

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.96/98 (075)

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.147-168>

В. М. Боков, проф., канд. техн. наук, **О. Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук, **І. І. Павленко**, проф., д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Viktor.alia.kntu@gmail.com

Витягування циліндричних деталей із не суцільного матеріалу

Запропоновано, розроблено та досліджено новий спосіб витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком. В даному способі витягування здійснюють із квадратної заготовки, сторони якої паралельні діагоналям вічка сітки. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких нерівномірність висоти циліндричної частини деталі суттєво зменшується, що дозволяє на 35-40 % знизити собівартість штампування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком.

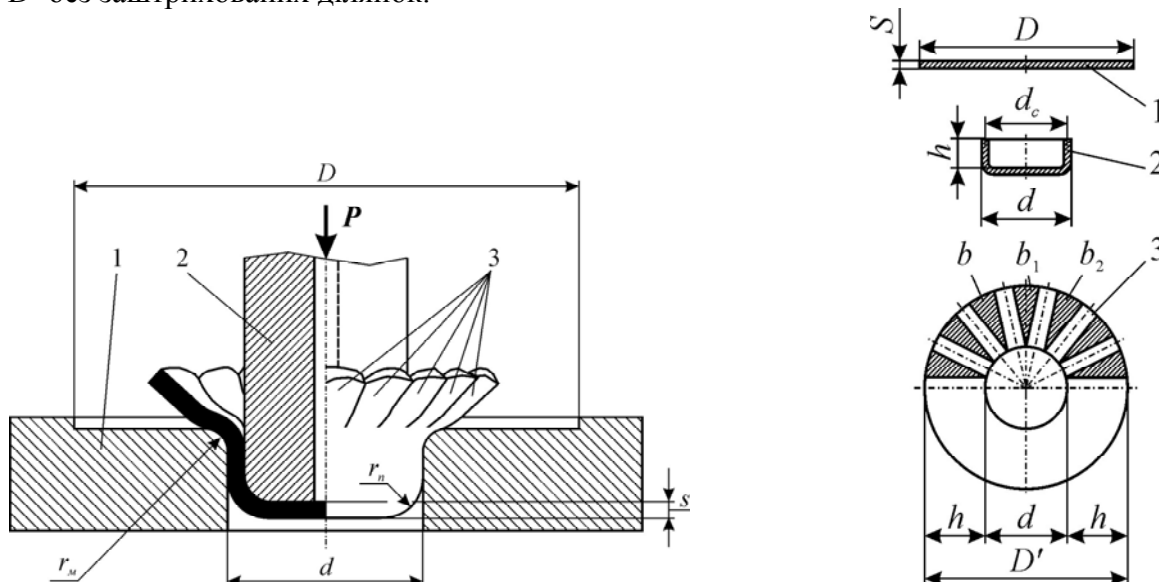
Запропоновано та експериментально випробувано новий спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки, який відрізняється тим, що заготовку попередньо перфорують; перфорацію заготовки виконують тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі; перфорацію заготовки виконують так, щоб сума Σ усіх перемичок за шириною a_i на кожному концентричному колі розташування отворів перфорації дорівнювала довжини кола за середнім діаметром d_c отриманої циліндричної деталі, тобто є справедливим вираз: $\Sigma a_i = \pi \cdot d_c$. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується ($< 0,46$), що дозволяє реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

витягування циліндричних деталей, металева сітка, квадратна заготовка, перфорація, коефіцієнт витягування

Постановка проблеми. В сучасному машинобудуванні для виготовлення циліндричних деталей із плоскої суцільної листової заготовки широко використовуються різноманітні способи витягування [1, 2]. В даних способах найбільша глибина деталі обмежується критичним коефіцієнтом витягування. Однак, при спробі реалізації процесу при менших значеннях коефіцієнта витягування, ніж критичний, спостерігається відрив дна, який обумовлений перевищенням напружень розтягання в критичному перерізі заготовки (між донною та бічною поверхнями) межі міцності заготовки σ_{ϕ} . В роботі звертається увага на те, що дані напруження можна значно зменшити за рахунок заміни суцільного матеріалу заготовки на не суцільний, зокрема на металеву сітку або перфоровану заготовку. Це, на думку авторів, значно зменшить зусилля штампування, а отже напруження в її критичному перерізі, що дозволить суттєво зменшити граничний коефіцієнт витягування та підвищити глибину штампування. Власне це визначає актуальність досліджень, що спрямовані на зменшення граничного коефіцієнта витягування та підвищення глибини штампування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Витягування – це процес перетворення плоскої заготовки у відкритий зверху порожній виріб [3, с. 148]. Воно здійснюється за допомогою витяжних штампів без заздалегідь обумовленої зміни (тобто зменшення) товщини стінки виробу. Витягування із порожнистої заготовки (так зване друге та подальше витягування) в даній статті не розглядається.

В роботі [3] показано, що при витягуванні циліндричної деталі із суцільної плоскої заготовки без притиску фланця (рис. 1) по краю витягнутого ковпачка утворюються гофри 3 за рахунок надлишкового матеріалу або так званих характеристичних трикутників b, b_1, b_2, \dots, b_n (рис. 2), так як для утворення порожнистого ковпачка діаметром d і висотою h достатньо мати заготовку діаметром D' без заштрихованих ділянок.



1 – матриця; 2 – пуансон; 3 – гофри на виробі
Рисунок 1 – Схема процесу витягування суцільної плоскої заготовки без притиску фланця
Джерело: [3]

1 – реальна вихідна заготовка; 2 – виріб; 3 – модель уявленої вихідної заготовки
Рисунок – 2. До пояснення процесу витягування
Джерело: [3]

Наявність надлишкових трикутників призведе до необхідності витискування та переміщення металу вгору. Таким чином, при постійному середньому діаметрі ковпачка d_c , підвищення діаметра вихідної заготовки D приводить до зростання об'єму характеристичних трикутників, об'єму гофрів та амплітуди їх елементарної ділянки, а отже до зростання зусилля витягування. При досяганні певного діаметра вихідної заготовки, зусилля опору витягування металу фланця в зазор між матрицею та пуансоном настільки зростає, що спостерігається відрив дна.

Загально відомо [4, 5], що можливість витягування циліндричної деталі за одну технологічну операцію визначається граничним коефіцієнтом витягування m_2 , який є кількісним показником даного процесу. За Романовським В. П. [6] його експериментально встановлюють за формулою (1)

$$m_2 = \frac{d_c}{D} \tag{1}$$

Оскільки чисельник формули (1) завжди менше знаменника, граничний коефіцієнт витягування m_2 менше одиниці, але більше нуля (рис. 3).



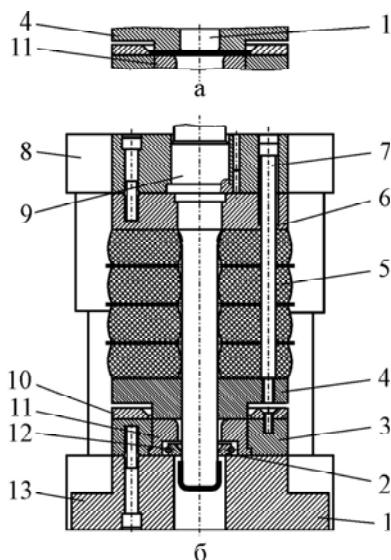
Рисунок 3 – До визначення граничного коефіцієнта витягування
Джерело: розробка авторів

Граничний коефіцієнт витягування ділить відстань між нулем та одиницею на дві зони. В зоні 1 розрахункове значення коефіцієнта витягування m_1 більше або дорівнює граничному значенню m_2 ($m_1 \geq m_2$), а процес витягування відбувається при відносно невеликому зусиллі та напруженню розтягання в критичному перерізі виробу (на межі між донною та бічною поверхнями). Тому в зоні 1 витягування можливе. В зоні 2 розрахункове значення коефіцієнта витягування m_2 менше граничного значення m_2 ($m_2 < m_2$), а процес витягування відбувається при відносно великому зусиллі та напруженню розтягання в критичному перерізі виробу. Тому в зоні 2 витягування не можливе: спостерігається відрив дна.

