подальші виступи діаметром d_2, d_3 і т.д. одержують у результаті перерозподілу металу аналогічно технології штампування деталей із широким фланцем. Висоти напівфабрикатів по операціях витяжки визначають з умови рівності площ поверхонь із високою точністю. Відсутність надлишку висоти напівфабрикату, одержаного на попередній операції, призводить до відриву дна на подальшій операції витяжки. Надлишок (3 – 5 %) поверхні напівфабрикату, втягнутого в матрицю, виключає можливість відриву, він повинен братись до уваги в процесі розрахунку висот напівфабрикатів.

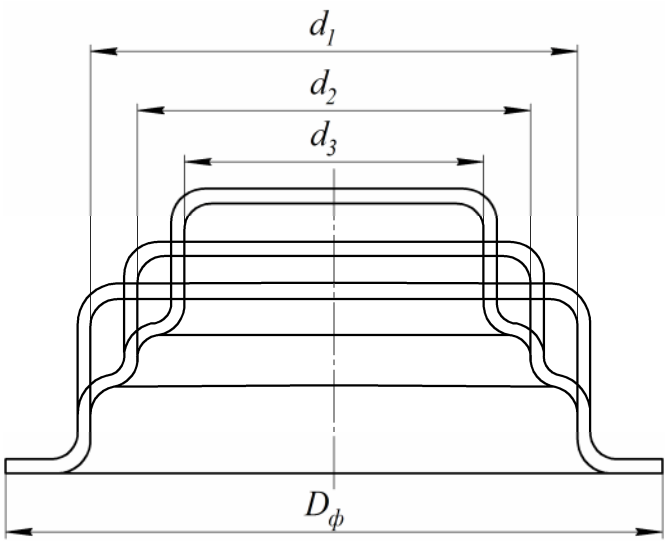


Рис. 3.33. Схема переходів витяжки східчастої деталі

У тому разі, якщо підсумковий коефіцієнт витяжки $K_в$ більший допустимого, витяжка східчастої деталі можлива за одну операцію. У даному випадку формування виступів у кінцевий момент штампування супроводжується зменшенням товщини стінки в кутових ділянках деталі. Існує емпірична формула для визначення підсумкового коефіцієнта витяжки східчастої деталі

$$K_{в\,п} = \frac{h_1/h_2 + h_2/h_3 + ... + h_{N-1}/h_N + 1}{h_1 d_1/h_2 D_0 + h_2 d_2/h_3 D_0 + ... + h_{N-1} d_{N-1}/h_N D_0 + d_N/D_0}, \qquad (3.62)$$

де h_N і d_N – висоти і діаметри виступів відповідно, починаючи від виступу найбільшого діаметра. Якщо $K_в < K_{в\,п}$, штампування східчастої деталі можливе за одну операцію.

Витяжкою можна одержувати деталі конічної форми: низькі — у вигляді зрізаного конуса (рис. 3.34, *а*) і високі, загострені — з малим або великим кутом конуса (рис. 3.34, *б*).

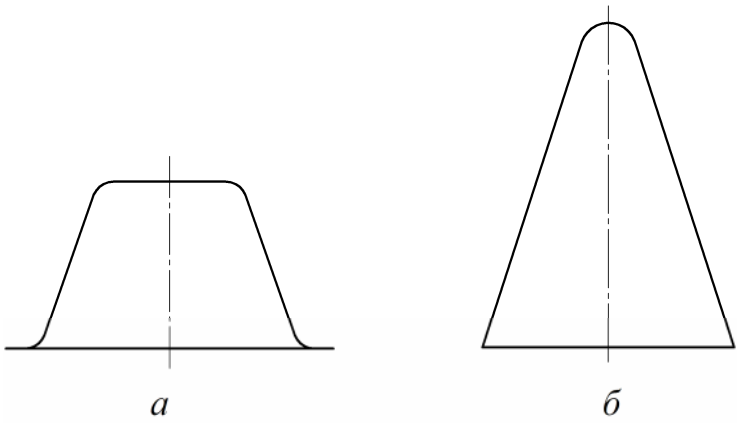


Рис. 3.34. Конічні деталі

Особливість умов деформації конічних деталей під час витяжки їх із плоских заготовок полягає в тому, що пуансон штампа для витяжки контактує тільки з невеликою центральною ділянкою заготовки, а інша її кільцева частина контактує

з матрицею і притискним кільцем та залишається вільною, не навантаженою зовнішніми силами (рис. 3.35, *а*).

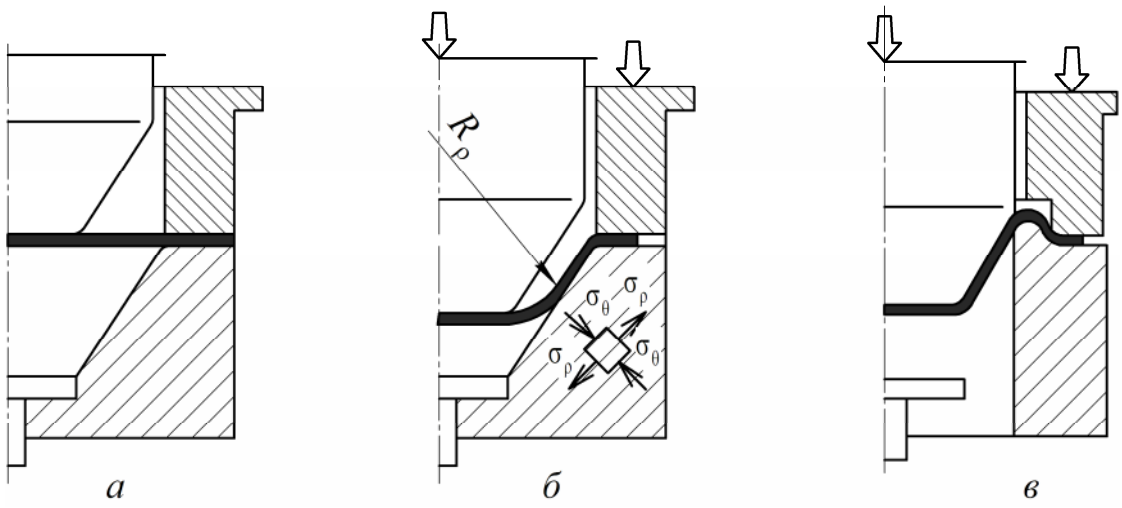


Рис. 3.35. Схеми витяжки низьких конічних деталей

У міру опускання пуансона на цій ділянці деталі, що витягається, виникають радіальні σ_ρ і тангенціальні σ_θ напруження. Умова рівноваги елемента, що знаходиться в даній зоні, виводиться за допомогою проектування сил на нормаль до серединної поверхні елемента (рівняння Лапласа). При $\sigma_n = 0$ вона має вигляд $\sigma_\rho/R_\rho + \sigma_\theta/R_\theta = 0$, звідки $R_\rho = -R_\theta\sigma_\rho/\sigma_\theta$, де R_ρ і R_θ – радіуси кривизни серединної поверхні елемента заготовки в меридіональному і тангенціальному перерізах.

При $\sigma_\theta = 0$ $R_\rho = \infty$, тобто тільки за відсутності тангенціальних напружень твірна деталі може бути прямолінійною, при всіх інших значеннях σ_θ — криволінійною. Наприклад, за різних знаків напружень σ_ρ і σ_θ твірна деталі опукла і має той же знак кривизни, що й кривизна тангенціального перерізу (рис. 3.35, *б*). Проте при $\sigma_\theta = 0$ згідно з умовою пластичності $\sigma_\rho = \beta\sigma_s$, що під час витяжки неприпустиме, оскільки може відбутися обрив дна деталі. Тому, якщо необхідно одержати низьку конічну деталь із прямолінійною твірною, у технологічному процесі слід передбачати операцію правки конічної ділянки деталі.

Під дією тангенціальних стискаючих напружень σ_θ конічна ділянка деталі (що знаходиться поза притиском) може втратити стійкість, унаслідок чого з'являться складки. Для того щоб зменшити стискаючі напруження σ_θ, необхідно штучно збільшити розтягальні напруження σ_ρ, які діють у радіальному напрямі, з огляду на умову пластичності $\sigma_\rho + \sigma_\theta = \beta\sigma_s$.

Один зі способів збільшення радіальних напружень — витяжка в матриці з перетяжним порогом (рис. 3.35, *в*), який створює додатковий опір на шляху переміщення фланця заготовки щодо матриці, збільшуючи напруження σ_ρ. Проте збільшення радіальних розтягальних напружень викликає стоншення стінки, що мо-

же призвести до руйнування деталей. Тому розміри перетяжних порогів повинні бути підібрані так, щоб збільшення радіальних напружень не спричинило відрив дна деталі.

Матриці з порогами перетяжок застосовують під час витяжки відносно низьких деталей, що мають форму зрізаного конуса висотою $H \le 0{,}3d$, де d – діаметр більшої основи конуса. Витяжку деталей конічної форми середньої висоти $0{,}7d > H > 0{,}3d$ можна здійснювати без притиску або з притиском заготовки залежно від відносної товщини заготовки $(s/D_0)100$. При $(s/D_0)100 > 2{,}5$ витяжку проводять без притиску в закритій матриці з плавною вхідною частиною в одну операцію з правкою в кінці ходу (рис. 3.36, *а*).

Якщо $(s/D_0)100 < 2{,}5$, витяжку здійснюють із притиском фланця і, як правило, за дві операції (рис. 3.36, *б*). При цьому напівфабрикат, одержаний після першої операції витяжки, має плавні обриси контуру, його діаметр дорівнює діаметру великої основи конуса, а висота визначається з умови рівності площ поверхонь деталі (або напівфабрикату) і заготовки.

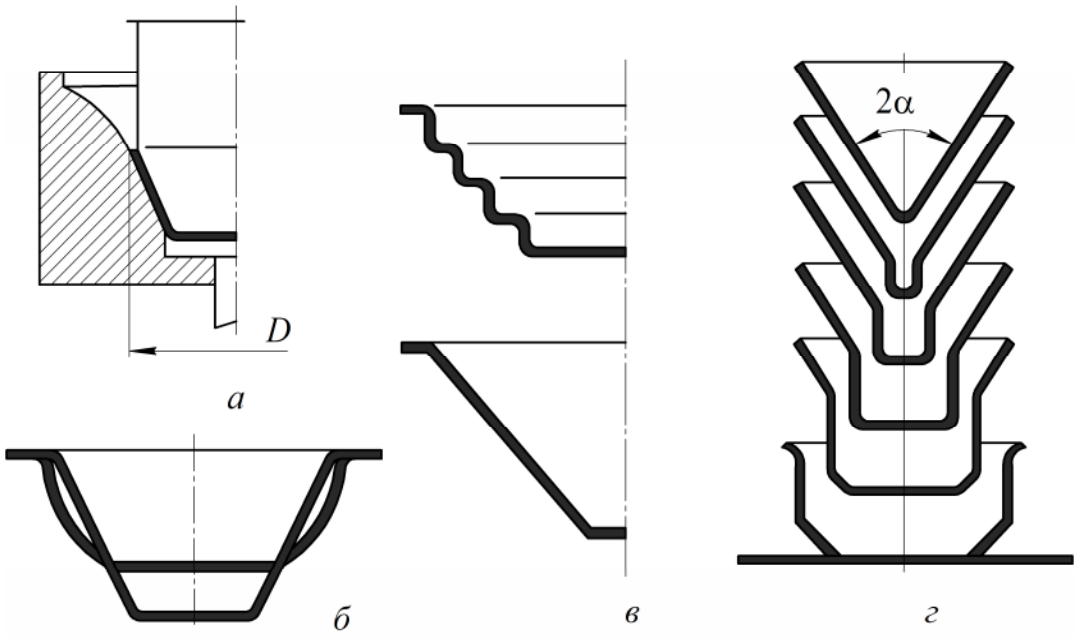


Рис. 3.36. Схема витяжки конічних деталей:
а – за одну операцію для деталей середньої висоти; *б* – за дві операції для деталей середньої висоти; *в*, *г* – переходи витяжки високих конічних деталей

Високі конічні деталі з великим кутом нахилу твірної (30 – 60°), висота яких $H > 0{,}7d$, витягають за кілька операцій одним із таких способів.

