

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ХІМІЧНИХ МАШИН ТА АПАРАТІВ

Пуховський Євген Степанович

доктор технічних наук, професор
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0001-7843-0922
 puhovskije50@gmail.com

Фролов Володимир Костянтинович

кандидат технічних наук, доцент
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0002-3697-286X
 v.k.frolov@gmail.com

Приходько Василь Петрович

кандидат технічних наук, доцент
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0003-1852-3777
 privas0718@gmail.com

Бецко Юрій Михайлович

старший викладач
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0002-7283-2207
 betsko.uri@gmail.com

Сучасне важке машинобудування характеризується значною часткою малосерійних і одиничних форм виробництва. Машини, вироблені для металургійної, енергетичної, гірничодобувної, хімічної промисловості, характеризуються значною металомісткістю і високою трудомісткістю їх виготовлення. Для виготовлення великогабаритних деталей використовується або універсальне обладнання та оснащення, або створюються технологічні комплекси, засновані на використанні унікального обладнання, великих пристосувань і наладок, а в деяких випадках – оригінальних інструментів. У зв'язку зі специфічними особливостями оброблення важких і великогабаритних деталей і низькою серійністю їх виробництва, при розробці технології неможливо механічно впроваджувати прогресивні методи і способи оброблення, а також організацію роботи, що широко застосовуються в великосерійному і масовому виробництві галузей, не пов'язаних з важким машинобудуванням. При обробленні таких деталей часто виникає необхідність в оригінальних технічних рішеннях (*Technologia tiazelogo mashinostroenia*, 1967).

Основними завданнями при обробленні важких і великогабаритних деталей є: досягнення необхідної геометрії точності, шорсткості поверхні і фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Чистові та оздоблювальні операції, в процесі яких формуються фізико-механічні властивості поверхневого шару масивних деталей, а отже, і їх експлуатаційні якості, засновані на різанні матеріалів.

Оброблення великогабаритних деталей дуже трудомістке, пов'язане з великою витратою часу. Тому одним з основних питань, які доводиться вирішувати в важкому машинобудуванні, є підвищення продуктивності оброблення в результаті застосування передових технологічних рішень, подальше збільшення виробничого оснащення, його спеціалізації, механізації та часткової автоматизації (*Technologia tiazelogo mashinostroenia*, 1967).

Значним резервом підвищення продуктивності праці у важкому машинобудуванні є раціональна організація виробництва великогабаритних деталей, заснована на використанні групових технологічних процесів, типізації процесів, нормалізації обладнання та інструментів, централізації технологічної підготовки виробництва, впровадженні науково-технічних досягнень.

Хімічне і нафтове машино- та апаратобудування зазвичай має одиничний або малосерійний характер виробництва. Близько 50% хімічної і нафтової апаратури виготовляється за індивідуальними замовленнями та оригінальними моделями (*Berliner V.I., Valashov U.A.*, 1976). В таких умовах особливо утруднена технологічна підготовка виробництва, що характеризується застосуванням переважно універсального металорізального та ковально-пресового обладнання, невисокою осначеністю спеціальним обладнанням та пристроями, створенням тимчасових спеціалізованих технологічних процесів (*Creditor M.A., Cherer G.A.*, 1967; *Koshelev O.S., Ivanov C.B., Tcheshnokov E.V.*, 2014). Аналіз конструкцій апаратів показує, що вони в основному складаються з однотипних

деталей та складальних одиниць (обичайок, днищ, люків, штуцерів, опор тощо). Це зумовлює можливість організації потокового виробництва. При потоковому методі виробництва апаратури створюються спеціалізовані ділянки та цехи, що працюють за принципом поточкових, механізованих ліній, які переналагоджуються для виготовлення, оброблення та складання стандартних і нормалізованих деталей, складальних одиниць і виробів (Vlasova G.B., Tchudevich D.A., Pivovarov N.A., 2022). Тому надзвичайно актуальними є проблеми оптимізації виготовлення та розрахунків параметрів розмірних характеристик основних деталей – обичайок та днищ хімічних апаратів.

Мета роботи. Дослідження розмірних характеристик заготовок корпусних деталей хімічних апаратів, їх впливу на технологію виготовлення та параметри якості деталей, а також оптимізація послідовності обробки в умовах малосерійного та одиничного виробництва.

Ключові слова: хімічний апарат, обичайка, днище, гнуття, штамповка, ковальсько-пресове обладнання, зварювання.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.9>

Виклад основного матеріалу. Основними деталями корпусів апаратів хімічних виробництв є обичайки та днища, які з'єднуються зварюванням.

Найбільш поширеними способами виготовлення обичайок з листового матеріалу є згинання, штампування та зварювання. Для виготовлення обичайок застосовують сталь, виплавлену в мартенівських і електричних печах, і сталь киснево-конверторного виробництва. Обичайки виготовляють з листової сталі звичайної якості або високолегованої корозійностійкої та жаростійкої сталі (Koshelev O.S., Ivanov S.B., Tchestnokov E.V., 2014).

Листовий прокат, що застосовується для виготовлення обичайок, у деяких випадках має спотворення поверхні та форми (хвилястість, вигини, випучини та інші дефекти). Зазначені дефекти листів завтовшки до 30 мм виправляють правкою на листопрямильних машинах-валцях (рис. 1). Лист 1 пропускають у холодному стані між двома рядами послідовно розташованих робочих валків 2. Для запобігання прогину робочі валки спираються на опорні валки 3. Правка здійснюється багаторазовим пластичним гнуттям, при якому волокна розтягуються і довжина їх стає однаковою. Лист рухається між валками зі швидкістю 0,1...0,2 м/с.

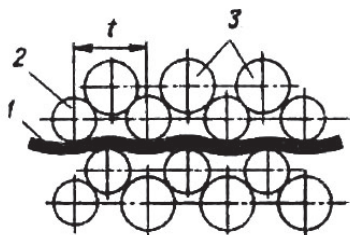


Рис. 1. Схема семивалкової правильної машини

Зусилля правки на верхньому або нижньому ряді валків

$$P = \frac{b\delta^2\sigma_{пл}(n-2)}{t},$$

де b і δ – відповідно ширина та товщина листа; $\sigma_{пл}$ – межа пластичності; n – число верхніх валків; t – відстань між осями валків.