Однак способи витягування без притиску фланця дозволяють штампувати циліндричні деталі лише на незначну глибину, тобто коли граничний коефіцієнт витягування m_2 не зменшується нижче 0,75...0,85 [7, с. 70].

Більш прогресивними, а тому поширеними способами витягування, є такі, при яких штампування плоскої заготовки здійснюється з притиском фланця [8 – 10]. При витягування в таких умовах гофрування на фланці вихідної заготовки за рахунок притиску суттєво зменшується. Це дозволяє, в свою чергу, зменшити зусилля штампування, а отже і граничний коефіцієнт витягування [11].

Звичайно витягування з притиском фланцю здійснюється у витяжних штампах [7, 12, 13]. В процесі витягування конструкція штампа (рис. 4) забезпечує надійний притиск фланцю вихідної заготовки.



а – початок штампування; б – кінець штампування; 1 – пуансон; 2 – знімач; 3 – матрицетримач;
4 – притискач; 5 – буфер; 6 – пуансонотримач; 7 – ступінчастий гвинт; 8 – плита верхня; 9 – хвостовик;
10 – трафарет; 11 – матриця; 12 – пружина розтягання; 13 – плита нижня

Рисунок 4 – Типовий штамп для витягування циліндричної деталі з притиском фланцю
Джерело: розроблено автором [7]

В роботі [3, с.153] показано, що найбільше потоншення (10-18 %) при витягуванні с притиском фланцю заготовки спостерігається у місці переходу вертикальної стінки у дно ковпачка. У деяких випадках (при відриву дна) це потоншення досягає 30 % та більше. Як бачимо, потоншення заготовки при витягуванні с притиском фланцю обмежує технологічні можливості даного способу штампування.

Способи витягування з притиском фланця дозволяють знизити граничний коефіцієнт витягування m_2 до 0,48, а за деякими джерелами тільки до 0,6 [7, с. 74], і тим самим підвищити глибину витягування.

При спробі реалізації процесу при менших значеннях коефіцієнта витягування спостерігається відрив дна, який обумовлений перевищенням напружень розтягання в критичному перерізі заготовки (між донною та бічною поверхнями) межі міцності заготовки σ_0 .

За думкою авторів, дані напруження можна значно зменшити за рахунок заміни суцільного матеріалу заготовки на не суцільний, зокрема на металеву сітку або перфоровану заготовку. Деталі, які отримані способом витягування із не суцільного матеріалу, можуть штампуватися при значно менших коефіцієнтах витягування, о отже мати значно більшу висоту витягнутої частини. Крім того, деталі (наприклад, кожуха та оболонки), що виготовлені із не суцільної заготовки, мають значно меншу масу, порівняно з деталями, що виготовлені із суцільної заготовки.

Постановка завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення глибини витягування циліндричних деталей за одну технологічну операцію шляхом використання для заготовки не суцільного матеріалу (металевої сітки або перфорованої заготовки).

Для досягнення мети були поставлені такі завдання: розробити та дослідити спосіб витягування циліндричних деталей із металевої сітки; розробити та дослідити спосіб витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки.

Методика дослідження способу витягування циліндричних деталей із металевої сітки.

Дана методика складається із обґрунтування технологічної схеми формоутворення поверхні тіла при витягуванні із металевої сітки; методики експериментального дослідження; експериментального обладнання та оснащення; матеріалів, зразків та вимірювального інструмента.

Технологічна схема формоутворення поверхні циліндричної деталі, передбачає використання при витягуванні с притиском фланця вихідної заготовки із металевої сітки з квадратним вічком (рис. 5).

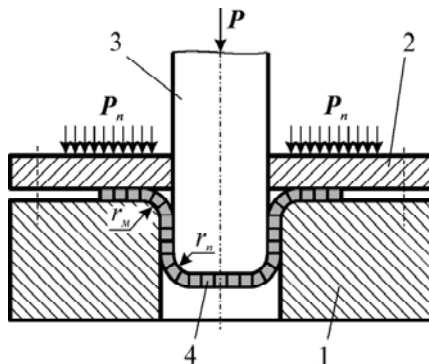
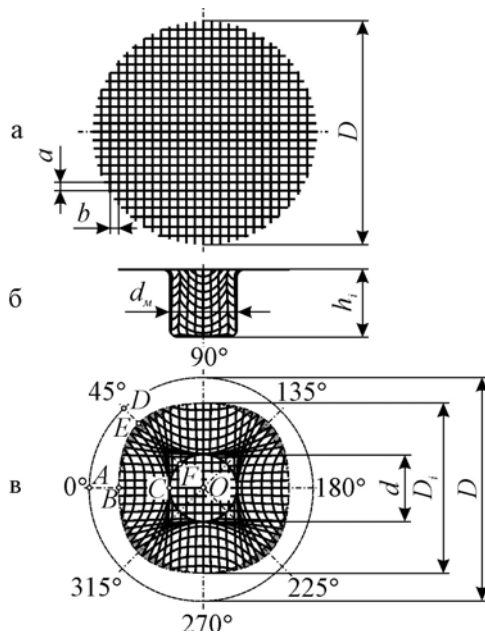


Рисунок 5 – Технологічна схема формоутворення поверхні циліндричної деталі із сітки з квадратним вічком: 1 – матриця; 2 – притискач; 3 – пуансон; 4 - деталь

Джерело: розробка авторів

Плоску сітчасту заготовку (на рис. не показано) кладуть на витяжну матрицю 1 з радіусом округлення кромки r_m , накривають притискачем 2 та притискають до матриці 1 з постійним невеликим зусилля P_{np} , яке дорівнює 0-10 Н. Далі у притискач вставляють пуансон 3 з радіусом округлення кромки r_n , навантажують його зусиллям P та здійснюють витягування виробу 4.

Плоска сітчаста заготовка (рис. 6, а) в процесі витягування деформується (рис. 6, б, в).



а – вихідна заготовка; б, в – заготовка в процесі витягування

Рисунок 6 – Моделювання картини викривлення квадратних вічок сітки при витягуванні

Джерело: розробка авторів

порівняно з напруженнями, що виникають у фланці при витягуванні суцільної заготовки, так як вони теж викликані бічною деформацією «порожнього» вічка сітки. Вони навіть менші напружень стиснення σ_{Θ} , що виникають при кутах 0° , 90° , 180° та 270° . Аналогічна картина спостерігається у фланці при кутах 135° , 225° та 315° .