Перший спосіб полягає в багатоопераційній витяжці східчастого напівфабрикату з подальшим розтягуванням і правкою в спеціальному штампі (рис. 3.36, *в*). Даний спосіб не забезпечує одержання гладкої поверхні. Тому необхідно проводити обробку (вигладжування) деталі на ротаційному верстаті.

За другим способом на першій операції витягується циліндричний напівфа-

брикат, діаметр якого дорівнює діаметру основи конуса, після чого за кожну подальшу операцію витяжки утворюється конічна поверхня, яка збільшується (рис. 3.36, *г*). Якість поверхні готової деталі, одержаної другим способом, вища.

У разі витяжки високих конічних деталей другим способом на всіх переходах, окрім першого, для запобігання утворенню складок беруть більш високі значення допустимих коефіцієнтів витяжки, наприклад, для низьковуглецевих сталей $K_в = 1{,}2 \div 1{,}35$.

Під час витяжки конічних деталей діаметри напівфабрикатів за переходами визначаються так само, як і у випадку витяжки циліндричних деталей, тобто діаметр циліндричної частини подальшого переходу дорівнює діаметру циліндричної частини попереднього переходу, поділеному на відповідний коефіцієнт витяжки: $d_N = d_{N-1}/K_{в\,N}$.

Високі конічні деталі можуть бути виготовлені з порожнистих циліндричних напівфабрикатів — заготовок, одержаних витяжкою, подовжнім обтиском з боку дна. При цьому заготовка штовхається в конічну матрицю силою, прикладеною до її торця (рис. 3.37, *а*). У процесі обтиску діаметр донної частини заготовки поступово зменшується. Коли діаметр дна стає таким, що дорівнює приблизно половині діаметра початкової заготовки, плоска донна частина випинається, що сприяє оформленню вершини конуса. Кінцева стадія штампування конічної деталі подовжнім обтиском показана на рис. 3.37, *б*. За такого способу кількість переходів штампування порівняно з традиційними технологічними схемами послідовної витяжки конічних деталей скорочується [4].

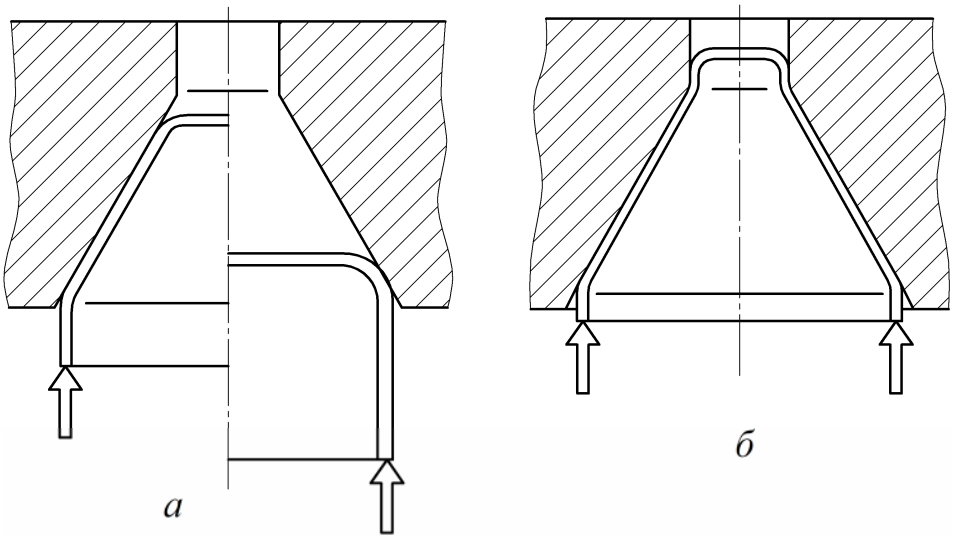


Рис. 3.37. Схема одержання високої конічної деталі подовжнім обтиском:
а – початкова стадія; *б* – завершальна стадія

Умови деформації півсферичних деталей, що витягаються з плоскої заготовки за одну операцію, багато в чому подібні до умов деформації конічних деталей.

Відмінність полягає в тому, що в процесі витяжки низьких конічних деталей ділянка заготовки, яка контактує з пуансоном, деформується пружно, а в разі витяжки півсферичних деталей уся заготовка, у тому числі й контактна її ділянка, деформується пластично. Крім того, у ході витяжки півсферичних деталей протяжність ненавантаженої, вільної ділянки заготовки в початковий період деформації ще більша, ніж під час витяжки конічних деталей.

Напружений стан різних ділянок заготовки в процесі витяжки неоднорідний: у центральній частині виникає двовісне розтягування, а поблизу робочої кромки матриці — стиснення з розтяганням. Форма твірної ненавантаженої ділянки криволінійна, опукла (рис. 3.38).

У зв'язку з тим, що центральна частина півсферичної деталі деформується в умовах двовісного розтягання, на цій ділянці відбувається стоншення стінки деталі і, отже, незначне збільшення її поверхні. Якщо сили тертя на контактній поверхні пуансона й заготовки малі або зовсім відсутні (наприклад, в умовах гідродеформування), надмірне стоншення центральної частини деталі може призвести до появи тріщин у її вершині або на деякому віддаленні від неї.

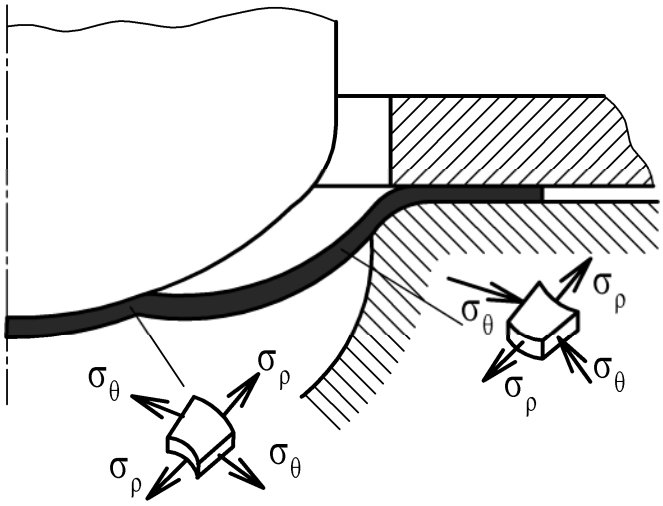


Рис. 3.38. Схема напруженого стану осередку деформацій у початковий момент витяжки півсферичної деталі

Для збільшення сил тертя, що блокують зону можливого руйнування (вершину деталі), застосовують штампи з протитиском, які притискають заготовку до пуансона, і штампи з пуансонами підвищеної шорсткості контактної поверхні.

Під час витяжки півсферичних деталей у вільній, ненавантаженій ділянці заготовки можливе утворення складок (гофрів), залежне від відносної товщини заготовки s/D_0. Тому спосіб витяжки півсферичних деталей вибирають за умови відсутності складок. Якщо відносна товщина заготовки $(s/D_0)100 > 3{,}0$, витяжку проводять без притиску за одну операцію в глухій матриці з формуванням і правкою в кінці ходу (рис. 3.39,*а*). Якщо відносна товщина заготовки $(s/D_0)100 < 3{,}0$,

витяжку півсферичних деталей виконують із притиском заготовки у відкритій матриці, у матриці з порогом перетяжки (рис. 3.39, *б*) або реверсивним способом (рис. 3.39, *в*).

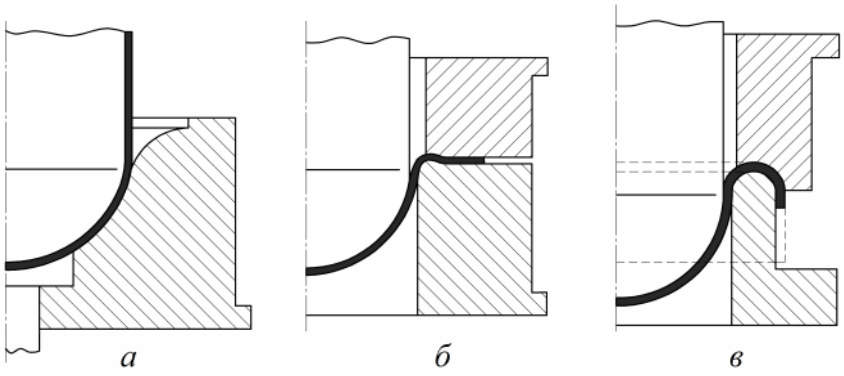


Рис. 3.39. Способи витяжки півсферичних деталей

Витяжку високих тонкостінних деталей із криволінійною твірною (типу відбивачів освітлювальної апаратури) здійснюють у декілька операцій. За першу операцію витягають порожнистий циліндр із плоским чи опуклим дном, діаметр якого більший діаметра основи деталі на подвоєну товщину стінки кільцевої матриці для реверсивної витяжки (на 30 – 50 мм). На подальших операціях (або переходах) виконують витяжку реверсивним способом (рис. 3.39, *в*).

Раціональний спосіб одержання днищ, який ґрунтується на поєднанні прямого і реверсивного способів витяжки, був розроблений Л. А. Шофманом і П. І. Локотошем. Перетягування заготовки через робочу кромку кільцевого пуансона-матриці (рис. 3.40) приводить до збільшення розтягальних напружень у донній частині деталі, що зменшує стискаючі напруження і, отже, можливість появи складок. Крім того, зменшення діаметра крайньої частини деталі, що піддається в початковий період деформування прямій витяжці, підвищує її стійкість. Невеликі складки, що утворюються в процесі витяжки, розгладжуються під час переміщення заготовки в зазорі між пуансоном і матрицею.

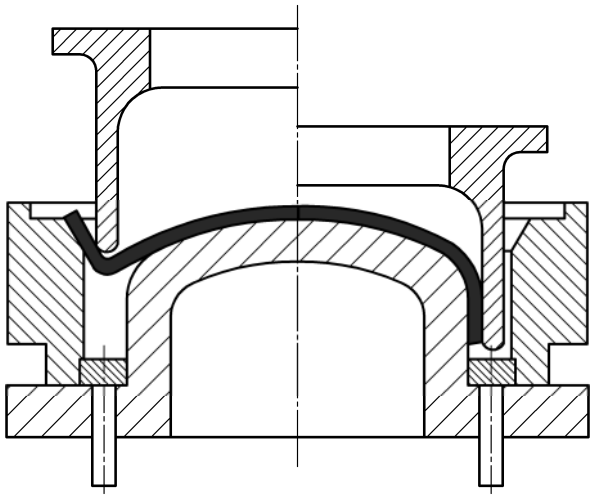


Рис. 3.40. Штамп для витягування реверсивним способом напівсферичного днища

3.2.6. Витяжка деталей коробчастої форми

Залежно від кількості операцій, необхідних для одержання коробчастих деталей потрібних розмірів, останні поділяються на низькі та високі. Низькі деталі витягають за одну операцію, високі — за дві і більше операцій.

Деталь коробчастої форми вважають низькою, якщо її відносна висота (відношення висоти деталі H до її ширини B) не більша 0,6, високою — якщо H/B > 0,6 ÷ 0,8. При цьому відносний кутовий радіус $\bar{r}_y$ повинен бути не меншим 0,1 ($\bar{r}_y = r_y / B \geq 0{,}1$).

Під час витяжки деталей коробчастої форми осередок пластичної деформації знаходиться в кутових ділянках фланця, він також охоплює зону сполучення фланця і бічних стінок. Напружений стан кутової ділянки фланця є плоский (стиснено-розтягнутий), деформований стан є об'ємний. Стан стінок деталі складний і нерівномірний напружено-деформований (стиснення уздовж контуру і розтягання по висоті) (рис. 3.41). Чим вища деталь, тим більш нерівномірний розподіл напружень і деформацій.