Листову сталь, що застосовується для обичайок, очищають від поверхневих забруднень, окалини та іржі хімічним (травлення розведеними кислотами), терміч-

ним (газополум'яне оброблення) та механічним (піско- і шротоструминне очищення) способами.

Найбільш поширений спосіб шротоструминного очищення полягає в тому, що чавунний дріб діаметром 0,6...0,8 мм під дією відцентрової сили викидається з робочого колеса установки з великою швидкістю (до 60 м/с) на поверхню, що очищається. Швидкість руху листа 0,02...0,03 м/с. Внаслідок динамічного удару окалина руйнується і повністю видаляється з поверхні металу.

Вирізують і обробляють заготовки обичайок за лініями розмітки, які наносять при виконанні підготовчих операцій в одиничному та малосерійному виробництві. При більшому масштабі виробництва використовуються прогресивні методи розмітки (наприклад, фотопроекційний).

Довжина розгортки циліндричної обичайки внутрішнім діаметром $D_{в}$ зі сталі товщиною δ визначається за діаметром нейтральної поверхні $D_{нт}$:

$$L = \pi D_{нт} = \pi(D_{в} + \delta),$$

або з урахуванням низки технологічних факторів

$$L = \pi\left(D_{в} + \delta_{ф} + \frac{a}{2}\right) + b_1 + b_2 + 2z,$$

де $\delta_{ф}$ – фактична товщина листа; a – допустиме відхилення по овальності; b_1 – величина усадки зварного шва; b_2 – величина зазору під зварювання; z – припуск на оброблення кромки.

В табл. 1 наведено припуски на оброблення листового матеріалу в залежності від способу різання. Заготовки обичайок вирізають механічним, газовим та електрогазовим способами. Для різання металу механічним способом застосовують ножиці, дискові та стрічкові пили, диски тертя та механічні ножівки.

При різанні на ножицях (рис. 2) лист 2, що розрізається, знаходиться між нижнім нерухомим 3 і верхнім рухомим 1 ножами. Зусилля різання

$$P_{різ} = 0,5 \cdot \frac{\delta^2}{\text{tg}\varphi} \cdot \sigma_c,$$

де δ – товщина листа, що розрізається; φ – кут створу ножів; σ_c – межа міцності листа на зріз.

З умов запобігання виштовхуванню листа силою $P_{шт}$ кут створу ножів має бути меншим за 16° . Фактично

Припуски на обробку листового матеріалу залежно від способу різання

Спосіб різання металу	Товщина матеріалу, мм						
	3...7	8...12	13...16	17...20	21...25	26...28	29...31
Механічний (гільйотинні ножиці)	3	4	5	5	5	5	5
Газовий та електрогазовий	3	5	6	7	8	9	10

він не перевищує 6° . Для зменшення тертя між ножами і металом, що розрізається, робоча площа ножа повинна мати задній кут $\alpha = 1,5...3^\circ$. Кут між нижньою площиною ножа та площиною розрізу $\beta = 85^\circ$. Зазор між лезами ножів для забезпечення чистого різку має бути мінімальним: $a \leq 1/30 \delta$, але не більше 0,5 мм.

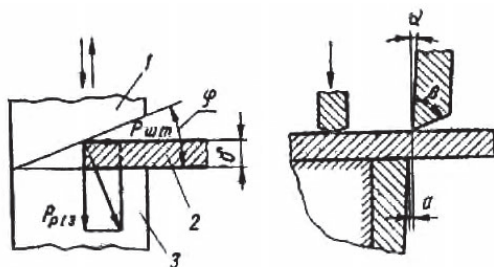


Рис. 2. Схема механічного різання листового прокату

Заготовки для обичайок вирізають на гільйотинних ножицях, які застосовуються для різання листового матеріалу завтовшки до 60 мм і завдовжки 1000...3200 мм. До недоліків механічного різання відносяться відсутність можливості різання по криволінійному контуру і оброблення кромки під зварювання, обмеження по товщині металу, що розрізається (до 60 мм), обмеження довжини різання (до 3200 мм) і висока вартість обладнання.

Широко застосовують також газове різання металу. Цим способом можна різати метал будь-якої товщини і довжини по прямому і криволінійному контурам з одночасним обробленням кромки під зварювання, отримувати досить високу точність і чистоту різку, що дає змогу виключити подальше механічне оброблення кромки. Глибина борозенок мікронерівностей становить 30...150 мкм.

З метою підвищення продуктивності і точності оброблення та збільшення коефіцієнту використання матеріалу широко застосовується газорізальне обладнання з ЧПК. Зазвичай таке обладнання використовується в комплексі з програмними засобами, що здійснюють розрахунок розмірів заготовки, вибір раціонального варіанта розкрою листа, а також призначення оптимальних режимів оброблення (Vlasova G.B., Tchudevich D.A., Pivovarov N.A., 2022).

В даний час широко впроваджується плазмово-дуговий спосіб різання металів як найбільш універсальний та продуктивний. Газоелектричне різання металів вольфрамовим електродом діаметром 3...6 мм у середовищі захисних

газів (азоту, аргону та суміші аргону з воднем) засноване на розплавленні та видуванні металу із зони різку.

Оброблення кромки листових заготовок обичайок виконують з метою видалення шару неякісного (наклепаного або газонасиченого) металу та для отримання прямолінійності кромки із заданою конфігурацією оброблення під стикове зварювання. Оброблення здійснюють механічним способом або газовою різкою.

Кромки заготовок довжиною до 12 м обробляють на кромкостругальних верстатах. Заготовку закріплюють на столі верстата гвинтовими, гідравлічними або пневматичними затискачами, кромку обробляють у процесі зворотно-поступального руху каретки із закріпленим у ній різцем. При зміні руху каретки різець повертають. При чорновому обробленні швидкість різання знаходиться в межах 0,13...0,2 м/с при глибині різання 4...6 мм і подачі 0,5...1 мм/подв. хід; при чистовому обробленні кромки швидкість різання становить 0,16...0,24 м/с при глибині різання 2...3 мм та подачі 0,2...0,3 мм/подв. хід.

Для газового стругання застосовують спеціальні мундштуки, які дають змогу не лише обробляти кромки, а й видаляти дефекти зварних швів. Повітряно-дугове стругання відрізняється від газового вищою продуктивністю, викликає меншу деформацію виробу і полягає в тому, що метал розплавляється дугою вугільного електрода діаметром 4...10 мм і видувається струменем стисненого повітря.