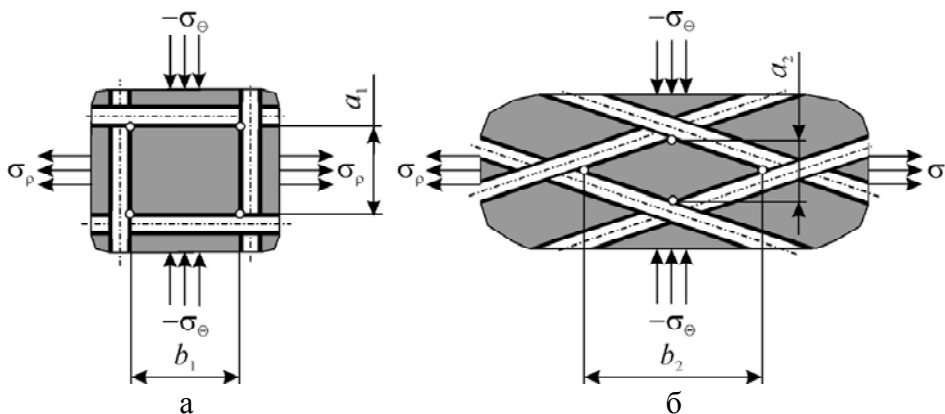


Рисунок 7 – Схема напружень розтягу σ_p у радіальному та стиснення σ_{Θ} у тангенціальному напрямках, що виникають в елементарному вічку фланці сітчастої заготовки в процесі витягування при кутах 0° (а) та 45° (б) (див. рис. 6)

Джерело: розробка авторів

Таким чином, в процесі витягування у фланці сітчастої заготовки спостерігаються наступні зміни розмірів у світлі елементарного вічка ($a \times b$):

- при кутах 0° , 90° , 180° , 270° : $a_1 < a$; $b_1 \approx b$;

Виникають напруження розтягу σ_p у радіальному та стиснення σ_{Θ} у тангенціальному напрямках, що безпосередньо зв'язані з опором деформації металу. Оскільки у фланці сітчастої заготовки при куті 0° до вічку сітки (радіальний напрямок $A-B-C$) напруження розтягу σ_p збігається за напрямком з віссю дроту сітки, дріт натягається, але не викривляється (рис. 7, а). В цей же час напруження стиснення σ_{Θ} – невеликі, порівняно з напруженнями, що виникають у фланці при витягуванні суцільної заготовки, так як вони викликані бічною деформацією «порожнього» вічка сітки. Аналогічна картина спостерігається у фланці при кутах 90° , 180° та 270° .

Інша картина спостерігається у фланці сітчастої заготовки при куті 45° до вічку сітки (радіальний напрямок $D-E-F$). Оскільки напруження розтягу σ_p не збігається за напрямком з віссю дроту, дріт викривляється та викликає суттєве деформування вічку сітки в напрямку від квадрату до подовженого в радіальному напрямку ромбу (рис. 7, б). При цьому напруження стиснення σ_{Θ} – теж невеликі,

- при кутах 45° , 135° , 225° , 315° : $a_2 \ll a$; $b_2 \gg b$.

Такі зміни впливають на відхилення від кола зовнішнього периметру заготовки з утворенням чотирьох зон «надлишкового» матеріалу (на рис. 6 зони виділено сірим кольором), що потребує застосування операції обрізування. Слід припустити, що при збільшенні діаметра вихідної заготовки та підвищенні висоти витягнутого ковпачка, зони «надлишкового» матеріалу будуть зростати, і тоді виникає питання про оптимальну форму вихідної сітчастої заготовки. Особливий практичний інтерес має процес витягування круглого ковпачка із квадратної заготовки, який потребує подальшого вивчення.

Наведена технологічна схема формоутворення поверхні тіла при витягуванні деталей з притиском фланцю із плоскої сітчастої заготовки суттєво зменшує зусилля штампування, так як в ній відсутня необхідність витискування металу із надлишкових трикутників, дане зусилля замінено на значне менше, що проявляється у формі «гнуття» та «ковзання» дротів сітки. Це створює передумови для зменшення граничного коефіцієнту витягування і підвищення глибини витягування за одну технологічну операцію.

Для порівнювального аналізу зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачка середнім діаметром 29 мм методика передбачала виготовлення двох заготовок із сітки. Перша заготовка була кругла та мала діаметр 90 мм, а друга була квадратна з довжиною діагоналі теж 90 мм. Таким чином, квадратна заготовка вписувалася в круг 90 мм. Крім того, дотримувалася додаткова умова: сторони квадратної заготовки паралельні діагоналям вічка сітки, тобто квадратна заготовка була повернута відносно квадратного вічка сітки на кут, що дорівнює 45° . Витягування здійснювали на експериментальному штампі послідовно з кроком зміни висоти ковпачка h 10 мм. Після кожного витягування заготовку виймали зі штампа, клали на білий папір та фотографували фланець.

Методика визначення граничного коефіцієнта витягування для сітчастої заготовки передбачала наступну послідовність виконання експериментального дослідження:

- для можливості подальшого порівняння, приймається за орієнтир вихідна заготовка діаметром $D = 60$ мм за як така, із якої гарантовано (без відриву дна) витягується ковпачок середнім діаметром $d_c = 29$ мм із листової сталі 08. Експериментально встановлено, що при використанні заготовки діаметром $D = 65$ мм дно ковпачка із листової сталі завжди відривається. Можна вважати, що граничний коефіцієнт витягування для даних умов $m_c = 29/60 = 0,48$;

- із металевої сітки простого переплетення (розмір сторони вічку у світлі 2,5 та діаметром дроту 0,5) вирізали заготовки у формі диску діаметром $D = 55, 60, 65$ і т. д. мм, тобто для кожного наступного експерименту діаметр заготовки збільшували на 5 мм;

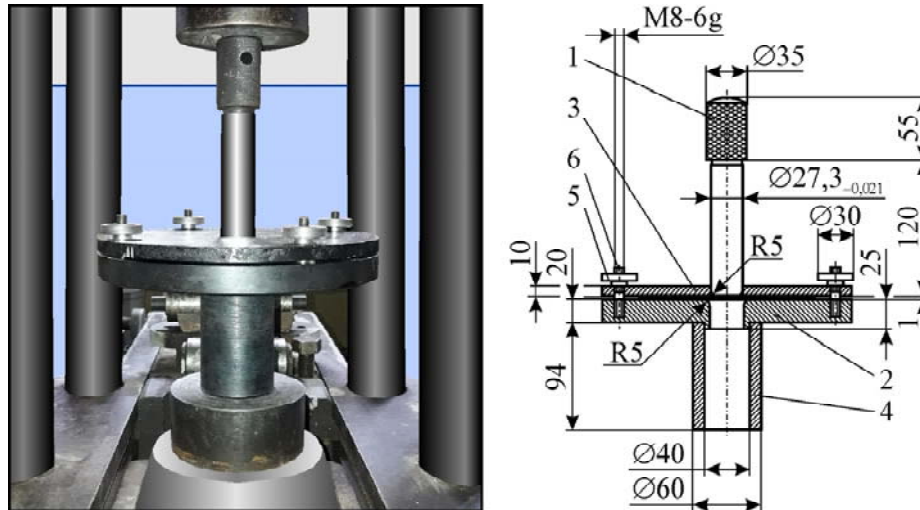
- послідовно із кожної заготовки витягували ковпачки, вимірювали їх розміри, розраховували коефіцієнти витягування та заносили отримані дані в таблицю. Експеримент продовжували до моменту відриву дна. За граничний коефіцієнт витягування приймали такий коефіцієнт, який відповідає ковпачку без відриву дна, що був отриманий із найбільшого діаметру D вихідної заготовки;

- виконували порівнювальний аналіз граничних коефіцієнтів витягування ковпачків із листової та сітчастої заготовок.

Для експериментального дослідження впливу форми вихідної сітчастої заготовки на зусилля витягування здійснювали витягування циліндричних (діаметром

D) та вписаних в них квадратних (розміром D) заготовок в діапазоні зміни D від 50 до 125 мм.

Витягування заготовок із різних матеріалів здійснювали з використанням універсальної випробувальної машини УИП-50, яка дозволяє реєструвати зусилля в процесі деформації. В якості інструмента використовувався експериментальний штамп (рис. 8). Він складається з наступних основних деталей: витяжного пуансона 1; матриці 2, яка дозволяє встановлювати вихідні заготовки діаметром D до 170 мм; притискача 3 для запобігання гофрутворенню на фланці заготовки; втулки-підставки 4 для забезпечення виходу пуансона з відштампованим зразком; чотирьох спеціальних гайок 5; чотирьох шпильок 6.