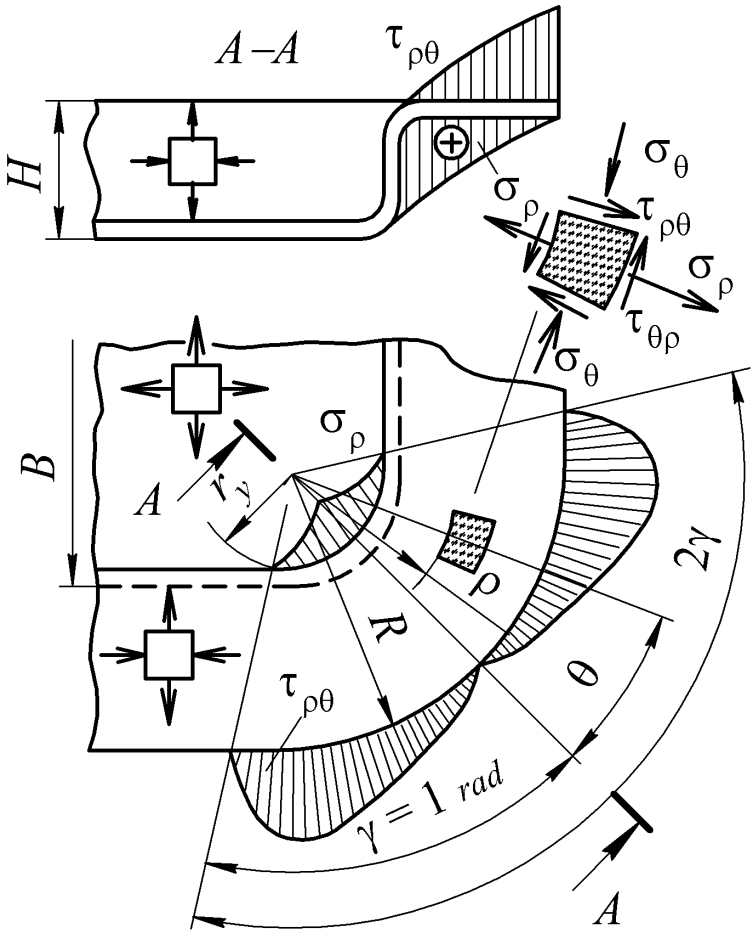


Рис. 3.41. Епюри напружень у фланці низької коробчастої деталі під час витяжки

У ході витяжки деталей коробчастої форми в кутових і криволінійних ділянках фланця виникають не тільки нормальні напруження σ_ρ і σ_θ, які діють у радіальному й тангенціальному напрямах, але й дотичні напруження $\tau_{\rho\theta}$ і (за законом парності) $\tau_{\theta\rho}$, що діють в напрямках, ортогональних до напрямів нормальних напружень (рис. 3.41). Ці дотичні напруження виникають унаслідок відсутності осьової симетрії деформації і, отже, нерівномірного розподілу деформацій по контуру деталі. На бісектрисі кутової ділянки дотичні напруження відсутні (у зв'язку з тим, що це вісь симетрії даної ділянки), а в місці сполучення криволінійної та прямолінійної ділянок контуру вони досягають найбільшого значення.

Оскільки метал є суцільний, дотичні напруження поступово убувають у двох взаємно протилежних напрямах: до бісектриси кута 2γ (рис. 3.41) і в напрямі прямолінійних ділянок контура.

Дотичні напруження змінюються й по ширині фланця, збільшуючись у міру наближення до периферійної його частини. Таким чином, дотичні напруження змінюються вздовж двох координат — ρ і θ (рис. 3.41).

О. Г. Овчинников одержав формулу для визначення радіального розтягального напруження, розв'язавши сукупно рівняння рівноваги й пластичності за граничної умови, згідно з якою при $\theta = 0$ і $\rho = R$ $\sigma_\rho = \mu Q/\pi Rs$:

$$\sigma_\rho = \left[\sigma_s \Big/ \gamma\sqrt{3}\right]\left[\ln\left(R \Big/ r_y\right) - \theta^2\right] + \mu Q \Big/ \pi Rs.$$

Аналіз цієї формули показує, що σ_ρ збільшується зі зменшенням координат ρ і θ. При $\rho = r_y$ і $\theta = 0$ радіальне розтягальне напруження досягає максимуму:

$$\sigma_{\rho\,max} = \left[\sigma_s \Big/ \gamma\sqrt{3}\right]\ln\left(R \Big/ r_y\right) + \mu Q \Big/ \pi Rs. \qquad (3.63)$$

Експериментально встановлено, що кут γ, який визначає протяжність осередку пластичної деформації, може бути взятий таким, що дорівнює одному радіану: $\gamma = 1\ rad$. У цьому випадку максимальне за осередком деформації радіальне розтягальне напруження складатиме

$$\sigma_{\rho\,max} = \left[\sigma_s \Big/ \sqrt{3}\right]\ln\left(R \Big/ r_y\right) + \mu Q \Big/ \pi Rs. \qquad (3.64)$$

Порівнюючи одержаний результат (без другого доданка) з формулою (3.22), можна встановити, що в процесі витяжки коробчастих деталей напруження $\sigma_{\rho\,max}$ на бісектрисі кута 2γ в 1,73 разу менше, ніж максимальне радіальне розтягальне напруження, що виникає в ході витяжки циліндричних деталей. Це пояснюється дією дотичних розвантажувальних напружень, що виникають унаслідок відсутності осьової симетрії деформації під час витяжки коробчастих деталей і спрямованістю цих напружень до центру криволінійної ділянки контуру на межі зон згинання і витяжки. Цей висновок добре підтверджується практикою — гранично допустимий ступінь деформації у разі витяжки низьких коробчастих деталей при-

близно в 1,5—2 рази вищий, ніж у випадку витяжки циліндричних деталей.

Під час витяжки тонкостінних коробчастих деталей у кутових ділянках виникають тангенціальні нормальні напруження, більші за значенням, ніж напруження, які діють уздовж прямолінійних ділянок. У зв'язку з цим у ході розвантаження виникають різні пружні деформації в кутових і прямолінійних ділянках, що приводять до появи стискаючих напружень, здатних викликати пружне згинання стінок. Це підтверджується тим, що навіть легке натиснення на стінку коробки супроводжується виляском (так званим "хлопуном"). Появі "хлопунів" можна запобігти, якщо в процесі витяжки надати стінкам коробки злегка овальної, опуклої форми або застосувати правку розтягуванням стінок на 2,5 – 4 % в спеціальному штампі з розсувним секторним пуансоном.

Визначення форм і розмірів заготовок. Розміри заготовок для деталей коробчастої форми встановлюють з умови рівності площ поверхонь заготовки і деталі, що витягається. Форма заготовок для коробчастих деталей залежить від співвідношення основних розмірів деталі: відносної висоти (H/B), відносної ширини (B/A) і відносного радіуса округлення кутових ділянок коробки (r_y/B) (рис. 3.42). Залежно від відносних розмірів застосовують різні способи побудови контуру заготовки. Ці способи й сфера їх застосування докладно описані в працях [3; 4; 5].

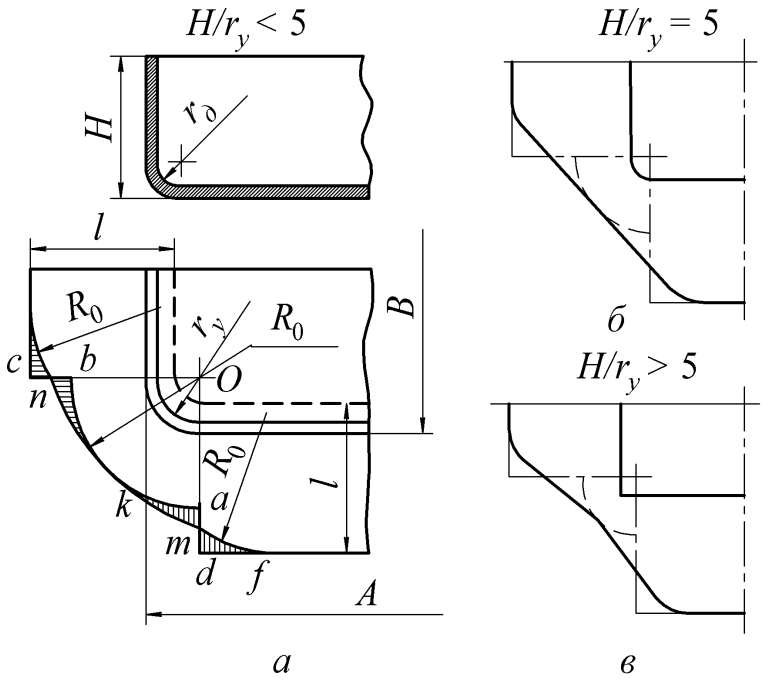


Рис. 3.42. Схема побудови контурів кутових ділянок заготовок для витяжки низьких коробчастих деталей з різним співвідношенням розмірів:
а – $H/r_y < 5$; *б* – $H/r_y = 5$; *в* - $H/r_y > 5$

Для прикладу розглянемо одну з методик побудови контуру заготовок для витяжки коробчастої деталі, у якої $H/r_y < 5$ (рис. 3.42, *а*).

1. Контур деталі в плані креслять у масштабі, після чого роблять розгортку прямолінійних ділянок контуру деталі на площину. Довжину розгортки l (рахуючи від плоскої ділянки дна деталі) визначають як у випадку звичайного згинання:

$$l = H + 0{,}57r_{\partial}.$$

2. За формулою, виведеною з умови рівності поверхонь заготовки і деталі, розраховують радіус заготовки R_0, необхідний для одержання циліндра, вписаного в кутову ділянку коробки: $R_0 = \sqrt{r_y(r_y + 2H) - r_{\partial}(0{,}86r_y + 0{,}14r_{\partial})}$, де r_{∂} – радіус округлення дна циліндра. При малому r_{∂} $R_0 = \sqrt{r_y(r_y + 2H)}$.

3. Із центра O проводять дугу $a - b$ радіусом R_0 до перетину з прямими Oc і Od, які обмежують прямолінійні ділянки контуру заготовки.

4. Відрізки ad і bc ділять пополам і одержують точки m і n відповідно, через які проводять дотичні до дуги ab.

5. Після проведення дотичних прямолінійні ділянки контуру заготовки сполучають дугами, радіус яких R_0.

Розглянутий спосіб побудови контуру заготовки для витяжки низьких коробчастих деталей ґрунтується на припущенні, що нестачу металу (трикутник akm) компенсують його надлишком (трикутник adf) (рис. 3.42, *а*).

Форма кутової ділянки контуру заготовки залежить від співвідношення розмірів коробки H/r_y. При $H/r_y < 5$ контур кутової ділянки заготовки опуклий (рис. 3.42, *а*), при $H/r_y = 5$ — прямолінійний (рис. 3.42, *б*), при $H/r_y > 5$ — увігнутий (рис. 3.42, *в*).

Експериментально встановлено, що для виготовлення високих квадратних деталей можна використовувати заготовки у вигляді круга, діаметр яких визначають з умови рівності площ поверхонь. Якщо не зважати на радіуси округлення кутів і дна і з урахуванням цього не брати припуск на обрізання (що допустиме за орієнтовних розрахунків), то умова рівності поверхонь матиме вигляд $0{,}785D_0^2 = B^2 + 4BH$, звідки

$$D_0 = 1{,}13\sqrt{B(B + 4H)}. \qquad (3.65)$$

У випадку більш точних розрахунків з огляду на радіуси округлення кутових ділянок і дна деталі, що дорівнюють один одному ($r_y = r_{\partial} = r$), діаметр заготовки визначають за формулою

$$D_0 = 1{,}13\sqrt{B^2 + 4B(H_n - 0{,}43r) - 1{,}72r(H_n + 0{,}33r)}, \qquad (3.66)$$

де $H_n = H + \Delta H$ – висота деталі з припуском на обрізання (ΔH – припуск на обрізання); B – розмір коробчастої деталі.