Іноді кромка листа повинна мати потовщення задля підвищення конструктивної міцності деталі, компенсації ослаблення в зоні зварювання, підвищення жорсткості та інших цілей. Потовщення кромки отримують в результаті торцевої прокатки.

Основним способом виготовлення обичайок корпусів хімічних апаратів є згинання листового прокату, що виконується переважно на валкових листозгинальних машинах. Цей спосіб має значні переваги в порівнянні з виконанням подібних операцій на пресах у штампах. Гнуття здійснюється за допомогою пластичного згину при розміщенні заготовки між валками, що обертаються під дією сил тертя, які виникають між заготовкою і валками. Пластичне деформування металу відбувається у локальній зоні, яка безперервно переміщається вздовж заготовки (Koshelev O.S., Ivanov S.B., 2014).

Гнуття здійснюється в холодному та гарячому стані. По можливості необхідно віддавати перевагу холодному згинанню. На рис. 3 показані області раціонального застосування холодного та гарячого згинання. При внутрішньому діаметрі обичайки $D_b < 40 \delta$ згинання слід проводити в гарячому стані.

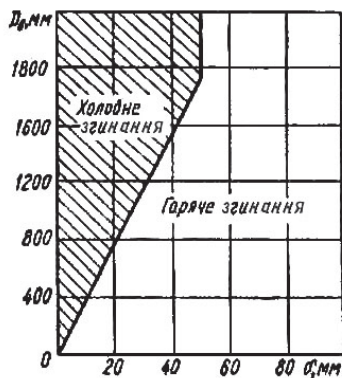


Рис. 3. Области застосування холодної і гарячої згинання листової сталі

Гнуття обичайок проводиться на листозгинальних машинах, які діляться в основному на дві групи: три- та чотиривалкові. Найбільш прогресивним для циліндричних обичайок є згинання на чотиривалкових машинах (рис. 4), а також на тривалкових машинах з регульованими бічними валками (Moshnin E.N., 1967).

При згинанні на чотиривалковій машині заготовка заводиться у валки до упору в протилежний бічний валок (рис. 4, а) і затискається між середнім і нижнім валками в результаті переміщення вгору нижнього валка. Потім проводиться згинання заготовки на вузькій ділянці шляхом переміщення бічного валка (рис. 4, б). При включенні обертання валків кінець заготовки до краю згинається на кінцевий радіус (рис. 4, в). Після цього валки встановлюються за симетричною схемою та згинається середня ділянка заготовки на проміжний радіус (рис. 4, г). Підгинання другого кінця заготовки здійснюється тим самим способом, що і підгинання першого. Потім за один-два пропуски між валками заготовка на середній ділянці згинається на остаточний радіус (рис. 4, д, е).

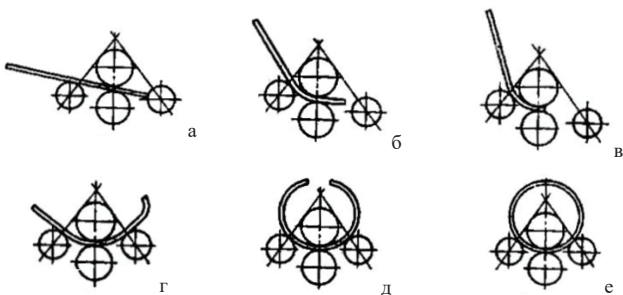


Рис. 4. Згинання обичайки на чотиривалковій машині

Гнуття обичайок на машинах з асиметричним розташуванням валків показана на рис. 5. Кінець листа затискається між валками 1 та 2 і підняттям валка 3 згинається (рис. 5, а) по заданому радіусу, контрольованому шаблонами. Потім лист виймають з машини, перевертають і вставляють між валками з іншого боку (рис. 5, б), після чого здійснюється остаточне згинання за один прохід (рис. 5, в).



Рис. 5. Гнуття обичайки на машині з асиметричним розташуванням валків

У машинах симетричного типу зазвичай проводиться згинання заготовки з попередньо підігнутими на іншому обладнанні кромками. Підгинання кромки здійснюється на підгинальній парно-роликівій машині або підгинальному пресі. Іноді підгинання кромки здійснюється і на машині з симетричним розташуванням валків за допомогою допоміжної плити (рис. 6, а) або спеціального клину (рис. 6, б). Лист 1 заводять між приводними 3 і натискним 2 валками (рис. 7). Потім натискний валок підводиться впритул до листа, притискає його до нижніх валків і прогинає. При обертанні приводних валків лист отримує поступальний рух. Одночасно з реверсивним прокочуванням листа здійснюється подача натискного валка і внаслідок цього – згинання листа до заданого радіусу.

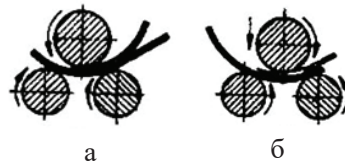


Рис. 6. Способи підгинання кромки на тривалковій машині з симетричним розташуванням валків



Рис. 7. Гнуття обичайки на тривалковій машині з симетричним розташуванням валків

При згинанні на машинах з верхнім валком, що переміщується в горизонтальному напрямку (рис. 8), лист закладається між валками, верхній валок зсувається в ліве положення (рис. 8, а), притискається до отримання необхідного зусилля (рис. 8, б), лист просувається вперед (рис. 8, в), в результаті чого виконується підгинання однієї кромки. Так само підгинається друга кромка (рис. 8, г, д, е), після чого валок встановлюють у положення, що забезпечує необхідний радіус вигину, та виконують кругове згинання листа (рис. 8, ж).

Для згинання заготовок обичайок у нагрітому стані і при виготовленні обичайок великих діаметрів застосовують вертикальні листозгинальні машини. Гнуття листа (рис. 9) виконується між циліндричним приводним валком 1 і бічними опорами 2, відстань між якими може змінюватися (рис. 9, а).

Гідравлічний затискний ролик 3 в процесі згинання постійно підтиснутий до листа 4. Лист укладається на опори, які при русі у напрямку до валка згинають

ділянку листа. Потім опори відводяться і включається обертання валка, при цьому лист переміщується між валком і роликком на деяку відстань (рис. 9, б), після чого опори знову переміщуються у напрямку до валка (рис. 9, в) і згинають наступну ділянку. Ці рухи автоматизовані та повторюються до повного вигину листа.