а

б

Рисунок 8 – Експериментальний витяжний штамп, що встановлений на універсальну випробувальну машину УИП-50 (а) та його креслення (б)

Джерело: розробка авторів

В початковому положенні експериментальний штамп знаходиться у частково розібраному стані. На втулку-підставку 4 встановлюють матрицю 2 з попередньо вкрученими шпильками 6. Далі змащують вихідну заготовку із не суцільного матеріалу та встановлюють на дзеркало матриці 2 симетрично відносно її осей. Заготовку накривають притискачем 3 та легко фіксують його нижнє положення спеціальними гайками 5. В центральний отвір притискача вставляють витяжний пуансон 1. У такому вигляді встановлюють штамп на універсальну випробувальну машину УИП-50. Витягування зразка здійснюють з записом зусилля штампування. Після штампування знімають зразок, вимірюють його та фіксують результати виміру в таблиці.

Експериментальні дослідження способу витягування деталей з притиском фланцю із плоскої сітчастої заготовки здійснювали з використанням в якості матеріалу сітки напівтомпакової 2,5 ГОСТ 6613-73 [14, с. 218], товщиною 1 мм. Аналогічні сітки використовують для виготовлення мікрофонів [15]. Зразки вирізали круглої та квадратної форми. Розміри зразків вказані нижче у відповідних розділах статті.

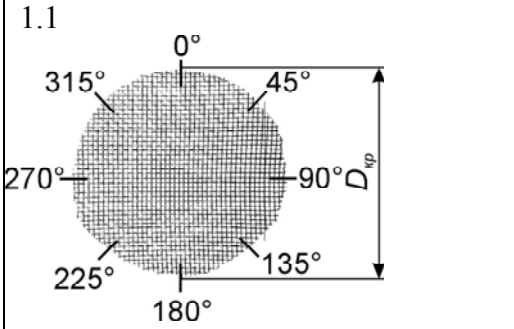
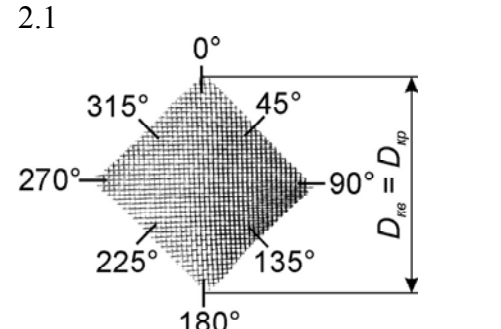
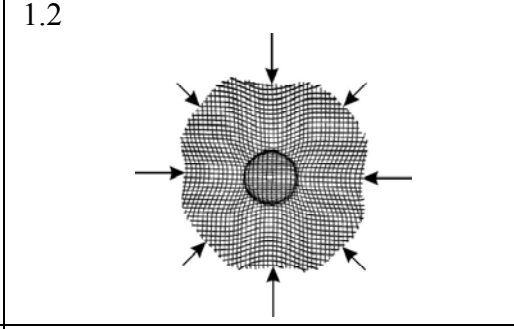
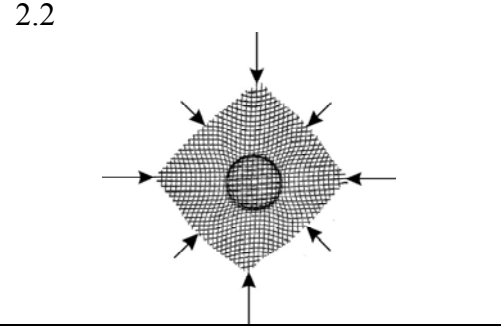
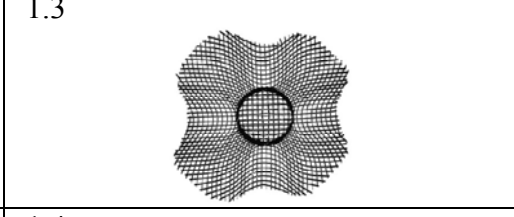
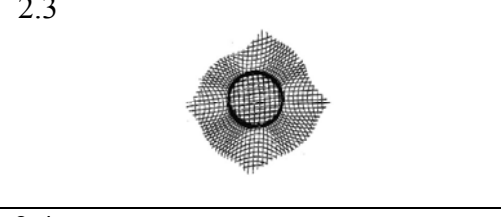
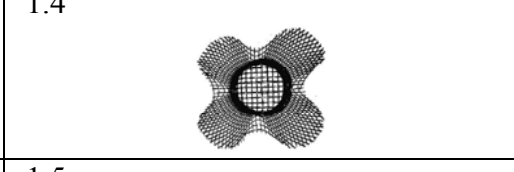
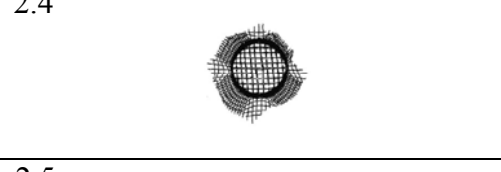
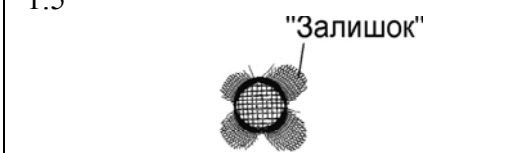

Для вимірювання лінійних розмірів зразків до витягування та після витягування застосовували штангенциркуль типу ШЦ1 з ціною поділки 0,1 мм та мікрометр типу МК з ціною поділки 0,01 мм.

Методика дослідження способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки. Дана методика передбачала пояснення фізичної сутності

нового способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки, що пропонується, шляхом порівняння його з відомим способом їх витягування із суцільної заготовки за результатами експериментального випробування.

Результати розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із металевої сітки. Результати порівнювального аналізу зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачка зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Морфологія зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачків із круглої та квадратної сітчастих вихідних заготовок

Висота ковпачка h , мм	Фото форми фланцю	
	Кругла заготовка	Квадратна заготовка
0 (вихідна заготовка)	1.1 	2.1 
10	1.2 	2.2 
20	1.3 	2.3 
30	1.4 	2.4 
40	1.5 	2.5 

Джерело: розробка авторів

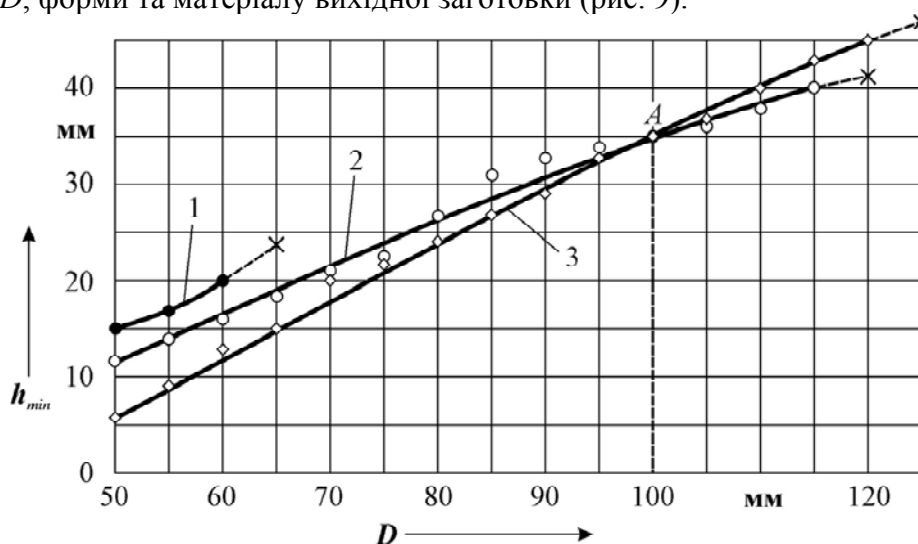
Результати визначення граничного коефіцієнта витягування для сітчастої заготовки наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експериментально-аналітичного визначення граничних коефіцієнтів витягування циліндричних ковпачків діаметром $d_c = 29$ мм із сітчастої заготовки