Через неоднакові умови деформації на різних ділянках контуру, а також унаслідок анізотропії механічних властивостей матеріалу заготовки висота коробчастих деталей ще більш нерівномірна, ніж висота вісесиметричних деталей, оде-

ржуваних витяжкою. Тому в технологічному процесі виготовлення таких деталей передбачають обрізання нерівного краю. Припуск на обрізання ΔH залежить від відносної висоти деталі H/B. Чим вона більша, тим більший припуск. На основі дослідних даних припуск на обрізання беруть таким, що дорівнює 5 – 15 % висоти деталі H або обчислюють за емпіричною формулою $\Delta H \cong 0{,}8\sqrt{H}$.

Наведені дані служать лише для орієнтовних розрахунків розмірів заготовок, які уточнюють під час відпрацювання технологічного процесу витяжки.

Силові умови витяжки. У разі витяжки деталей коробчастої форми осьова симетрія деформації відсутня, тому радіальні розтягальні напруження розподіляються по контуру деталі нерівномірно. Крім того, як показали експерименти, у всіх елементах фланця деталі (у тому числі й прямолінійних), виникають не тільки розтягальні, але й стискаючі (уздовж контуру) нормальні напруження, які убувають у міру віддалення від кутових ділянок контуру. Встановити ступінь впливу вказаних явищ на зусилля витяжки коробчастих деталей теоретичним шляхом на сьогодні не є можливим. Це завдання виконане лише приблизно у результаті застосування ряду спрощень.

Під час витяжки квадратних деталей із відносно великим радіусом округлення кутових ділянок напружений стан осередку деформації в кутах подібний до напруженого стану, що виникає в разі витяжки циліндричних деталей. Звідси середнє значення розтягальних напружень приблизно дорівнює напруженням, що виникають у процесі витяжки циліндричних деталей еквівалентного діаметра, визначуваного з умови рівності периметрів квадратної і циліндричної деталей: $d_{екв} = 4/\pi\left(B - 0{,}43r_y\right)$. З огляду на це зусилля витяжки квадратної деталі обчислюють шляхом множення площі поперечного перерізу умовної циліндричної деталі діаметром $d_{екв}$ на найбільше розтягальне напруження:

$$P = \pi d_{екв} s\sigma_{\rho\ max} = 4(B - 0{,}43r_y)s\sigma_{\rho\ max}, \qquad (3.67)$$

де $\sigma_{\rho\ max}$ встановлюють за формулою (3.64) за умови, що $r_y = d_{екв}/2$.

Слід зазначити, що в праці [5] запропоновані розрахункові формули для визначення зусилля витяжки деталей коробчастої форми, наприклад:

$$P_в = Ls\sigma_в\alpha,$$

де α = 0,3 ÷ 1,1 – коефіцієнт, залежний від форми та розмірів деталі, відносної товщини і матеріалу заготовки, ступеня деформації (чим вищий ступінь деформації, тим більше α); L – довжина контуру розгортки деталі.

У ході витяжки деталей коробчастої форми тангенціальні стискаючі напруження σ_θ змінні по контуру фланця, у зв'язку з чим зусилля притиску, що забезпечує відсутність складок, повинне бути змінним.

Зусилля притиску можна обчислити як суму двох доданків:

$$Q = F_{кут}q_{кут} + F_{пр}q_{пр},$$

де $F_{кут}$ і $F_{пр}$ – площі кутових і прямолінійних ділянок фланця відповідно (у почат-

ковий момент витяжки); $q_{кут}$ і $q_{пр}$ – питомі зусилля притиску на кутових і прямолінійних ділянках фланця відповідно.

Питомі зусилля $q_{кут}$ і $q_{пр}$ залежно від указаних факторів змінюються в межах: $q_{кут}$ = 0,24÷2,32 МПа; $q_{пр}$ = 0,24÷3,45 МПа.

У разі витяжки високих деталей коробчастої форми сумарний коефіцієнт витяжки можна розглядати як відношення довжини контуру заготовки L_0 до довжини розгортки контуру деталі L: $K_в = L_0/L$ або як квадратний корінь із відношення площі заготовки до площі дна деталі коробчастої форми $F_{дн}$: $K_в = \sqrt{F_0/F_{дн}}$.

Перетяжні ребра й зазори. У процесі витяжки деталей коробчастої форми опір втягуванню заготовки в матрицю неоднаковий на різних ділянках її контуру: на прямолінійних ділянках опір менший, ніж на криволінійних, причому на криволінійних ділянках він зростає зі зменшенням кутового радіуса кривизни матриці. У результаті цього витягнуті деталі (або напівфабрикати) мають нерівномірну висоту: на кутових ділянках висота більша, а на прямолінійних — менша. Крім того, нерівномірні по контуру матриці умови втягування заготовки викликають нерівномірний напружений стан стінок деталі, що може призвести до її руйнування.

Для створення хоч би приблизно однакових умов втягування заготовки в матрицю по всьому контуру на прямолінійних її ділянках штучно збільшують опір втягуванню заготовки за допомогою спеціальних перетяжних ребер, які служать своєрідним гальмом під час переміщення заготовки щодо матриці. Форма, розміри й способи закріплення перетяжних ребер розглянуті в праці [3], кількість рядів ребер встановлюють експериментально. Перетяжні ребра застосовують тільки в міру необхідності, оскільки їх установлення ускладнює штамп і збільшує його вартість.

Оскільки в ході витяжки в кутових ділянках контуру деталі відбувається закономірне стовщення фланця, це явище враховується під час визначення зазору між пуансоном і матрицею штампа для витяжки: у кутових ділянках зазор повинен бути більшим, ніж на прямолінійних. Згідно з практичними даними на прямолінійних ділянках контуру зазор між пуансоном і матрицею z = 1,2s, на криволінійних — z = (1,3 ÷ 1,4)s. Напрям зазору не береться до уваги на всіх операціях витяжки, окрім останньої. За витяжки деталей із необхідними зовнішніми розмірами зазор встановлюють, зменшуючи розміри пуансона, у разі витяжки деталей із необхідними внутрішніми розмірами — збільшуючи розміри матриці.

3.2.7. Витяжка циліндричних деталей зі стоншенням стінки

Витяжка зі стоншенням стінки застосовується для одержання високих порожнистих деталей або напівфабрикатів, товщина дна яких більша товщини стінки. Витяжка в цьому випадку здійснюється протяганням заготовки у вигляді ковпачка (отриманого витяжкою або яким-небудь іншим способом) через матрицю, при цьому зазор z між пуансоном і матрицею повинен бути менший товщини сті-

нки заготовки: $z = (D_м - D_n)/2 < s$. Даним способом витяжки одержують деталі з полем допуску $h9 - h12$. Допуск на товщину стінки складає 15 – 25 % номінальної товщини стінки, допуск на висоту напівфабрикату — до 15 % його висоти.

У процесі витяжки зі стоншенням відбувається зменшення початкової товщини стінки заготовки за відносно невеликого зменшення її діаметра. За одну операцію можна одержати напівфабрикат значно більшої висоти, ніж у разі витяжки без стоншення. Під час витяжки даного типу осередок пластичної деформації знаходиться в зоні зменшення товщини заготовки. Він малий порівняно з іншими розмірами напівфабрикату й обмежений з обох боків пружно-деформованими ділянками (рис. 3.43, *а*). Витяжка зі стоншенням відбувається в умовах об'ємного деформованого стану. Проте, враховуючи, що відносне зменшення діаметра мале порівняно з деформаціями в осьовому (збільшення довжини) і радіальному (зменшення товщини стінки) напрямах, без великої похибки можна вважати, що витяжка зі стоншенням відбувається в умовах плоского вісесиметричного деформованого стану.

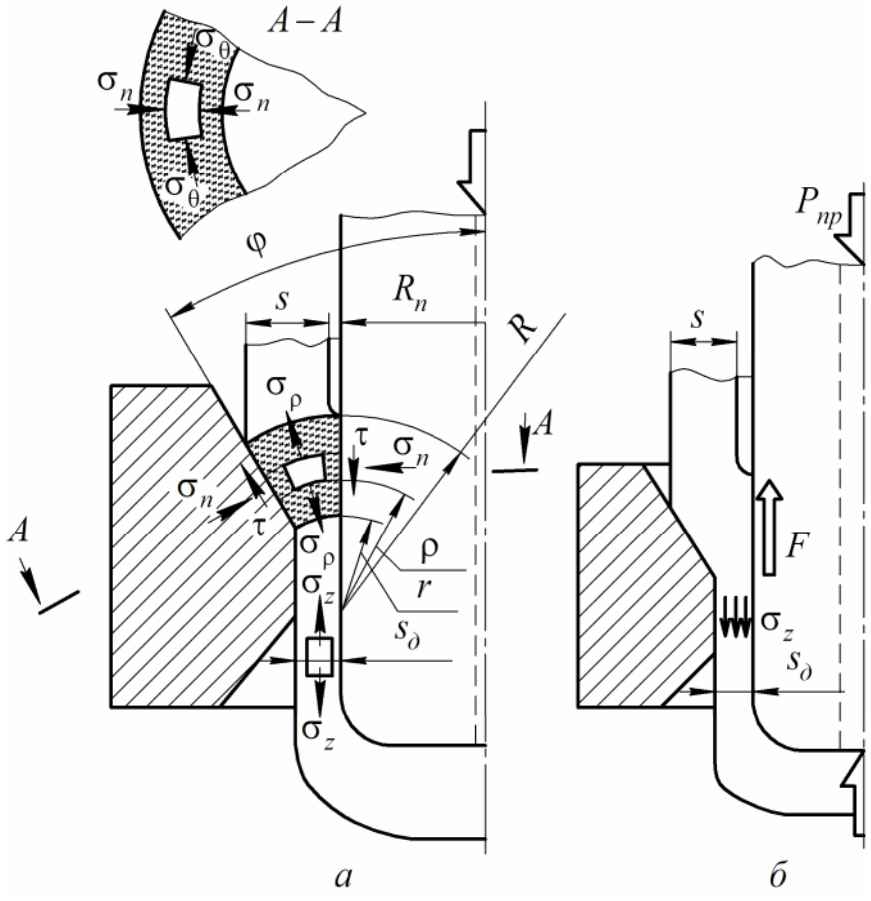


Рис. 3.43. Осередок пластичної деформації, його напружений стан (*а*) і схема дії зовнішніх сил (*б*) у випадку витяжки зі стоншенням

Під час деформації елементарного об'єму, виділеного в осередку деформації, виникають нормальні розтягальні σ_ρ, нормальні стискаючі σ_n, тангенціальні

стискаючі σ_θ і дотичні τ напруження (рис. 3.43, *а*). Таким чином, у разі витяжки зі стоншенням напружений стан є об'ємний.

У процесі витяжки заготовка ковзає відносно пуансона (вгору), унаслідок чого виникають контактні сили тертя, що діють у напрямі руху пуансона. Одночасно заготовка ковзає відносно матриці в напрямку руху пуансона, при цьому виникають контактні сили тертя, направлені в бік, протилежний напряму руху пуансона.

Сили тертя на поверхні контакту заготовки й пуансона розвантажують небезпечний переріз, зменшуючи розтягальні напруження σ_ρ. Сили тертя на поверхні контакту заготовки й матриці сприяють збільшенню розтягальних напружень σ_ρ. Особливість напруженого стану в разі витяжки зі стоншенням полягає в тому, що дотичні напруження τ на поверхні контакту заготовки, матриці та пуансона спрямовані в різні боки і стискаючі напруження σ_n за абсолютним значенням великі порівняно з напруженнями τ, σ_ρ, σ_θ. Ця особливість напруженого стану осередку пластичної деформації — основна причина того, що допустимий ступінь деформації у випадку витяжки зі стоншенням вищий, ніж під час витяжки без стоншення.