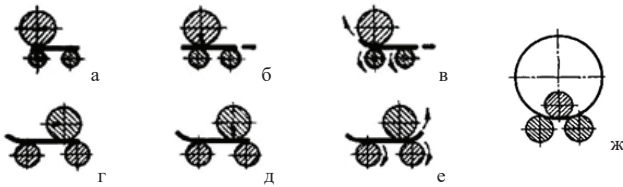


Рис. 8. Гнуття обичайки на машині з верхнім валком, що переміщується в горизонтальному напрямку

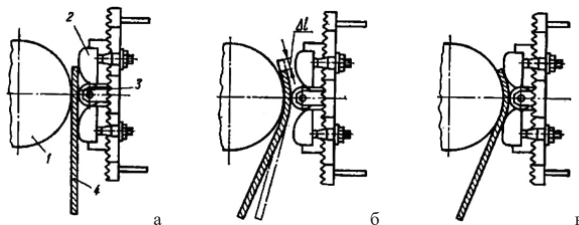


Рис. 9. Гнуття обичайки на вертикальній листозгинальній машині

Якщо потужність обладнання недостатня для вигину листа в холодному стані, згинання виконують з попереднім нагріванням. Температура та режим нагрівання обичайки залежать від марки сталі та товщини стінки листа. Температура вибирається нижче тієї, при якій утворюється окалина. Вуглецеві сталі нагрівають до температури 930...950°C, сталі типу 12ХМ, 12МХ – до 980...1050°C.

Для отримання необхідних механічних властивостей металу пластичне деформування його закінчується при температурі не нижче 600°C для вуглецевих і 700...750°C для легованих сталей.

Гнуття конічних обичайок відрізняється деякими особливостями, зумовленими їхньою формою. При згинанні конічних обичайок необхідно створювати неоднаковий по ширині заготовки прогин її між валками (у кромки з меншим радіусом створюється більший прогин, ніж у кромки з більшим радіусом). Вершина конуса обичайки, що згинається, завжди повинна лежати у вертикальній площині, яка проходить через поздовжню вісь середнього валка.

В якості заготовки для конічних обичайок використовують листову сталь. Розгортки конічних обичайок мають вигляд кільцевих секторів (рис. 10). Розміри конічної обичайки пов'язані між собою залежностями:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_1 - R_2}{l_0}; \quad l = \frac{l_0}{\cos \alpha}; \quad S_1 = \frac{R_1}{\sin \alpha}; \quad s_2 = s_1 - l.$$

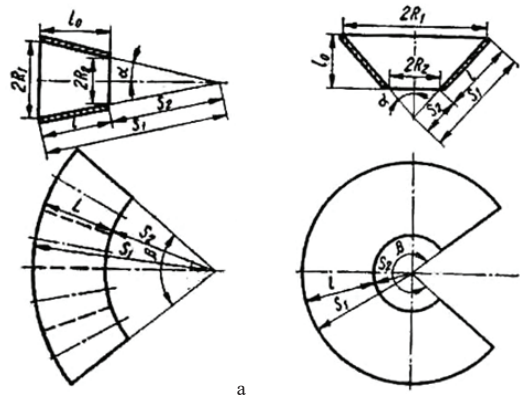


Рис. 10. Форма заготовок для конічних обичайок

$$\text{Кут сектору заготовки } \beta = 360 \sin \alpha \text{ або } \beta = 360 \frac{R_1}{S_1}.$$

Для конічної обичайки з кутом конуса до 60° потрібна заготовка з центральним кутом, меншим 180° (рис. 10, а), а при більшому куті конуса – з кутом, що перевищує 180° (рис. 10, б).

Корпуси апаратів високого тиску, що мають великі габаритні розміри (діаметр 3000 мм і вище), виготовляються цілноккованими, ковано-звареними, штампо-звареними, крученими та багатощаровими.

На рис. 11 представлені деякі способи виготовлення корпусів товстостінних апаратів високого тиску (Pikhtovnikov R.V., Zavalov A.D., 1964). При виготовленні кованих корпусів (рис. 11, а) з великих злитків застосовується унікальне обладнання. Цей спосіб характеризується великим обсягом механічного оброблення, низьким коефіцієнтом використання матеріалу, обмеженими можливостями збільшення розмірів та розширення обсягу випуску корпусів.

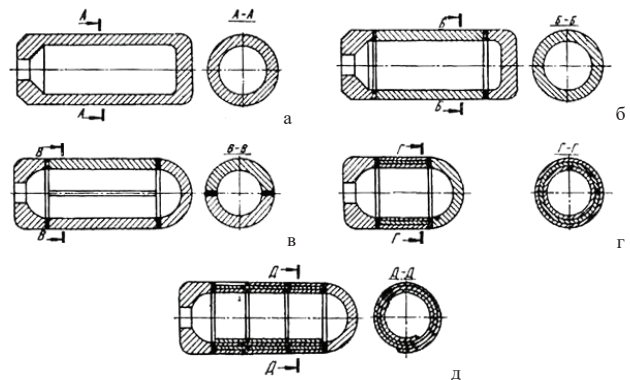


Рис. 11. Способи виготовлення корпусів товстостінних апаратів високого тиску

При виготовленні ковано-зварних корпусів (рис. 11, б) знижується обсяг трудомістких кувальних робіт, збільшується продуктивність металорізального обладнання, відпадає необхідність у будівництві нових цехів.

Виготовлення штампо-зварних корпусів (рис. 11, в) характеризується ще більш високою економічністю виробництва, оскільки малопродуктивне кування замінено штампуванням. Крім того, при цьому способі підвищується точність виготовлення заготовок обичайок

і днищ і відповідно зменшується обсяг механічного оброблення.

Для корпусів апаратів високого тиску успішно застосовується спосіб виготовлення з окремих концентричних шарів (рис. 11, г) або з рулонованих заготовок (рис. 11, д). При використанні цих способів немає необхідності у застосуванні злитків металу, не потрібне обладнання для їх кування, штампування та механічного оброблення. Технологія виготовлення корпусів цими способами проста, тому не потрібні робітники високої кваліфікації.