Діаметр (розмір) вихідної заготовки D , мм	Коефіцієнт витягування $m = d_c / D$	Висота витягнутого ковпачка h_{min} , мм		
		Кругла вихідна заготовка із листової сталі 08	Кругла вихідна заготовка із металевої сітки	Квадратна вихідна заготовка із металевої сітки
50	0,580	15	12	6
55	0,527	17	14	9
60	0,483	20	16	13
65	0,446	Обрив дна	18	15
70	0,414	-	21	20
75	0,387	-	23	22
80	0,362	-	27	24
85	0,341	-	31	27
90	0,322	-	33	29
95	0,305	-	34	33
100	0,290	-	35	35
105	0,276	-	36	37
110	0,264	-	38	40
115	0,252	-	40	43
120	0,242	-	Обрив дна	45
125	0,232	-	-	Обрив дна

Джерело: розроблено авторами

Побудована графічна залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від діаметру (розміру) D , форми та матеріалу вихідної заготовки (рис. 9).

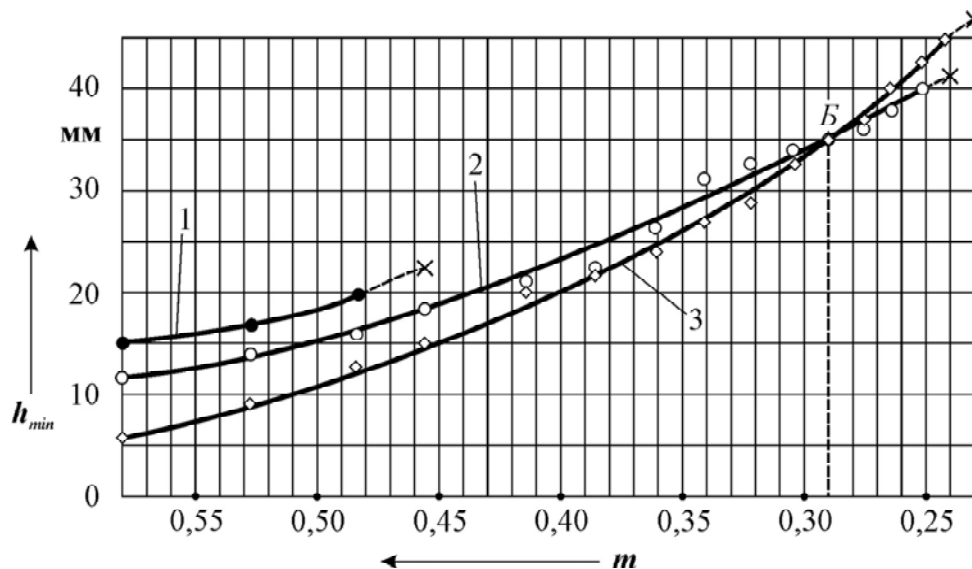


1 – кругла заготовка із листової сталі 08; 2 – кругла заготовка із сітки;
3 – квадратна заготовка із сітки; x - обрив дна

Рисунок 9 – Залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від діаметру (розміру) D , форми та матеріалу вихідної заготовки

Джерело: розробка авторів

Побудована графічна залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від коефіцієнта витягування m , форми та матеріалу вихідної заготовки (рис. 10).



1 – кругла заготовка із листової сталі 08; 2 – кругла заготовка із сітки;
3 – квадратна заготовка із сітки; × - обрив дна

Рисунок 10 – Залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від коефіцієнта витягування m , форми та матеріалу вихідної заготовки

Джерело: розробка авторів



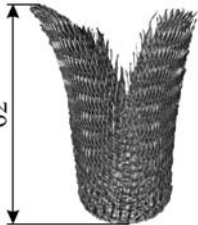
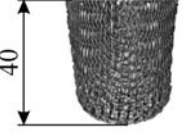
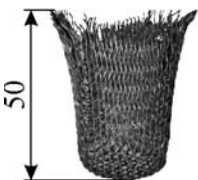
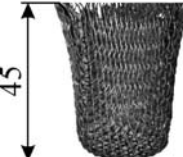
Виконано порівнювальний аналіз процесу та граничних коефіцієнтів витягування циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок (табл. 3), та порівнювальний аналіз циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок при граничних значеннях коефіцієнтів витягування m_c (табл. 4).

Таблиця 3 – Порівнювальний аналіз процесу та граничних коефіцієнтів витягування циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок

Вихідна заготовка		Граничний коефіцієнт витягування m_c		Площа вихідної заготовки при $h_{min} = 20$ мм, F , мм ²
		Реальний	Відносний	
Матеріал	Форма			
Листова сталь 08	Кругла	0,483	1	При $D = 60$ мм: 2826
Металева сітка	Кругла	0,252	0,52	При $D = 67$ мм: 3524
Металева сітка	Квадратна	0,242	0,50	При $D = 73$ мм: 2664

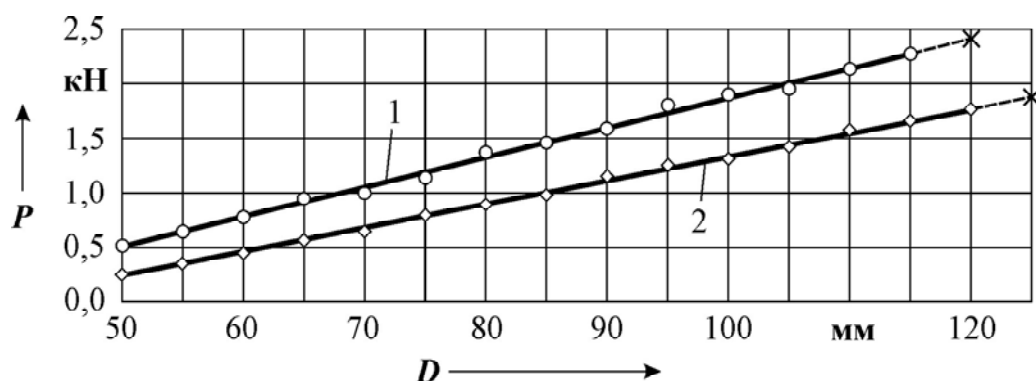
Джерело: розробка авторів

Таблиця 4 – Порівнювальний аналіз циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок при граничних значеннях коефіцієнтів витягування m_2

Вихідна заготовка		Фото ковпачка при $m = m_2$	
Матеріал	Форма	До обрізування	Після обрізування
Листова сталь 08	Кругла	1.1 	1.2 
Металева сітка	Кругла	2.1 	2.2 
Металева сітка	Квадратна	3.1 	3.2 

Джерело: розробка авторів

Результати експериментального дослідження впливу форми вихідної сітчастої заготовки на зусилля витягування наведено на рис. 11.