Формула для визначення найбільшого розтягального напруження в осьовому напрямі в разі витяжки зі стоншенням стінки, одержана методом балансу робіт у праці [7]:

$$\sigma_z = \sigma'_s\left[1 + (\mu/\varphi)\ln(s/s_\partial) + \varphi/2\right], \tag{3.68}$$

де φ – кут нахилу твірної матриці; μ – коефіцієнт контактного тертя по матриці і по пуансону.

Аналіз формули (3.68) показує, що збільшення коефіцієнта тертя μ приводить до зменшення σ_z. Але це не означає, що коефіцієнт тертя можна збільшувати безмежно, оскільки з його збільшенням посилюється виділення теплоти на контактній поверхні, що може призвести до налипання металу, а отже, до появи задирок. Дослідження даної формули також дозволяє знайти оптимальне значення кута $\varphi_{опт}$, при якому значення σ_ρ найменше:

$$\varphi_{опт} = \sqrt{2\mu\ln(s/s_\partial)}\,180^\circ/\pi. \tag{3.69}$$

За відношення $s/s_\partial = 2$ і $\mu = 0{,}05$ $\varphi_{опт} = 15°$.

Оптимальний кут нахилу матриці $\varphi_{опт}$ збільшується зі збільшенням коефіцієнта тертя й підвищенням ступеня деформації.

Розміри заготовки. У випадку витяжки зі стоншенням товщину заготовки беруть такою, що дорівнює товщині дна напівфабрикату, який витягається ($s = s_{дн}$). Діаметр заготовки D_0 визначають з умови рівності об'ємів заготовки й деталі з урахуванням об'єму металу на припуск під обрізання. Ця умова може бути подана у вигляді $0{,}785sD_0^2 = \xi V_\partial$, звідки

$$D_0 = 1{,}13\sqrt{\xi V_\partial / s}, \tag{3.70}$$

де ξ – коефіцієнт, який враховує об'єм металу, що йде на обрізання нерівного краю напівфабрикату; $V_д$ – об'єм деталі.

Значення ξ залежить від відносної висоти $h/d_{зр}$ ($d_{зр}$ – зовнішній діаметр деталі) напівфабрикату, що витягається, і змінюється від 1,08 до 1,15, чим більша відносна висота, тим більше ξ. У тому випадку, коли невідомий об'єм деталі, діаметр заготовки може бути приблизно визначений за її розмірами (висотою h, зовнішнім діаметром $d_{зр}$, товщиною стінки $s_д$):

$$D_0 \cong \sqrt{d_{зр}^2 + \frac{4(d_{зр} - s_д)}{s}(h + \Delta h - s)s_д}\,. \qquad (3.71)$$

У ході одержання формули (3.71) не врахований радіус кутових ділянок дна напівфабрикату, тому припуск на обрізання нерівного краю Δh беруть мінімальним.

Деформуюче зусилля. У разі витяжки зі стоншенням стінки деформуюче зусилля складається із зусилля, що викликає в деформованих стінках напівфабрикату розтягальні напруження σ_z (тягнуче зусилля, прикладене до його донної частини), і рівнодіючої сил контактного тертя по пуансону, направленої в бік, протилежний руху пуансона (рис. 3.43, *б*). З урахуванням цього сумарне зусилля витяжки зі стоншенням дорівнюватиме [7]:

$$P_в = \pi d s_д \sigma_s' \left[1 + (\mu/\varphi)\ln(R/r) + \varphi/2 + (\mu/\sin\varphi) ln(R/r)\right]. \qquad (3.72)$$

Якщо застосувати степеневу апроксимацію кривої зміцнення, то при середньому за осередком деформації ступені деформації $\psi_{сер} = 0{,}5(s - s_д)/s$ напруження текучості σ_s' у формулі (3.72) буде дорівнювати

$$\sigma_s' = \sigma_в / \left(1 - \psi_p\right)\left[2s\psi_p(s - s_д)\right]^{\psi_p/(1-\psi_p)}.$$

Ступінь деформації у випадку витяжки зі стоншенням характеризується відносним зменшенням площі поперечного перерізу деталі (напівфабрикату), що витягається. Уведемо такі позначення: F_{N-1} і F_N – відповідно площі поперечного перерізу напівфабрикату до і після витяжки; d_{N-1} і d_N – номінальні зовнішні діаметри напівфабрикату до і після витяжки; $d_в$ – номінальний внутрішній діаметр деталі. Тоді ступінь деформації

$$\psi = (F_{N-1} - F_N)/F_{N-1} = \left(d_{N-1}^2 - d_в^2\right). \qquad (3.73)$$

Знаючи ψ, d_{N-1} і $d_в$, із формули (3.73) можна визначити зовнішній діаметр напівфабрикату, одержуваного витяжкою зі стоншенням при взятому ступені деформації:

$$d_N = \sqrt{d_{N-1}^2 - \psi\left(d_{N-1}^2 - d_в^2\right)}. \qquad (3.74)$$

Зміна діаметра напівфабрикату під час витяжки зі стоншенням мала порівняно зі зміною товщини стінки, тому беруть $d_{N-1} \cong d_N$. Враховуючи це, можна взяти ступінь деформації такий, що дорівнює $\psi = (s_{N-1} - s_N)/s_{N-1} = 1 - s_N/s_{N-1}$. Відношення s_{N-1}/s_N називають коефіцієнтом стоншення і позначають його K_c.

Перша операція витяжки в більшості випадків виконується без стоншення. Серединний діаметр згортки $d_{сер}$ розраховується як і в разі витяжки без стоншення стінки: $d_{сер} = D_0 / K_{в1}$. Бажано, щоб внутрішній діаметр на першій операції дорівнював внутрішньому діаметру деталі, це забезпечить мінімально різну товщину стінки, мінімальний перекіс кромки і кривизни подовжньої осі напівфабрикату. Зазор на входження пуансона в заготовку беруть таким, що дорівнює 0,005 діаметра пуансона.

Подальші операції витяжки здійснюють зі стоншенням за незначного зменшення зовнішнього діаметра напівфабрикату. Залежно від матеріалу заготовки і його стану (наклепаний, відпалений) за нормативними даними вибирають допустимий ступінь деформації або коефіцієнти стоншення $K_{c\,1}$, $K_{c\,2}$, …, після чого визначають діаметри й товщину стінок напівфабрикатів за операціями витяжки. Загальну кількість операцій N, необхідну для одержання деталі з потрібними розмірами, можна обчислити, застосовуючи залежність [2]

$$N = \left(\ln F_N - \ln F_0\right) / \ln\left(1 - \psi_{сер}\right), \tag{3.75}$$

де F_0 і F_N – відповідно площі поперечних перерізів заготовки (напівфабрикату) і деталі; $\psi_{сер} = \psi_{д}$ – допустимий ступінь деформації.

Середню висоту напівфабрикатів визначають з умови рівності об'ємів плоскої заготовки діаметром D_0 і відповідного напівфабрикату:

$$h_N = \left[\frac{D_0^2 - d_з^2}{4\left(d_з - s_N\right)s_N} + 1\right]s, \tag{3.76}$$

де $d_з$ і s_N – відповідно зовнішній діаметр і товщина стінки напівфабрикату.

Формула (3.76) одержана для напівфабрикату — неплавного сполучення дна і стінок у кутових ділянках, тому розрахункова висота напівфабрикату трохи перевищує середню фактичну.

У процесі витяжки зі стоншенням відбувається інтенсивне зміцнення матеріалу заготовки (наклеп), при цьому істотно підвищується її твердість. Для відновлення пластичних властивостей заготовки в міру необхідності після витяжки проводять рекристалізаційний відпал із подальшими травленням, промивкою і сушінням.

3.3. Операції формування

До формування належать такі операції: рельєфне формування, відбортовка, завивка, роздача, обтиск і правка. Їх особливість — зміна форми раніше штампованої заготовки внаслідок місцевих деформацій. У більшості випадків операції формування супроводжуються зміною товщини матеріалу.

3.3.1. Рельєфне формування

Рельєфне формування — це одержання місцевих заглиблень і опуклостей за рахунок місцевого розтягування і стоншення матеріалу. Його застосовують для виготовлення фіксуючих упорів, заглиблень, ребер жорсткості в деталях (рис. 3.44), а також деталей складної несиметричної форми.

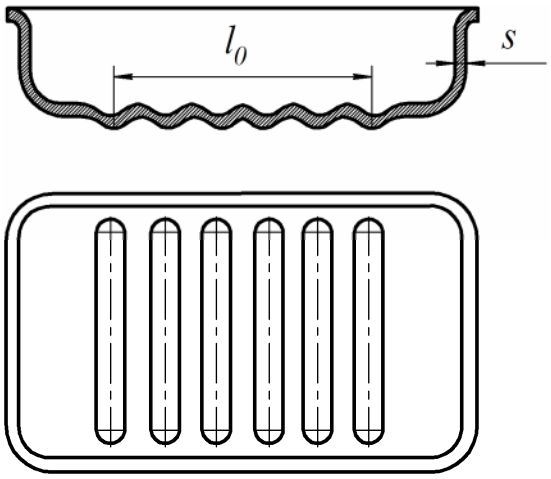


Рис. 3.44. Деталь, одержана рельєфним формуванням

Можливість формування без руйнування можна приблизно визначити за величиною відносного подовження матеріалу в зоні найбільшої деформації (рис. 3.44): $\frac{l_1 - l_0}{l_0} 100 \le 0{,}75\delta$, де l_0, l_1 – довжина матеріалу до і після формування; δ – відносне подовження матеріалу, %.

Зусилля рельєфного формування $P = Fqk$, де F – площа штампованого рельєфу, м^2; q – коефіцієнт, що дорівнює: для сталей — приблизно 400 МН/м^2; для алюмінію — приблизно 200 МН/м^2; для латуні — приблизно 250 МН/м^2; k – коефіцієнт, який дорівнює $k \cong 0{,}8$ при товщині листа до 1 мм, $k \cong 1{,}0 - 1{,}5$ — при товщині 1,0 – 1,5 мм.

3.3.2. Відбортовка

Відбортовку поділяють на два основні види: відбортовку отворів і зовнішнього контуру.

Відбортовка отворів — це одержання бортів після попереднього пробивання отворів (сферичним чи циліндричним пуансоном) або свердлення отворів із наступною зачисткою задирок (рис. 3.45.).

Відбортовка зовнішнього контуру — це виготовлення невисоких бортів по зовнішньому криволінійному краю заготовки. Ступінь деформації в процесі відбортовки визначається коефіцієнтом відбортовки $K_в = d/D = 1 - \psi_ш$, де $\psi_ш$ – рівномірне звуження зразка під час механічних випробувань на розтягнення; D – діаметр борту по середній лінії.

У табл. 3.1 як приклад наведені мінімально допустимі коефіцієнти $K_в$ для низьковуглецевої сталі.

Таблиця 3.1.

Мінімально допустимі коефіцієнти $K_в$ для низьковуглецевої сталі

Спосіб одержання отвору	Коефіцієнт $K_в$ залежно від відношення d/s						
	100	50	20	10	5	2	1
Свердлення із зачисткою задирок	0,80	0,70	0,50	0,42	0,35	0,30	0,25
Пробивання в штампі	0,85	0,75	0,6	0,52	0,48	0,47	–

Величина коефіцієнта відбортовки визначається: характером обробки й станом кромок отвору (свердлення або пробивання, наявність задирок); відносною товщиною заготовки s/D; різновидом матеріалу і його механічними властивостями; формою робочої частини пуансона. Значення коефіцієнта відбортовки залежно від перерахованих факторів наведені в довідниках, наприклад у праці [5]. Отвори під відбортовку слід пробивати з боку, протилежного напрямку відбортовки.

Під час відбортовки отворів відбувається невелике зменшення товщини металу біля краю борту за рахунок розтягування металу $s_1 = s\sqrt{K_в}$, де s_1 – товщина на краю борту.