Багат шарові апарати мають велику надійність в експлуатації, оскільки для їх виготовлення можна використовувати тонколистову сталь з більш високими характеристиками якості, ніж у товстолистої сталі. При використанні цих способів на 20% знижуються витрати матеріалу та загальна вартість апаратів (Technologia izgotovlenia, 2017).

Другим основним елементом будь якого хімічного апарату є днище. Підвищення робочих тисків і температур зумовили різноманітність форми днищ. Широко застосовуються еліптичні, плоскі відбортовані, сферичні, напівкульові та конічні днища (Creditor M.A., Sherer G.A., 1967; Polikarov E.U., 2010). Деякі форми днищ показані на рис. 12. Найбільш поширеними є еліптичні днища (рис. 12, а), геометричні розміри яких представлені в табл. 2. Днища виконуються діаметром від 299 до 4200 мм з товщиною стінки від 4 до 60 мм і мають циліндричну ділянку (борт) заввишки 25...60 мм. Їх виготовляють з листової сталі різних марок (15, 15K, 20, 20K, 25, Ст2, Ст3, сталь 30, мСт2 і мСт3), з нержавіючої сталі (наприклад, Х18Н10Т), титану та його сплавів, міді, алюмінію та його сплавів.

Днища, які піддаються дії агресивних середовищ, виготовляють із кислототривких і вуглецевих сталей, що плакуються з одного боку кислототривкою сталлю.

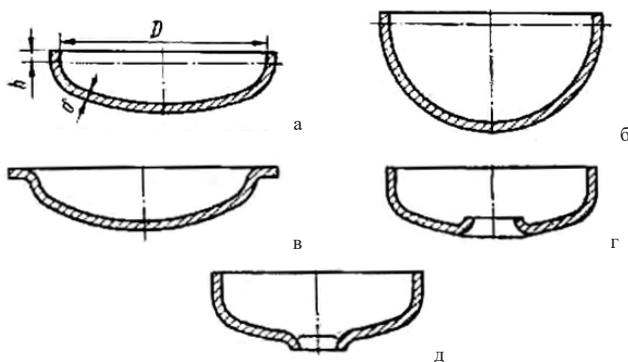


Рис. 12. Основні форми днищ: а – еліптичне; б – сферичне; в – з фланцем; г – з отвором, відбортованим всередину; д – з отвором, відбортованим назовні

Для виготовлення днищ вибираються круглі заготовки, вирізані з листової сталі. Розміри вихідної заготовки зазвичай визначають приблизно з невеликим запасом, а потім уточнюють їх при виготовленні перших заготовок. Прийнято вважати (Chemical

and Pharmaceutical equipments, 2022), що при штампуванні днищ поверхня заготовки залишається постійною, тобто розтягування заготовки на центральній ділянці компенсується зменшенням площі заготовки на периферійній ділянці. Діаметр плоскої заготовки визначають, виходячи з умови сталості площі поверхні заготовки:

$$D_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\sum F},$$

де $\sum F$ – сума площ поверхонь простих елементів, з яких складається деталь.

Формули, за якими можна визначити діаметр плоскої заготовки для найбільш поширених днищ, вказані в табл. 3. У наведених рекомендаціях щодо підрахунку розмірів заготовки розміри днища приймають по середньому колу.

В умовах великосерійного виробництва найбільш поширеним та економічним способом виробництва є штампування днищ на пресах. У малосерійному виробництві днищ зазвичай застосовують такі способи виготовлення, при яких використовуються менш дороге обладнання та оснащення (наприклад, видавлювання, гідроштампування, електромагнітне та вакуумне формування) (The manufacture of apparatus and chemicals, 2021).

На рис. 13 показаний штамп для штампування днищ на провал. Пустотілий пуансон 2 штампа (рис. 13, а), виготовлений із сталевого лиття, закріпленний на стійці 1 матриці 3, що має форму протяжного кільця. Матриця встановлена на стійках преса 5, в яких також кріпляться зйомники 4. Форма торцевої поверхні пуансона відповідає формі днища. На торці пуансона є штир, що входить в центральний отвір днища і захищає днище від бічного зміщення під час штампування. Штамп має комплект матричних кілець, кожне з яких призначене для штампування днища з певною товщиною стінки.

Штампування днища проводиться наступним чином. Нагріта заготовка транспортується від печі, встановлюється на верхній площині матриці та центрується по упорах. При протягуванні заготовки пуансоном через матрицю вона набуває форми пуансона. Після штампування і виходу заготовки з матриці штирі зйомника 4 висуваються і при зворотному ході днище пуансона знімається. На штирях зйомника 4 виконані скоси, тому вони легко засуваються всередину на початку наступного ходу. Для видалення днища передня стійка штампу відсувається і днище разом з підкладною плитою 6 висувається лебідкою. Зручніше знімати відштамповане днище в штампі зі складаним пуансоном, що має клиноподібні вкладиші (рис. 13, б). При штампуванні складаний вкладиш, зовнішня поверхня якого відповідає формі днища, притискається верхніми торцями до борту конічної частини пуансона. При зворотному ході зовнішній діаметр пуансона зменшується і днище вільно знімається. Кут конічної частини пуансона 10...12°, а зазор між вкладишами – трохи більше 5 мм.




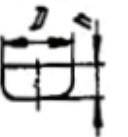
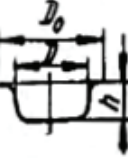

Геометричні розміри еліптичних днищ, мм

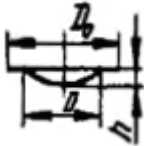

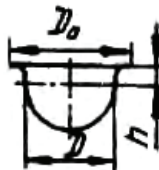
Внутрішні розміри днища		Товщина δ^*	Внутрішні розміри днища		Товщина δ^*
Діаметр D	Висота h		Діаметр D	Висота h	
400	100	4...16	1600	400	8...42, 46, 50, 54, 60
450	112	4...18	1700	425	10...42, 46, 50, 54, 60
500	125	4...20	1800	450	10...42, 46, 50, 54, 60
550	137	4...20	2000	500	10...42, 46, 50, 54, 60
600	150	4...24	2200	550	12...42
650	162	4...26	2400	600	12...42
700	175	4...26	2600	650	12...34
800	200	6...28	2800	700	14...30
900	225	6...30	3000	750	16...30
1000	250	6...30	3200	800	20...28
1100	275	6...30	3400	850	20...28
1200	300	6...30	3600	900	22...28
1300	325	6...32	3800	950	22...28
1400	350	6...42, 46, 50, 54, 60	4000	1000	22...28
1500	375	8...42, 46, 50, 54, 60			

*В інтервали значень величини δ входять не всі цифри, а через одну (наприклад, в інтервал 4...16 даної таблиці входять цифри 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16).