1 – кругла заготовка; 2 – квадратна заготовка

Рисунок 11 – Залежність зусилля витягування P циліндричного ковпачка із сітки від розміру (діаметру) D та форми вихідної заготовки

Джерело: розробка авторів

Результати порівнювального аналізу наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Порівнювальний аналіз впливу площі фланця круглої та квадратної сітчастої вихідної заготовки в плані на зусилля витягування

Форма вихідної заготовки	Заготовка розміром $D = 50$ мм				Заготовка розміром $D = 115$ мм			
	Площа фланцю ($F_{D=50} - F_{d=29}$)		Зусилля витягування P		Площа фланцю ($F_{D=115} - F_{d=29}$)		Зусилля витягування P	
	мм ²	%	кН	%	мм ²	%	кН	%
Кругла	1302	100	0,53	100	9721	100	2,26	100
Квадратна	590	54,7	0,26	51,3	5952	38,8	1,65	38,2

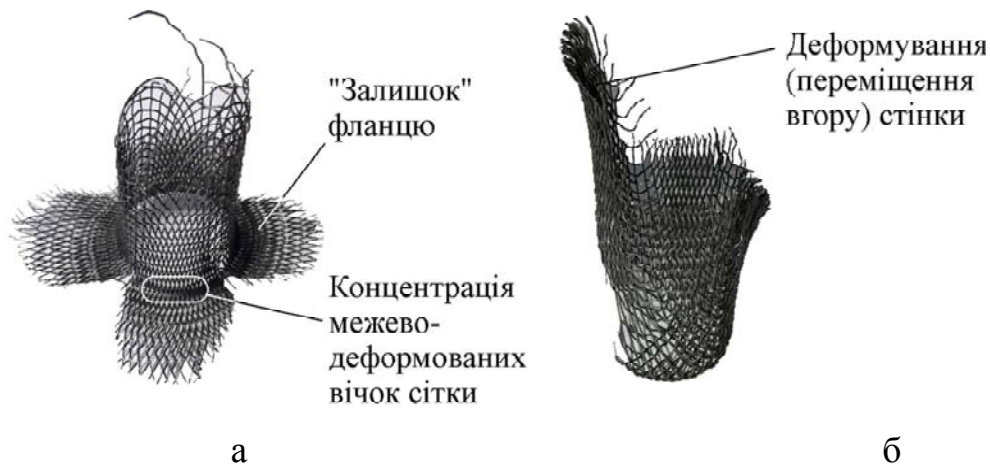
Джерело: розробка авторів

Результати експериментального дослідження впливу коефіцієнта витягування m на кількість дротів на лінії обрізування ковпачка із сітчастої круглої та квадратної вихідної заготовки наведено в таблиці 6, а характер пошкоджень ковпачків – на рис. 12.

Таблиця 6 – Результати дослідження впливу коефіцієнта витягування на кількість дротів на лінії обрізування ковпачка із сітчастої вихідної заготовки

Коефіцієнт витягування m	Розмір (діаметр) вихідної заготовки D , мм	Кількість дротів на лінії обрізування ковпачка, шт.	
		Кругла заготовка	Квадратна заготовка
0,446	65	94	78
0,252	115	160	132

Джерело: розробка авторів



а – обрив дна при витягуванні із круглої сітчастої заготовки діаметром $D = 120$ мм;
б – обрив дна з подальшим деформуванням стінки при витягуванні із квадратної заготовки розміром $D = 125$ мм

Рисунок 12 – Характер пошкодження ковпачків при коефіцієнті витягування менше граничного
Джерело: розробка авторів

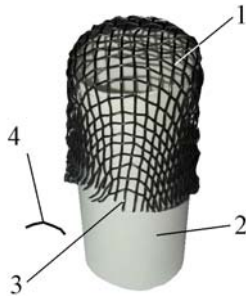
Результати аналізу якості витягування деталей із сітчастої заготовки представлено рис. 13.

Результатом виконаних вище експериментальних досліджень є пропонування нового способу витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком [16].

Результати розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки. Результатом розробки та дослідження є запропонований новий спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки [17], що спрямований на створення таких умов витягування, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується ($< 0,46$). Це дозволить реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

Фізична сутність даного способу витягування витікає із розуміння виконання наступних умов:

- **пункт 1.** Заготовку попередньо перфорують (рис. 14, 15);



1 – ковпачок із квадратної сітчастої вихідної заготовки;
2 – оправлення із паперу;
3 – місце, з якого випав короткий дрiт;
4 – короткий дрiт, що випав
Рисунок 13 – Ковпачок з дротом, що випав

Джерело: розробка авторів

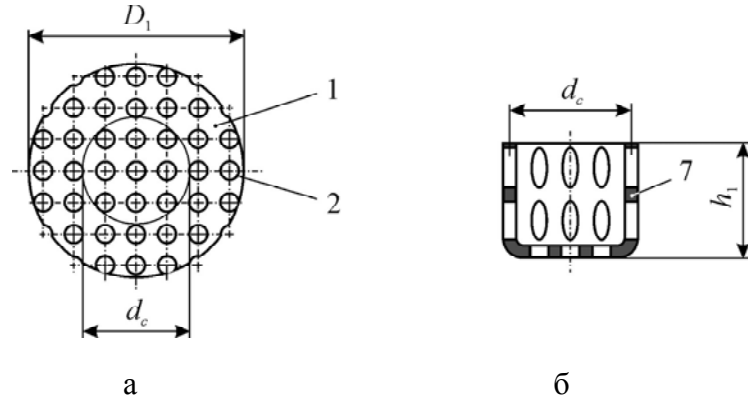
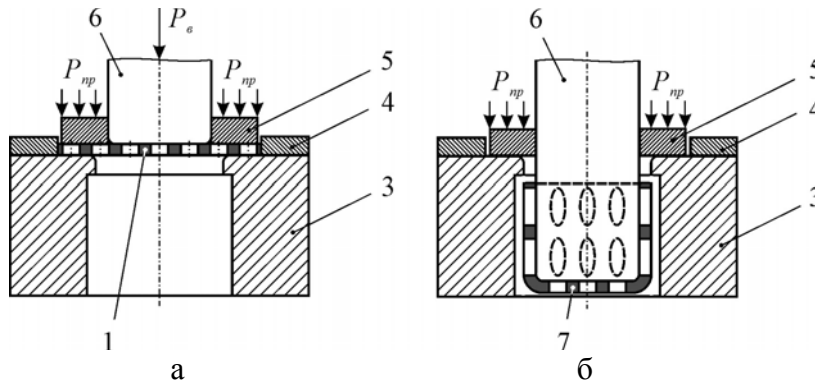


Рисунок 14 – Заготовка (а) та деталь (б) після витягування за пунктом 1

Джерело: розробка авторів



а – початкова фаза; б – кінцева фаза

Рисунок 15 – Схема роботи штампа для витягування деталі за пунктом 1

Джерело: розробка авторів

- **пункт 2.** Перфорацію заготовки виконують тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі (рис. 16);

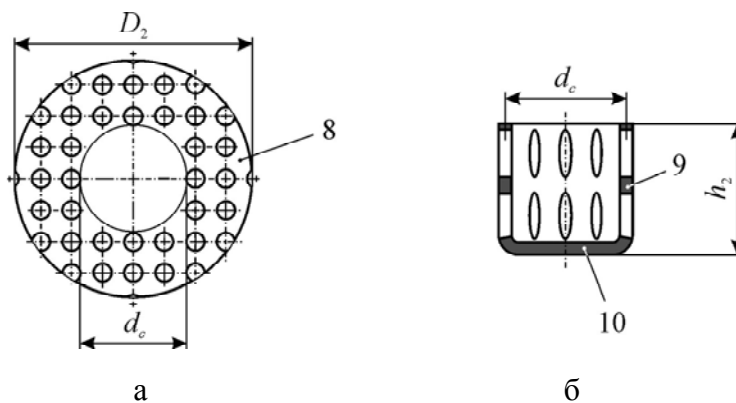


Рисунок 16 – Заготовка (а) та деталь (б) після витягування за пунктом 2

Джерело: розробка авторів

- пункт 3. Перфорацію заготовки виконують так, щоб сума Σ усіх перемичок за шириною a_i на кожному концентричному колі розташування отворів перфорації дорівнювала довжини кола за середнім діаметром d_c отриманої циліндричної деталі (рис. 17), тобто є справедливим вираз:

$$\Sigma a_i = \pi \cdot d_c .$$

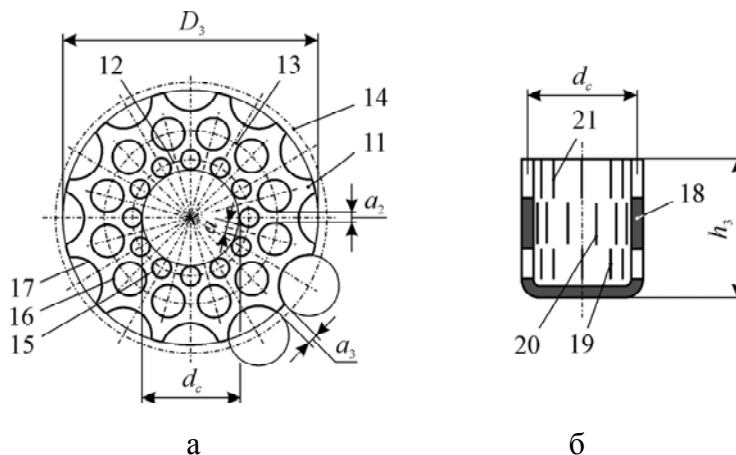


Рисунок 17 – Заготовка (а) та деталь (б) після витягування за пунктом 3

Джерело: розробка авторів

Результати випробування нового способу витягування наведені на рис. 18, в таблиці 7 та на рис. 19.

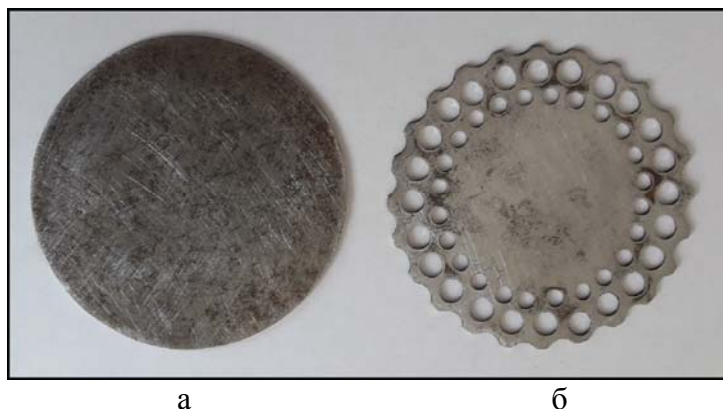
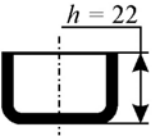
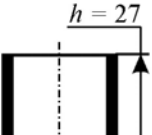
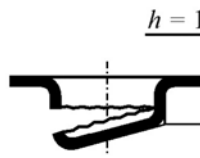
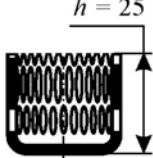


Рисунок 18 – Приклад суцільної (а) та не суцільної (б) заготовки

Джерело: розробка авторів

Таблиця 7 – Результати випробування нового способу витягування

Матеріал заготовки	Діаметр заготовки, D , мм	Діаметр ковпачка за середньою лінією, d_c , мм	Коефіцієнт витягування, m	Ескіз витягнутого ковпачка	
				із суцільної заготовки	із не суцільної заготовки
Сталь 08	55	29	0,52		—
	60		0,48		—
	65		0,44		



а

б

Рисунок 19 – Зразки, що отримані в рівних умовах при коефіцієнті витягування $m = 0,44$ із суцільної (а) та не суцільної (б) заготовок*Джерело: розробка авторів*

Обговорення результатів розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із металеві сітки. Як бачимо (табл. 1), в процесі витягування циліндричного ковпачка із круглої заготовки (фрагмент 1.1) спостерігається інтенсивне

симетричне осьове втягування у матрицю сітки у напрямках, що співпадають з напрямками дротів в сітці (кути 0° , 90° , 180° , 270°). В той же час у напрямках, що відповідають кутам 45° , 135° , 225° , 315° , сітка одночасно втягується в матрицю та деформується (кожне вічко сітки в напрямку втягування в матрицю подовжується). Тому інтенсивність втягування периферії заготовки в матрицю зменшується (фрагменти 1.2 – 1.4). В наслідок даного явища круглий початковий контур вихідної заготовки поступово викривляється і на фланці утворюється «залишок» (фрагмент 1.5), який не використовується і підлягає обрізуванню. В процесі витягування циліндричного ковпачка із квадратної заготовки (фрагмент 2.1) також спостерігається інтенсивне симетричне осьове втягування у матрицю сітки у напрямках, що співпадають з напрямками дротів в сітці (кути 0° , 90° , 180° , 270°). В той же час у напрямках, що відповідають кутам 45° , 135° , 225° , 315° , сітка також одночасно втягується в матрицю та деформується (кожне вічко сітки в напрямку втягування в матрицю подовжується). Тому інтенсивність втягування периферії заготовки в матрицю зменшується (фрагменти 2.2 – 2.4). В наслідок даного явища квадратний початковий контур вихідної заготовки поступово перетворюється у круглий, а «залишок» на фланці практично не утворюється (фрагмент 2.5).

Таким чином, витягування із квадратної сітчастої вихідної заготовки дозволяє суттєво зменшити собівартість штампування деталей за рахунок зменшення площі вихідної заготовки.

Із рис. 9 виходить, що із підвищенням діаметру (розміру) вихідної заготовки D мінімальна висота ковпачка h_{min} зростає, але до певної межі. Дана межа визначається граничним значенням коефіцієнта витягування (рис. 10), який найменший для квадратної заготовки із сітки (див. табл. 3, значення $m_e = 0,252$). Так, для круглої вихідної заготовки із листової сталі 08 мінімальна висота ковпачка $h_{min} = 20$ мм, для круглої заготовки із сітки – 40 мм, а для квадратної заготовки із сітки – 45 мм (табл. 4). Як бачимо, найкращі показники за цим фактором спостерігаються при витягуванні із квадратної сітчастої заготовки.

Крім того, із таблиці 3 видно, що для отримання ковпачка мінімальної висотою 20 мм, доцільно використати квадратну сітчасту заготовку як таку, яка володіє найменшою площею: площа квадратної сітчастої вихідної заготовки на 5,7 % менша площі круглої вихідної заготовки із листової сталі 08 та на 24,4 % менша площі круглої вихідної заготовки із сітки. Використання квадратної сітчастої вихідної заготовки дозволяє суттєво зменшити собівартість витягнутого із неї виробу.

Із залежності, що представлена на рис. 11 виходить наступне: із підвищенням розміру (діаметру) D вихідної заготовки зусилля витягування P лінійно збільшується і для круглої, і для квадратної заготовки. Однак, інтенсивність збільшення зусилля витягування із квадратної заготовки менша. Для пояснення цього явища порівняємо відсоток зменшення зусилля витягування квадратної заготовки по відношенню до круглої з відсотком зменшення площі фланця квадратної заготовки по відношенню до круглої для діаметрально протилежних точок на графіку: для заготовок розміром $D = 50$ мм та $D = 115$ мм (див. табл. 5). Як бачимо, при витягуванні ковпачка із вихідної заготовки розміром $D = 50$ мм, зменшення площі фланця квадратної заготовки до 54,7 % від площі круглої заготовки приводить до практично такому ж зменшенню зусилля витягування (до 51,3 % від зусилля витягування круглої заготовки). Аналогічна ситуація відбувається і при витягуванні ковпачка із вихідної заготовки розміром $D = 115$ мм: зменшення площі фланця квадратної заготовки до 38,8 % від площі круглої заготовки приводить до такому ж зменшенню зусилля витягування (до 38,2 % від зусилля витягування круглої заготовки). Отже, можна стверджувати, що зусилля

витягування P циліндричного ковпачка із сітки пропорційно площі фланцю вихідної заготовки.