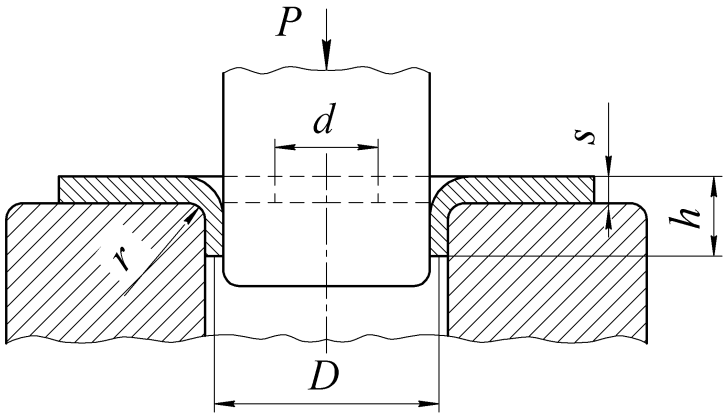


Рис. 3.45. Схема відбортовки отвору циліндричним пуансоном

Діаметр отвору під відбортовку циліндричним пуансоном можна визначити в такий спосіб:

$$d = D + 2{,}4s + 0{,}9r_м - 2h. \qquad (3.77)$$

Застосування формули (3.77) можливе, якщо необхідна висота горловини не перевищує гранично допустимої ($h < h_{max}$):

$$h_{max} = \frac{D(1 - 1/K_в) + 2{,}4s + 0{,}9r_м}{2}. \qquad (3.78)$$

У тих випадках, коли потрібна висота горловини більша, ніж гранично можлива ($h > h_{max}$), горловину одержують витяжкою з наступним видаленням донної

частини або витяжкою з наступним пробиванням отвору в донній частині і його відбортовкою (рис. 3.46).

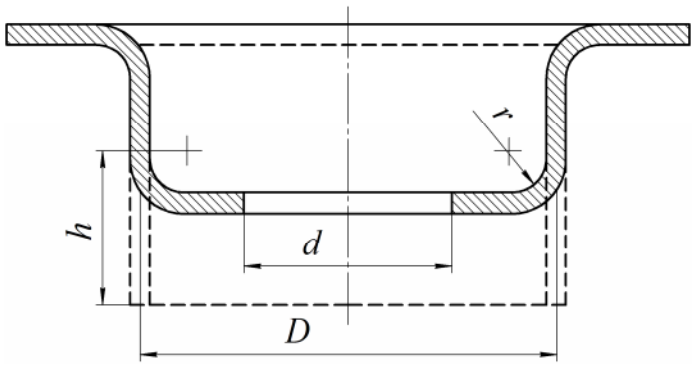


Рис. 3.46.Схема одержання горловини витяжкою і відбортовкою

Якщо треба одержати високу горловину, її виготовляють у штампі з одностороннім зазором між пуансоном і матрицею, меншим первинної товщини заготовки ($z < s$). При цьому збільшення висоти горловини відбувається внаслідок штучного зменшення товщини борту, а отже, збільшення її висоти. Такий спосіб формозміни називається відбортовкою зі стоншенням борту. Деталі, одержані даним способом, мають високу точність діаметральних розмірів горловини (8 – 10-й квалітет) і високу чистоту поверхні (R_a = 3,2 ÷ 1,6). Крім того, у результаті холодної пластичної деформації твердість горловини збільшується на 30 – 40 % порівняно з твердістю вихідної заготовки. Відбортовку зі стоншенням виконують конусним пуансоном, який має необхідну циліндричну частину. Спочатку здійснюється відбортовка без стоншення, а потім, коли до матриці входить циліндрична частина пуансона, починається відбортовка зі стоншенням.

Висота борту під час відбортовки зі стоншенням (у міліметрах) може бути визначена за такою формулою [5]:

$$H_{вс} = H + 0{,}5\left(\frac{s}{z} - 1\right)(H - h_x), \tag{3.79}$$

де H – висота борту без стоншення; z – зазор між циліндричною частиною пуансона й матриці; $h_x = \dfrac{z - s_1}{s - s_1} H$ – частина висоти борту, що не піддається стоншенню; s_1 – товщина борту після стоншення.

Відбортовка із заданим стоншенням матеріалу є більш доцільна з погляду «стійкості» процесу пластичної деформації металу й відсутності розривів і тріщин, оскільки в процесі стоншення виникає більш сприятливий напружений стан із появою значних стискаючих напружень. Це дозволяє вести відбортовку при пом'якшених «безпечних» коефіцієнтах відбортовки, а висоту борту одержати за рахунок максимально допустимого стоншення матеріалу.

Залежність граничної величини стоншення від узятого коефіцієнта відбор-

товки поки не встановлена, але проведені дослідження показують можливість стоншення борту за одну операцію до величини $s_1/s = 2{,}4 \div 2{,}5$.

Зусилля відбортовки циліндричним пуансоном розраховується за формулою

$$P \approx 1{,}1\pi s\sigma_s(D-d), \qquad (3.80)$$

де σ_s – межа текучості матеріалу.

У разі відбортовки некруглих отворів можна використовувати граничні коефіцієнти відбортовки, установлені для круглих отворів.

3.3.3. Загортання бортика

Загортання бортика застосовують під час виконання кільцевого закруглення по краю порожнистих деталей, одержаних витяжкою, для збільшення їх жорсткості, у випадку одержання елементів з'єднання і т.д. Загортання виконують на пресах, давильних станах або спеціальних машинах. У початковий момент деформації (рис. 3.47) відбувається згинання краю заготовки, а потім — остаточне загортання кромки. Якість загортання бортика визначається ретельністю обробки робочих поверхонь пуансона.

Габаритні розміри та форму початкової листової заготовки під загортання розраховують за середньою лінією перетину листа, виходячи з припущення, що відбувається тільки згинання. Максимальна товщина матеріалу під час загортання бортика в штампах для сталі складає 1,6 мм, для алюмінію — 2 мм.

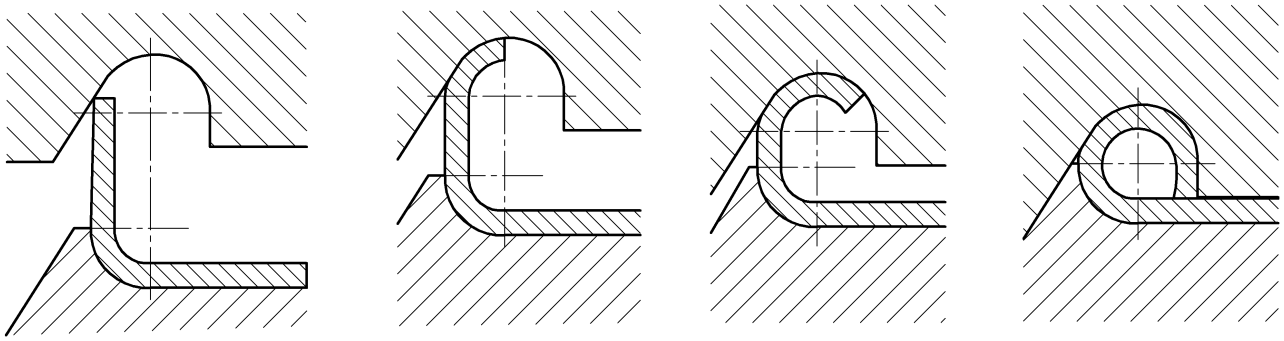


Рис. 3.47. Схема загортання бортика

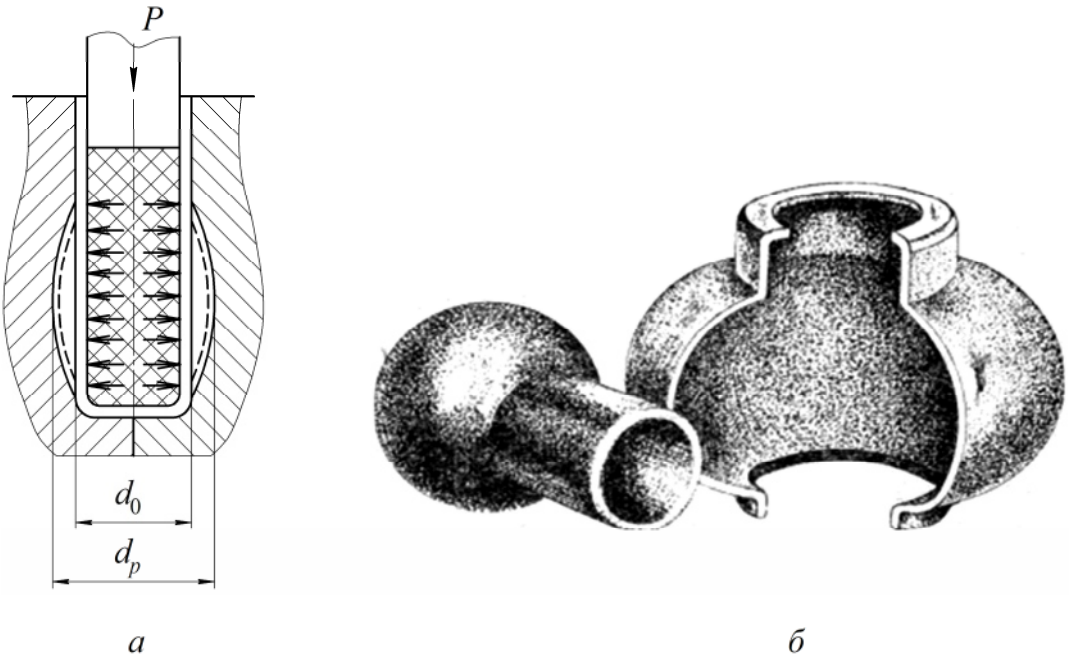
3.3.4. Роздача (розтягнення)

Роздача — це операція, яка застосовується для збільшення поперечних розмірів порожнистих деталей до потрібної величини й надання необхідної форми за рахунок розтягування їх стінок зсередини в радіальному напрямі.

Роздача матеріалу заготовки відбувається під дією внутрішнього тиску (рис. 3.48, *а*), який створюється наповнювачем під час руху пуансона. Найчастіше наповнювачем є гума або рідина (масло, вода). Роздачу здійснюють, як правило, у штампах, матриці яких мають вертикальне рознімання, необхідне для виймання деталі після штампування.

Ступінь деформації в процесі роздачі визначається коефіцієнтом розтягнен-

ня $K_p = d_p/d_0$, де d_p – найбільший діаметр після роздачі; d_0 – початковий діаметр циліндричної заготовки.



а *б*

Рис. 3.48. Схема роздачі (*а*) і деталі, одержані роздачею (*б*)

Коефіцієнт розтягнення залежить від пластичності матеріалу, його відносної товщини s/d та інших факторів. Наприклад, при s/d = 0,35 ÷ 0,45 для сталі 10 без відпалу K_p = 1,1; для алюмінію і його сплавів K_p = 1,2. Товщина стінки після роздачі в зоні деформації становить $s_1 d_0/d_p$.

3.3.5. Обтиск

Обтиск здійснюють за допомогою лійкоподібного конічного пуансона (рис. 3.49, *а*), під час руху якого відбувається зменшення поперечного перерізу і незначне збільшення довжини (висоти) частини порожнистої заготовки або труби. Наприклад, обтиск порожнистих деталей застосовують для виготовлення горловин деталей на зразок патронних гільз.

Формозміна в процесі обтиску визначається коефіцієнтом обтиску $K_o = d/D$. На рис. 3.49, *б* зображені різноманітні кінцеві ділянки трубних заготовок, одержані обтиском і роздачею, а на рис. 3.49, *в* — принципова схема формування конічної кінцевої ділянки трубної заготовки.

Для запобігання утворенню складок під час обтиску за рахунок втрати стійкості й осідання циліндричної частини заготовки рекомендується брати K_o = 0,8 ÷ 0,9 для сталевих заготовок і K_o = 0,8 ÷ 0,85 — для латунних і алюмінієвих сплавів.

При обтиску відбувається деяке стовщення стінки краю виробу. Величина стовщення (рис. 3.49, *а*) $s_1 = s\sqrt{D/d} = s\sqrt{1/K_o}$.