Таблиця 3

Формули для визначення діаметрів заготовок днищ

Днище	Ескіз	Діаметр заготовки
Сферичне		$D_s = 1,41D\sqrt{1 + 2\frac{h}{D}}$
Стандартне еліптичне ($h = D/4$)		$D_s = D\sqrt{1,38 + 4\frac{h}{D}}$
Мілке еліптичне ($h = D/16$)		$D_s = D\sqrt{1,21 + 4\frac{h}{D}}$
Плоске відбортоване з малими закругленнями		$D_s = D\sqrt{1 + 4\frac{h}{D}}$
Плоске відбортоване з фланцем та малими закругленнями		$D_s = D\sqrt{\frac{D_0^2}{D_2} + 4\frac{h}{D}}$
Плоске відбортоване з великими закругленнями		$D_s = D\sqrt{1 - 1,72\frac{r}{D} - 0,56\left(\frac{r}{D}\right)^2 + 4\frac{h}{D}}$

Тарілчасте		$D_s = D \sqrt{\left(\frac{D_0}{D}\right)^2 + 4\left(\frac{h}{D}\right)^2}$
Конічне		$D_s = D \sqrt{2\left(1 + \frac{D_1}{D}\right)\frac{h}{D} + \left(\frac{D_1}{D}\right)^2}$ $\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{D_1}{D}\right)^2 + \left(\frac{h}{D}\right)^2}$
Сферичне з бортом та фланцем		$D_s = D \sqrt{2 + \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 + 4\frac{h}{D}}$

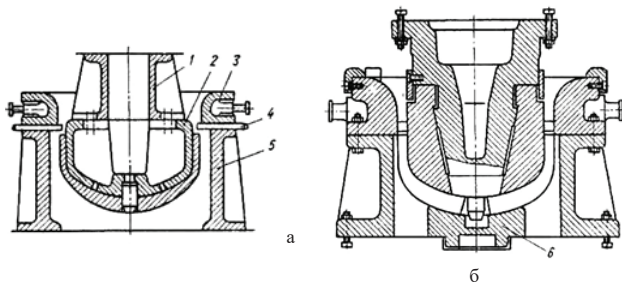


Рис. 13. Штамп для штампування днищ на провал

Спосіб штампування на дно доцільно використовувати для отримання днищ з точною формою дна, а також днищ з ексцентрично розташованими отворами. У цьому випадку матриця виконується глухою (рис. 14, а) або зі вставним дном (рис. 14, б). Остаточне формування днища відбувається в кінці робочого ходу. Видаляється воно за допомогою розташованого знизу виштовхувача з приводним гідроциліндром. Для запобігання утворення вигинів на нижній частині днища дно матриці виконується рухомим (його кріплять до плунжера гідроциліндра).

Розглянуті способи штампування зазвичай малоефективні під час виготовлення тонкостінних днищ з товщиною стінки до 25...30 мм. Для таких днищ розроблені (Moshnin E.N., 1967) технологічні процеси багатоперехідного штампування, засновані на застосуванні універсальних штампів. Витяжка днищ здійснюється з притиском за два або три переходи одним пуансоном при використанні набору матричних кілець відповідних діаметрів. Перед кожним переходом змінюють лише матричне кільце. Це дозволяє здійснювати штампування в універсальному штампі, який застосовується для звичайної витяжки більш товстостінних днищ. На першому переході формується центральна частина заготовки з наданням їй остаточної форми та розмірів, потім на наступних двох переходах послідовно формуються інші кільцеві ділянки заготовки (рис. 15).

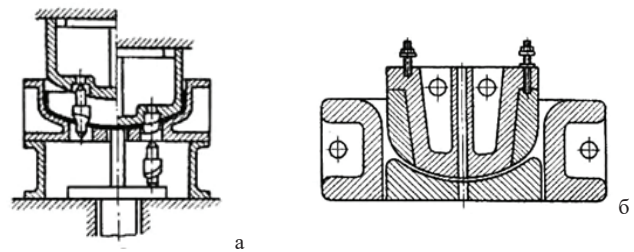


Рис. 14. Штампування днищ на дно

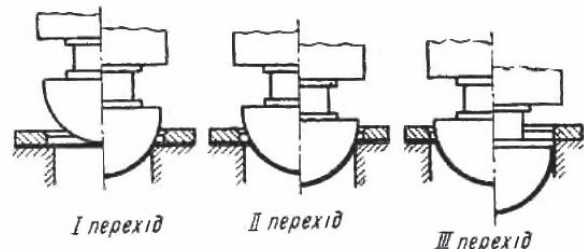


Рис. 15. Схема багатоперехідного процесу штампування днищ

На рис. 16 наведена схема секційного способу багатоперехідного штампування великогабаритних тонкостінних днищ. Заготовка 5 укладається на пуансон 6 і притискається до нього матрицею 4, закріпленою на повзуні 3. Вісь 7 разом з пуансоном 6 періодично повертається між черговими робочими ходами пуансона 2. Опори матриці перед початком робочого ходу пуансона 2 встановлюються в робоче положення, а перед початком повороту заготовки відсуваються вліво. Пуансон 2, періодично натискаючи на заготовку 5, деформує її на деяку глибину. Після одного повного оберт заготовки пуансон починає опускатися нижче і таким чином поступово формується готове днище.

У такий спосіб штампують днище із співвідношенням $\frac{\delta}{D} \cdot 100 \geq 0,5$, (δ – товщина стінки днища, D – його діаметр).

У великосерійному виробництві при штампівці днищ невеликих розмірів доцільно використовувати спосіб витяжки з перегином заготовки (рис. 17). Матриця складається з зовнішньої кільцевої частини 2 та внутрішньої матриці 3, виконаної по формі внутрішньої поверхні днища. Робоча поверхня пуансона 1 виготовлена у вигляді вузького кільця. Для виштовхування сформованого днища з матриці передбачено кільце 4, яке спирається на штирі 5 нижнього циліндру. У процесі витяжки середня частина заготовки обтягується по внутрішній матриці, а зовнішня – спочатку підгинається, а потім перегинається через ребро пуансона і притискається ним до внутрішньої матриці. Невеликі складки виправляються при перегинанні через ребро пуансона, а потім вдруге правляться при затисканні кромки заготовки між матрицею та пуансоном в кінці робочого ходу.