Відзначимо, що при товщині матеріалу s < 1,5 мм діаметри d і D беруть за зовнішніми розмірами заготовки, при більшій товщині — за середньою товщиною матеріалу.



Рис. 3.49. Схема обтиску (*а*), різноманітні кінцеві ділянки трубних заготовок, одержані обтиском і роздачею (*б*), принципова схема обтиску кінцевої ділянки трубної заготовки (*в*): *1*– елементи для нагрівання; *2* – матриця; *3* – холодильник; *4* – заготовка

За достатнього змащення оптимальний кут пуансона α = 1 ÷ 16°, у випадку штампування без достатнього змащення α = 20 ÷ 25°.

3.3.6. Правка

Правку застосовують для виправлення нерівностей поверхні й одержання більш точних розмірів заготовок і деталей плоских і складних форм, виготовлених різанням, вирубкою, витяжкою, згинанням і т.д. Плоскі деталі з тонкого матеріалу (s < 1 мм), правлять у плоских штампах, деталі з більш товстих матеріалів — у штампах із плоскими вафельними плитами; деталі просторових форм — у спеціальних штампах для зменшення радіусів округлення і випрямлення дна і бічних стінок. Зусилля правки $P = pF$, де F – площа поверхні, що деформується; p – питоме зусилля правки.

Для гладких плит p = 80 ÷ 100 МН/м^2; для вафельних штампів p = 100 ÷ 150 МН/м^2; для порожнистих деталей p = 150 ÷ 200 МН/м^2.

3.4. Спеціальні методи обробки листових матеріалів

З розвитком авіа-, автомобіле-, трактоpo-, судно- й енергомашинобудування виникли нові проблеми, які не можуть бути вирішені за допомогою відомих видів обробки тиском. До них належать: одержання деталей, що не потребують подальшої обробки різанням; виготовлення великогабаритних деталей (діаметром понад 2 000 мм) і деталей зі спеціальних сплавів. Для вирішення вказаних проблем розроблені спеціальні види обробки металів тиском: штампування вибухом, імпульсом електромагнітного поля та ін.

3.4.1. Штампування вибухом (імпульсне)

Розвиток атомної й космічної техніки, хімічного й енергетичного машинобудування вимагає виготовлення з листового матеріалу середньо - і великогабаритних деталей підвищеної точності з високоміцних сплавів. Для виготовлення таких деталей необхідні значні зусилля, які не можуть бути одержані на жодному з існуючих пресів. Крім того, їх економічно недоцільно виготовляти поширеними методами.

Застосовують нові методи деформації металів із використанням імпульсних навантажень, створюваних дією вибуху, вибухових речовин (ВР), газових сумішей, високовольтного електричного розряду, потужного імпульсу електромагнітного поля й ін.

Так, при штампуванні вибухом (рис. 3.50, *а*) енергія заряду вибухової речовини *1*, що детонує, передається заготовці *4* через проміжне середовище *2* (звичайно воду). Заготовку за допомогою притискного кільця *3* кріплять на матриці *6*, з-під якої вакуумним насосом за допомогою трубки *5* відкачується повітря. Ударні хвилі, що утворюються під час вибуху вибухової речовини , деформують заготовку, яка набирає форми матриці.

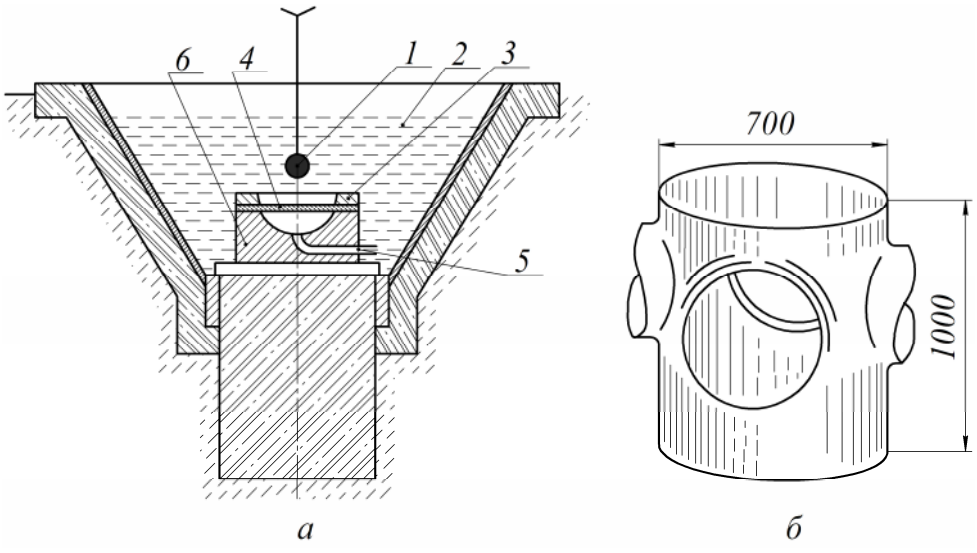


Рис. 3.50. Установка для штампування вибухом (*а*) і деталь (*б*), одержана цим способом

Кількість і форма заряду ВР (тринітротолуол, тол), відстань заряду від заготовки залежать від форми, розмірів і товщини листової заготовки, що деформується. Окрім ВР як енергоносії використовують газоподібні суміші з недорогих компонентів, наприклад метану або парів бензину в суміші з повітрям. Продуктивність штампування в основному залежить від часу на підготовчі роботи (установлення матриці, кріплення заготовки, відкачування повітря і т. д.), тривалість же самого процесу деформації складає всього кілька мікросекунд.

Для штампування вибухом створюються й експлуатуються спеціальні установки трьох видів залежно від габаритних розмірів деталей, які штампуються: стаціонарні, басейнового типу і нестаціонарні — наземні.

Матриці для штампування вибухом виготовляють із цинкових сплавів, литої сталі, алюмінію та ін. При діаметрі деталей, більшому 2 000 мм, як матеріал для виготовлення матриць використовують бетон, залитий у металевий контейнер.

Для штампування невеликих за габаритами деталей інколи застосовують штампування вибухом без використання басейну, у спеціальних бронекамерах.

Вибухом штампують великогабаритні (до 8 м) деталі типу півсфер днищ із листа завтовшки понад 2 мм, циліндри з патрубками (рис. 3.50, *б*). Достоїнство штампування вибухом — можливість одержання точних деталей із високоміцних сплавів з мінімальною пружністю (оскільки в момент вибуху розвивається високий тиск, що досягає 13 000 МН/м^2) за малих витрат на виготовлення інструменту (матриць), однак застосування штампування вибухом потребує великих початкових капітальних витрат. Розглянутим видом штампування можна виконувати різання, пробивання отворів у трубах і плоских деталях, калібрування, чеканення й інші операції. Штампування вибухом особливо широко застосовується в дрібносерійному та індивідуальному виробництві.

3.4.2. Електрогідравлічне штампування

Електрогідравлічне штампування полягає в тому, що заготовка деформується ударною хвилею, яка виникає при потужному електричному розряді у воді через зазор між електродами або тонкий дріт (рис. 3.51).

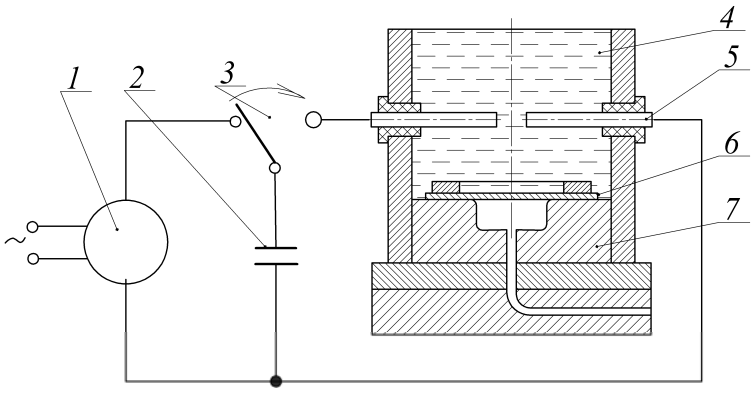


Рис. 3.51. Схема установки для електрогідравлічного штампування

Заготовку *6* закріплюють на матриці *7*, встановленій у спеціальному резервуарі з водою *4*. Після відкачування повітря з-під заготовки через електроди *5* пропускається імпульс електричного струму. Енергія, необхідна для розряду, нагромаджується у високовольтній батареї конденсаторів *2*. Конденсатори заряджаються від випрямляча *1*, а комутуючий пристрій *3* у момент штампування перемикає накопичену енергію на електроди. Тривалість розряду обчислюється десятитисячними частками секунди, а потужність електрогідравлічного розряду на сучасних установках досягає $70 \cdot 10^6$ Вт і більше.

Інструментом для штампування служать матриці, що виготовляються з епоксидних композицій (одиничне виробництво), низьковуглецевих та інструментальних термічно оброблених сталей (серійне виробництво).

Розглянутий вид штампування застосовують для роздачі, згинання, витяжки, вирубки, пробивання й інших операцій. Електрогідравлічним штампуванням одержують точні середніх габаритів деталі нескладних форм (наприклад, діаметром до 1 500 мм) з листа завтовшки до 3 мм з алюмінію, нержавіючої сталі, міді, титану, ніобію та інших матеріалів. Можливість автоматизації дозволяє застосовувати це штампування в одиничному й масовому виробництві.

3.4.3. Штампування імпульсним магнітним полем

Деформація металу імпульсним магнітним полем ґрунтується на перетворенні електричної енергії на енергію імпульсного магнітного поля, що деформує заготовку.

Установка для штампування складається із зарядного пристрою *1* (рис. 3.52), який є високовольтним випрямлячем, вмикача *2*, конденсаторної батареї *3*, у якій нагромаджується необхідна енергія, комутуючого пристрою *4* та індуктора *5*. Під час проходження імпульсу електричного струму через індуктор виникає потужне магнітне поле, яке наводить у заготовці *6* струм, що створює навкруги неї своє магнітне поле.

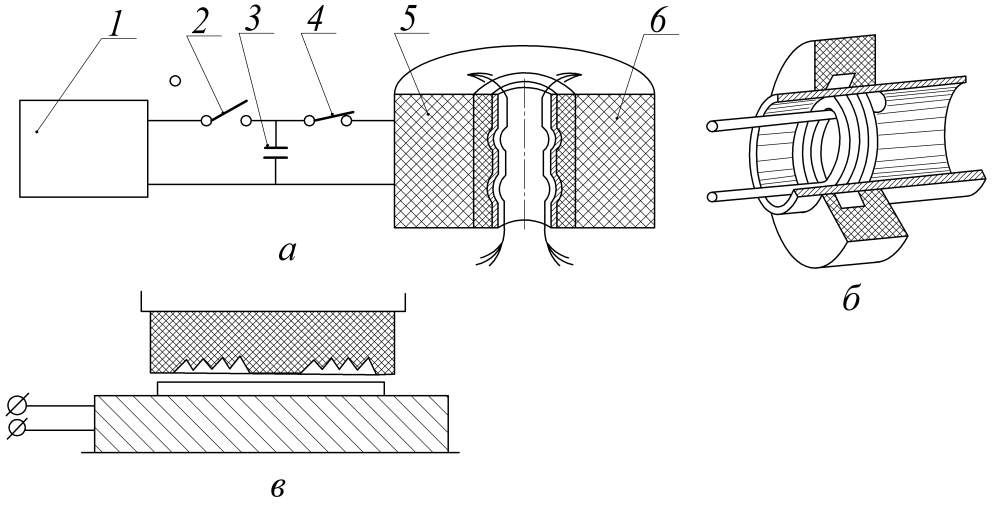


Рис. 3.52. Способи електромагнітного штампування

У результаті взаємодії двох полів заготовка відштовхується від індуктора або притягується до нього з великою силою. Під дією цих сил заготовка переміщається зі швидкістю до 400 м/с і, ударяючись об матрицю, деформується. У тому разі, якщо заготовка під час штампування притягується, індуктор вмонтовують у матриці (рис. 3.52, *а*), у випадку штампування відштовхуванням індуктор виконують у вигляді соленоїда (рис. 3.52, *б*).

Розглянуті схеми застосовують для обтиску і роздачі трубчастих заготовок. Плоскі заготовки формують, вирубують і пробивають за допомогою плоского індуктора (рис. 3.52, *в*). Індуктор виготовляють із берилієвої бронзи, міді або високоміцної сталі — матеріалів, які мають високу електропровідність. Індуктори після травлення заливають спеціальним пластиком із наповнювачем, наприклад скловолокном. Магнітне штампування застосовують для деформації заготовок зі струмопровідних матеріалів. Матеріали, які погано проводять струм, і неметалеві матеріали штампують із використанням листової пластини (супутника) струмопровідного матеріалу, яку поміщають між індуктором і заготовкою.

Магнітне штампування застосовують в одиничному й масовому виробництві для виготовлення малогабаритних заготовок типу циліндрів, мембран, конусів практично з усіх матеріалів, що мають досить високу пластичність.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

Класифікація основних операцій холодного штампування

1. За якими основними ознаками класифікують процеси й операції холодного листового штампування?
2. На які дві групи поділяють процеси холодного листового штампування за характером деформацій?
3. Назвіть чотири основних види деформації під час холодного листового штампування.
4. Які існують основні роз'єднувальні операції холодного листового штампування? Дайте їх визначення.
5. Перерахуйте основні формозмінні операції холодного листового штампування. Дайте визначення.
6. У чому полягає суть комбінованого штампування і які його переваги ?
7. На які три основні групи за способом поєднання операцій можна поділити комбіноване штампування?
8. Поясніть, що таке суміщене, послідовне і суміщено-послідовне штампування.
9. Які операції холодного листового штампування належать до заготівельних і допоміжних?

1. Які існують стадії процесу відрізання металу? У якому випадку зазор між ножами вважається оптимальним?

2. Як змінюється значення оптимального зазору зі зміною товщини металу і його пластичних властивостей?

3. Де використовуються ножиці з похилими і паралельними ножами?

4. Як визначається зусилля різання на ножицях із паралельним розташуванням ножів?

5. У який спосіб розраховується зусилля різання на ножицях із похилим розташуванням ножів?

6. Розкрийте особливості відрізання на дискових ножицях. Яка умова захоплення листового матеріалу?

7. Яким чином впливає товщина металу на умову захоплення у випадку відрізання на дискових ножицях?

8. Назвіть схеми встановлення дискових ножів.

9. На яких ножицях можна вирізувати заготовки з криволінійним контуром?

10. Які існують способи відрізання сортового металу і труб? Яка сфера їх застосування?

11. Що є робочим інструментом штампа для відрізання труб?

12. Для чого використовують багатодискові ножиці в масовому та багатосерійному виробництві?

13. Що слід зробити для того, щоб унеможливити залишення вирубаної деталі в матриці та щільне охоплення пуансона відходом?

14. У чому полягають особливості вирубки й пробивання тонкого металу (s < 3 мм)?

15. Укажіть спосіб визначення виконавчих розмірів пуансонів і матриць у разі вирубки, пробивання.

16. Як обчислити деформуюче зусилля під час вирубки та пробивання в міру проникнення пуансона в заготовку?

17. Яким чином розраховується зусилля проштовхування та знімання в процесі вирубки й пробивання?

18. Назвіть способи зниження деформуючого зусилля в ході вирубки та пробивання.

19. Проаналізуйте особливості вирубки й пробивання неметалевих матеріалів.

20. Які існують типи штампів для вирубки та пробивання? Яка сфера їх застосування?

21. У чому полягає суть чистової вирубки й пробивання? За допомогою чого досягається чистота бічної поверхні вирубаної деталі?

22. Перелічіть способи чистової вирубки та пробивання? Назвіть сферу їх застосування.

23. Розкрийте суть зачистки в штампах. У виробництві чого вона застосовується?

24. Які існують види розкрою листового матеріалу? Від яких чинників залежить ефективність розкрою?

Згинання листового матеріалу, труб і профілів

1. Проаналізуйте технологічні схеми згинання відносно тонколистового металу.

2. Чим відрізняється напружений стан під час згинання вузької і широкої металевих смуг?

3. Як визначаються розміри заготовки у випадку згинання листового металу?

4. Що таке нейтральний шар у процесі згинання? Як встановити його розташування?

5. Яким чином змінюється розташування нейтрального шару в ході згинання?

6. Опишіть способи визначення стоншення листового металу в процесі згинання.

7. Чому дорівнює згинаючий момент під час згинання?

8. Від яких факторів залежить кут пружності у випадку згинання однокутних деталей?

9. Як корегувати розміри інструмента під час згинання з урахуванням пружних деформацій?

10. Дайте визначення мінімально допустимого радіуса згинання листового матеріалу.

11. Назвіть способи одержання профільних заготовок із листового матеріалу.

12. Перерахуйте способи згинання профільних заготовок.

Витяжка

1. Опишіть способи витяжки.

2. У яких випадках витяжка ведеться з притиском, а в яких — без притиску заготовки?

3. Де знаходиться небезпечний переріз деталі, одержуваної витяжкою? У зв'язку з чим він є небезпечний?

4. Як визначити товщину стінки на кромці деталі, одержаної витяжкою без стоншення стінки?

5. За рахунок чого можна зменшити радіальні розтягальні напруження під час витяжки?

6. У якому випадку фланець деталі, одержуваної витяжкою, вважається широким?

7. Що таке фестони? Які причини їх появи? Як одержати стакан із рівномір-

ною висотою по периметру?

8. У який спосіб обчислюється діаметр заготовки для вісесиметричної деталі, одержуваної витяжкою?

9. Як знайти форму та розміри заготовки для витяжки низької прямокутної коробчастої деталі?

10. Яким чином розраховується кількість переходів під час витяжки?

11. Які умови повинне задовольняти зусилля притиску? Як його визначити?

12. У чому полягає особливість витяжки деталей із широким фланцем?

13. З якою метою використовуються перетяжні ребра в процесі витяжки деталей складної форми?

14. Визначте особливості витяжки деталей із неметалів.

15. Яка специфіка витяжки зі стоншенням стінки? Що забезпечує високий ступінь деформації під час витяжки зі стоншенням?

16. Розкрийте сутність комбінованої витяжки деталей.

Операції формування

1. У яких випадках застосовують рельєфне формування? За рахунок чого відбувається формоутворення? Як визначити допустиму деформацію без руйнування?

2. Назвіть фактори, що визначають гранично можливу висоту горловини в процесі відбортовки.

3. Як впливає форма пуансона на зусилля відбортовки?

4. Яким чином одержати високу горловину методом відбортовки?

5. Опишіть процес відбортовки зі стоншенням стінки. Укажіть її переваги і недоліки порівняно з відбортовкою без стоншення.

6. У чому суть операції обтиску? Виходячи з яких умов можна визначити граничний коефіцієнт обтиску?

7. Як одержати високий ступінь деформації під час обтиску?

8. Назвіть явища, які обмежують можливість роздачі з високим ступенем деформації.

9. Які деталі можна одержувати поєднанням обтиску й роздачі?

Спеціальні методи листового штампування

1. У чому полягає сутність штампування вибухом? Яка сфера його застосування?

2. Розкрийте особливості електроімпульсного штампування, визначте сферу застосування методу.

3. Яка специфіка магнітно-імпульсного штампування? Де воно застосовується?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка [Текст]: учеб. для студентов вузов / М.Е. Зубцов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.

2. Ковка и штамповка [Текст]: справочник: в 4 т./ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. – Т. 1. 1986. – 568 с.; т. 4. – 1987. – 544 с.

3. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст] / Е.А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. — 278 с.

4. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки [Текст] / Ф.В. Гречников А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; под общ. ред. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.

5. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. — 520 с.

6. Сторожен, М.В., Теория обработки металлов давлением [Текст]: учеб. для вузов / М.В. Сторожен, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. –423 с.

7. Теория пластических деформаций металлов [Текст] / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

8. Яковлев, С.П. Штамповка анизотропных заготовок[Текст] / С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь. – М.: Машиностроение, 1986. –136 с.

ЗМІСТ

Вступ 3

1. Класифікація основних операцій
холодного штампування 4

2. Розділові операції листового штампування 9
2.1. Відрізання листового прокату, труб і профілів 9
2.1.1. Механізм деформації відрізання, оптимальний зазор 9
2.1.2. Відрізання на ножицях із зворотно-поступальним рухом ножів 12
2.1.3. Відрізання на ножицях з обертальним рухом ножів 16
2.1.4. Розрізання труб і профілів у штампах 22
2.2. Вирубка й пробивання 24
2.2.1. Вплив зазору на величину і знак пружних деформацій
під час вирубки й пробивання 24
2.2.2. Робочі (виконавчі) розміри пуансонів і матриць 27
2.2.3. Енергосилові характеристики процесів вирубки й пробивання 30
2.2.4. Способи зменшення деформуючого зусилля вирубки
та пробивання 32
2.2.5. Особливості вирубки й пробивання неметалевих матеріалів 34
2.2.6. Послідовне та суміщене (комбіноване) штампування 35
2.2.7. Матриці й пуансони в операціях вирубки та пробивання
отворів 36
2.3. Чистова вирубка й пробивання, зачистка в штампах 38
2.3.1. Чистова вирубка й пробивання 38
2.3.2. Зачистка 41
2.4. Розкрій листового прокату 44
2.4.1. Показники ефективності розкрою 44
2.4.2. Типи розкрою листового прокату, сфера їх застосування 45
2.4.3. Вибір виду розкрою листового прокату 48

3. Формоутворюючі операції листового штампування 49
3.1. Згинання 49
3.1.1. Стадії згинання, розподіл деформацій і напружень по товщині
заготовки 49
3.1.2. Розміри листових заготовок під час згинання 52
3.1.3. Енергосилові характеристики згинання 54

3.1.4. Пружні деформації під час згинання, способи їх зменшення 56
3.1.5. Мінімально допустимий радіус згинання 57
3.1.6. Згинання профілів і труб 58
3.2. Витяжка 61
3.2.1. Способи витяжки 61
3.2.2. Витяжка без притиску заготовки 66
3.2.3. Витяжка з притиском заготовки 69
3.2.4. Технологічні розрахунки для процесів витяжки 78
3.2.5. Витяжка вісесиметричних деталей, відмінних від циліндричних 89
3.2.6. Витяжка деталей коробчастої форми 98
3.2.7. Витяжка циліндричних деталей зі стоншенням стінки 103
3.3. Операції формування 107
3.3.1. Рельєфне формування 108
3.3.2. Відбортовка 108
3.3.3. Загортання бортика 111
3.3.4. Роздача (розтягнення) 111
3.3.5. Обтиск 112
3.3.6. Правка 113
3.4. Спеціальні методи обробки листових матеріалів 114
3.4.1. Штампування вибухом (імпульсне) 114
3.4.2. Електрогідравлічне штампування 115
3.4.3. Штампування імпульсним магнітним полем 116

Контрольні питання та завдання 117

Список використаної літератури 121

Темплан 2008, поз.6

Навчальне видання

Автори:
Миколай Миколайович Убизький
Олексій Володимирович Кулик
Афанасій Григорович Фесенко
Дмитро Іванович Шевчук

ХОЛОДНЕ ЛИСТОВЕ ШТАМПУВАННЯ

Навчальний посібник

Редактор О.В. Бец
Техредактор Л.П. Замятіна
Коректор Т.А. Андреєва

Підписано до друку .	Формат 60×84/16.	Папір друкарський. Друк
плоский. Ум. друк. арк. .	Ум. фарбовідб.	.
Обл.-вид. арк. .	Тираж 200 пр.	Зам. № .

РВВ ДНУ, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, 49010.
Друкарня ДНУ, вул. Наукова, 5, м. Дніпропетровськ, 49050