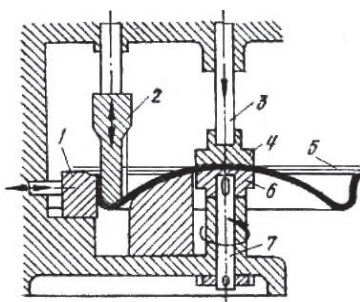


Рис. 16. Схема секційного способу штампування днищ

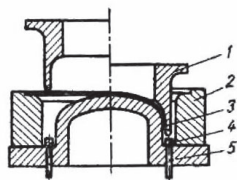


Рис. 17. Штампування днищ за способом витяжки з перегином заготовки

При штампуванні днищ важливе значення має визначення силових характеристик процесу. Зусилля притискання заготовки має бути достатнім для її утримання. Заготовка тисне на притискач внаслідок утворення складок та дії згинального моменту, що виникає в результаті згинання заготовки на заокругленнях матриці. За інших рівних умов для тонких заготовок необхідне більше питоме зусилля притискання, ніж для товстостінних. Зусилля притискання, достатнє для запобігання утворенню складок:

$$Q = 0,8\sigma_s \varphi'' \varphi' \left(\frac{1}{k} - \varphi' \right) (1 - K^2) \frac{D_z^2}{\delta \cdot 100},$$

де D_z – діаметр заготовки; σ_s – межа міцності матеріалу; φ , φ' , φ'' – емпіричні коефіцієнти; δ – товщина заго-

товки; $K = \frac{D_{z,d}}{D_z}$ – коефіцієнт витяжки; $D_{z,d}$ – зовнішній діаметр днища.

У разі холодної витяжки $\varphi = 0,72...0,78$, $\varphi' = 0,95...1,0$ для $\varphi_r = 0,15...0,25$; $\varphi = 0,8...0,85$, $\varphi' = 1,1...1,5$ для $\varphi_r = 0,3...0,4$, де φ_r – відносне зменшення площі поперечного перерізу зразка з матеріалу, що деформується, на початку утворення шийки при розтягуванні. У разі гарячої витяжки $\varphi = \varphi' = 1$.

Коефіцієнт φ'' при холодному штампуванні знаходиться в межах 0,006...0,007, при гарячій – в межах 0,004...0,005.

Зусилля витяжки

$$P = \pi (D_{z,d} - \delta) \delta p,$$

де p – питомий тиск витягування.

Зусилля гарячого штампування зі змащенням та підігрівом, при якому $\frac{1}{k} = 1,3...1,6$:

$$P = C_1 (D_z - C_2 D_{z,d}) \sigma_B \delta,$$

де $C_1 = 1,5$; $C_2 = 0,6$.

Зазвичай штампування днищ проводиться зі змащенням, яке наносять на пуансон та матрицю. При холодному штампуванні в якості мастила застосовують машинне масло, при гарячій – суміш машинного масла та графіту. Для запобігання утворенню газових мішків від згоряння масла при штампуванні в пуансоні передбачають наскрізні отвори для виходу газів у внутрішню порожнину.

Технологічний процес виготовлення корпусу апарату закінчується складанням та зварюванням корпусу з окремих обичайок та зварюванням корпусу з днищем. При складанні обичайок стикові кромки зачищаються абразивом або металевою щіткою. Обичайки збираються та прихоплюються зварюванням по кільцевим швам на складальному стенді. Після вимірів корпусу по діаметру у місцях стикування виконується зварювання спочатку зовнішніх, а потім внутрішніх кільцевих швів.

Зазвичай збирання корпусів з обичайок і зварювання кільцевих стиків проводять на спеціальних складальних стендах. На рис. 18 показаний стенд для складання корпусів з обичайок діаметром 600...3600 мм і максимальною довжиною 9000 мм (Moshnin E.N., 1967). Скоба 7 для зовнішнього стикування обичайок діаметром 600...1100 мм переміщується у спеціальних напрямних, розташованих за роликівими опорами кантувача, зі швидкістю 10 м/хв, а пневмоскоба 3 для внутрішнього стикування обичайок діаметром 1200...3600 мм переміщується роликівими опорами кантувача зі швидкістю 11,4 м/хв. Реверсивне обертання стикованих обичайок зі швидкістю 3,8 м/хв здійснюється за допомогою кантувача 6 з приводними роликівими опорами, що самовстановлюються. Рухомий упор 12 переміщується рейковим шляхом між роликівими опорами зі швидкістю 11,4 м/хв.

При стикуванні обичайки діаметром 600...1100 мм укладаються на роликіві опори кантувача до положення упору в виступ 4 на пневмоскобі. Підтискання обичайок по торцях проводиться встановленим на рухомому упорі

пневмоциліндром 9 із зусиллям 35 кН, суміщення кромки обичайок – пневмоциліндром 8 із зусиллям 80 кН, розташованим на скобі для зовнішнього стикування. Після поєднання кромки виконують прихватку стику під зварювання.

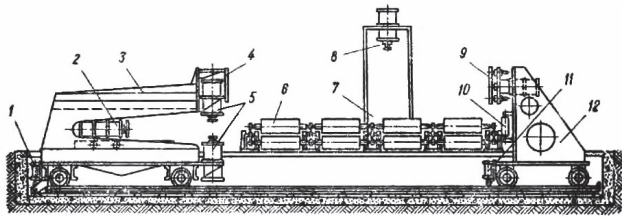


Рис. 18. Стенд для складання обичайок під зварювання кільцевих стиків

Стикування обичайок діаметром 1200...3600 мм виконують аналогічним чином, укладаючи обичайку на роликові опори кантувача так, щоб вона упиралася в ролики 10 рухомого упору.

Горизонтальний пневмоциліндр 2 з зусиллям 45 кН, встановлений на пневмоскобі для внутрішнього стикування, служить для підтискання обичайок, що стикуються по торцях, а вертикальні пневмоциліндри 5 з робочим зусиллям 80 кН кожен – для суміщення кромки. Після цього виконують прихватку стику під зварювання.

Пневмоскоба і рухомий упор фіксуються в заданому положенні спеціальними пневмоупорами 1 і 11, зблокованими з приводом руху. При складанні днища з корпусом кромки обичайки та днища зачищаються під зварювання на ширину 15...20 мм.

Поєднання кромки обичайки 3 і днища 1, що стикується, (рис. 19) досягається за допомогою стягую-

чих болтів, косинців і кільцевого пристрою 2, що охоплює вузол, з прорізами для електрозварювання. Для стикування можна використовувати також напрямні планки, які приварюються безпосередньо до корпусу та днища.

Зварювання кільцевого шва виконують спочатку ззовні, потім зсередини. Для апаратів діаметром менше 1200 мм спочатку виконують внутрішній шов, а потім зовнішній.

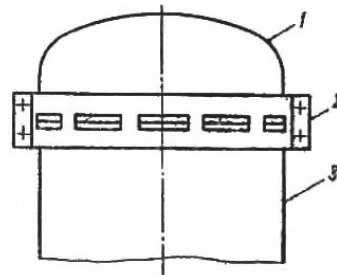


Рис. 19. Складання обичайки з днищем

Висновки. Приведена методика розрахунку розмірів та параметрів хімічних апаратів – обичайок та днищ, яка дозволяє побудувати послідовність їх виготовлення та забезпечити характеристики їх якості. Побудовані технологічні процеси та визначено обладнання, що використовується для досягнення високої продуктивності. Розглянуті способи усунення похибок розкрою та складання елементів хімічних апаратів. Проаналізовані процеси складання та з'єднання обичайок та днищ з метою забезпечення точності їх виготовлення.

Бібліографічні посилання:

1. Kovalenko I.V., Malinovsky V.V. (2005), *Osnovni protzessi, mashini ta aparati khimichnikh virobnitstv*. [Main processes, machines and devices of chemical industries], – K., Volia, 196 s. [in Ukrainian].
2. Novikov F.N., Andilakhai V.O. ta in. *Mekhanichna obrobka velikogabaritnikh detalei zi znosostiykimi naplavochnimi materialami*. (2015), [Mechanical processing of large parts with surfacing materials], Kharkiv: KHNEU im. S. Kuznetzia, - 312 s. [in Ukrainian].
3. Mikulenok I.O. (2022) *Vigotvlennia obladnannia khimichnikh virobnitstv*. [Manufacture of equipment for chemical industries], - K., NTUU (KPI), 233 s. [in Ukrainian].
4. Milevsky S.V. (2016), *Lokalne zmitznennia poverkhnevogo sharu*. [Local strengthening of the surface layer], *Visnik ZDTU*, N 3 s. 27-40. [in Ukrainian].
5. Taranenko G.V., Shtonda U.M. (2005). *Konstruivannia i rozrakhunok zvarnikh posuden ta aparativ*. [Design and calculation of welded vessels and devices] Lugansk, 310 s. [in Ukrainian].
6. Chemical and Pharmaceutical Equipements ,(2022). *Farbon aitec engineers./GIDC, Vatra Ahmedabad Gujarat*.
7. The manufacture of apparatus and chemicals, (2021). /Lous Bauman. Doi: 10.1126/science.45.1162.338a.

Pukhovskiy E. S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Frolov V. K., Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Prykhodko V. P., Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Betsko Yu. M., Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Technological problems of manufacturing body parts of chemical machines and apparatus

Modern heavy engineering is characterized by a significant proportion of small-scale and single forms of production. Machines produced for the metallurgical, energy, mining, chemical industries are characterized by high metal consumption and high labor intensity of their manufacture. For the manufacture of large-sized parts, either universal equipment and equipment with numerical control are used, or technological complexes are created based on the use of unique

equipment, large devices and conductors, and in some cases – original tools. Due to the specific features of the processing of heavy and large-sized parts and the low seriality of their production, in the development of technology it is impossible to mechanically introduce progressive methods and methods of processing, as well as the organization of work that are widely used in large-scale and mass production of industries not related to heavy engineering. When cutting these parts, there is often a need for original technical solutions (Technologia tiajelogo mashinostroenia, 1967).

The main tasks in the processing of heavy and large-sized parts are: achieving the required geometry of accuracy, surface roughness and physical and mechanical properties of the surface layer. Finishing operations, during which the physical and mechanical properties of the surface layer of massive parts are formed, and consequently, their performance, based on cutting of materials.

Processing large-sized parts is very time consuming, associated with a lot of time. Therefore, one of the main issues that have to be addressed in heavy engineering is to increase the processing productivity as a result of the use of advanced technological solutions, a further increase in production equipment, its specialization, mechanization and partial automation. A significant reserve for increasing labor productivity in heavy engineering is the rational organization of the production of large-sized parts, based on the use of group technological processes, typing of processes, normalization of equipment and tools, centralization of technological preparation of production, introduction of scientific and technological achievements.

Chemical and petroleum engineering and apparatus construction usually has an individual and small-scale nature of production. About 50% of chemical and petroleum equipment is manufactured according to individual orders and original models (Berliner V.I., Balashov U.A., 1976). In such conditions, technological preparation of production is especially difficult, characterized by the use of mainly universal metal cutting and forging and pressing equipment, low equipment with special equipment and devices, and the creation of temporary specialized technological processes.

Analysis of the designs of the devices shows that they mainly consist of the same type of parts and assembly units (shells, bottoms, hatches, fittings, supports, etc.). This predetermines the possibility of organizing in-line production. In the flow method of equipment production, specialized sites and workshops are created that work on the principle of in-line, mechanized lines that are reconfigured for the manufacture, processing and assembly of standard and normalized parts, assembly units and products (Vlasova G.B., Tchudevich D.A., Pivovarov N.A., 2022). Therefore, the problems of optimization of production and calculation of parameters of dimensional characteristics of the main parts – shells and bottoms of chemical devices – are extremely relevant.

The purpose of the work. Research of dimensional characteristics of blanks of body parts of chemical devices, their influence on manufacturing technology and quality parameters of parts, as well as optimization of the processing sequence in conditions of small-scale and single production.

Key words: chemical apparatus, shell, bottom, bending, stamping, forging and pressing equipment, welding.