Слід відмітити, що фізичний механізм витягування циліндричних ковпачків із сітчастої вихідної заготовки принципово відрізняється від фізичного механізму їх витягування із листової (суцільної) вихідної заготовки. В останньому випадку за Зубцовим М. Ю. [1] процес витягування супроводжується пластичним деформуванням заготовки у фланці для витискування надлишкових трикутників із фланця в циліндричну частину. В той же час при витягуванні циліндричних ковпачків із сітчастої вихідної заготовки таких надлишкових трикутників немає. Матеріал сітки лише втягується в матрицю, а плоска форма фланцю вихідної заготовки перетворюється в циліндричну за рахунок деформації вічок сітки. Таким чином, дроти стрічки, що співпадають та наближені до осей матриці в плані, в процесі витягування ковпачка випробують такі ж деформації, як при гнутті. Більш складну деформацію випробують дроти стрічки, які віддалені від осей матриці на відстань більшу її радіуса. Вони випробують одночасно складне гнуття (гнуття у двох площинах). При цьому периферійна частина вічок сітки безперервно деформується: витягується в бік від квадрату до ромбу. Із зменшенням коефіцієнта витягування (тобто при підвищенні діаметра вихідної заготовки) кількість деформованих «ромбів» у вхідному перерізі матриці, а отже кількість дротів сітки, зростає. Останнє підтверджується результатами дослідження кількості дротів сітки на лінії обрізування ковпачка при великому ($m = 0,446$; $D = 65$ мм) та малому ($m = 0,252$; $D = 115$ мм) коефіцієнті витягування для круглої та квадратної сітчастої вихідної заготовки (див. табл. 6). Як бачимо, і для круглої, і для квадратної сітчастої заготовки із зменшенням коефіцієнта витягування, кількість дротів сітки на лінії обрізування ковпачка за висотою h_{min} зростає, але дана кількість на 17% менша для квадратної заготовки. Саме тому, граничний коефіцієнт витягування для квадратної вихідної заготовки завжди менший коефіцієнта витягування для круглої вихідної заготовки.

При граничному значенні коефіцієнта витягування кількість дротів сітки на вхідному перерізі матриці збільшується настільки, що подальше витягування «ромбів» в напрямку штампування потребує значного збільшення зусилля. По суті, настає момент переходу пластичного гнуття вічок сітки у холодне об'ємне розтягання її складових дротів. Тому, при подальшому зменшенні коефіцієнта витягування нижче граничного значення, найбільш навантажені тертям дроти сітки починають розриватися (див. рис. 12).

Особливістю витягування деталей із сітчастої заготовки є те, що вічка сітки на різних за геометрією її поверхнях деформуються по різному.

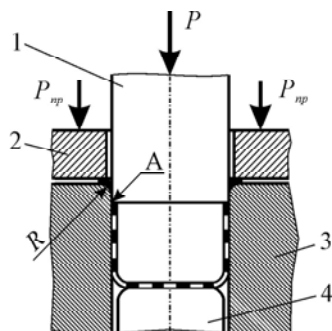
Так, найменш викривляється вічка на торцевій поверхні (дні) ковпачка. Цю властивість використовують, коли потрібно виготовити деталь з не викривленими вічками. Звичайно такі деталі являють собою неглибокі ковпачки, що доцільно штампувати із круглої сітчастої вихідної заготовки з відносно великим коефіцієнтом витягування m , який змінюється у межах від 0,6 до 0,4 (рис. 10). Донна поверхня таких деталей може бути плоскою або сферичною.

Викривлення вічок сітки на циліндричній поверхні збільшується за напрямком від дна ковпачка до його торця. Воно супроводжується деформацією у напрямку зменшення горизонтальної та збільшення вертикальної діагоналей вічка. На циліндричній поверхні ковпачка утворюється характерний малюнок, який можна використати для декоративного оздоблення деталей із сітки (наприклад, для виготовлення кожухів мікрофонів). Оскільки такі деталі являють собою глибокі

ковпачки, їх доцільно виготовляти із квадратної сітчастої вихідної заготовки з коефіцієнтом витягування m , що наближається до граничного m_2 (рис. 10).

Слід відмітити, що короткі дроти стрічки на циліндричній поверхні ковпачка, які V-подібно вигнуті поблизу лінії обрізування, мають недостатній зв'язок з іншими дротами, а тому можуть випадати (рис. 13).

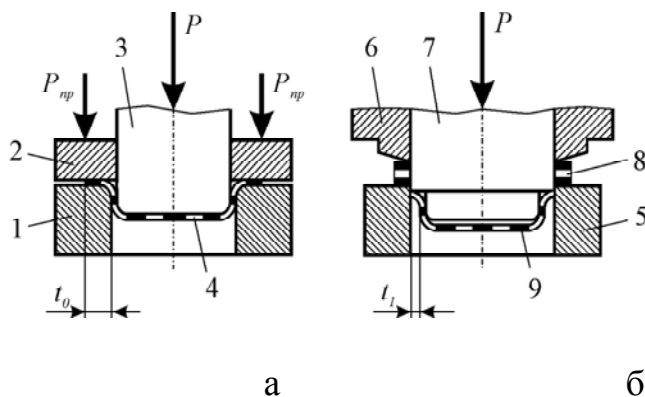
Для забезпечення якісного та точного ковпачка рекомендується його витягувати із вихідної заготовки, що має припуск на подальше обрізування. Величина припуску повинна бути не менше 2 – 3 розмірів в світлі вічка сітки.



- 1 – ступінчастий пуансон;
2 – притискач; 3 – матриця;
4 – притискач-виштовхувач;
A – гостра кромка

Рисунок 20 – Схема робочої зони штампа для одночасного витягування та обрізування ковпачка із сітчастої заготовки
Джерело: розробка авторів

циліндричної частини деталі суттєво зменшується, що дозволяє на 35-40% знизити собівартість штампування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком.



- а – штамп для витягування; б – штамп для обрізування; 1 – витяжна матриця; 2 – притискач;
3 – витяжний пуансон; 4 – заготовка після витягування; 5 – обрізна матриця; 6 – ніж для розрізування відходів; 7 – пуансон для обрізування; 8 – відходи від обрізування; 9 – деталь після обрізування

Рисунок 21 – Схеми штамів для виготовлення циліндричного ковпачка із невеликим фланцем із сітчастої вихідної заготовки:

Джерело: розробка авторів

Обговорення результатів розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки. Із рис. 14, 15 бачимо, що реалізацію нового способу витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки [17] за **пунктом 1** здійснюють із перфорованої заготовки. Завдяки наявності на заготовці отворів перфорації 2 зусилля витягування зменшується, а це дозволяє підвищити глибину витягування деталей за одну технологічну операцію.

Якщо за **пунктом 2** (див. рис. 16) перфорацію заготовки 8 виконати тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі 9, то дно 10 деталі 9 посилюється. Тому є можливим підвищити діаметр вихідної заготовки 8 з D_1 до D_2 і тим самим ще зменшити коефіцієнт витягування. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити глибину витягування деталі 9 з h_1 (рис. 14) до h_2 .

Якщо виконується умова за **пунктом 3** (див. рис. 17, 18), то зусилля витягування деталі 18 ще більше зменшується. Тому є можливим ще підвищити діаметр вихідної заготовки 11 з D_2 (рис. 16) до D_3 і тим самим ще зменшити коефіцієнт витягування. Спосіб витягування за **пунктом 3** дозволяє отримати найбільшу глибину витягування h_3 деталі 18 так, що стає справедливим співвідношення: $h_1 < h_2 < h_3$. Крім того, точне виконання на заготовці 11 перемичок a_1, a_2, a_3 та розрахованих за вказаним принципом залежних від них діаметрів отворів 15, 16, 17 дозволяють отримати деталь 18 із закритими, або майже закритими отворами перфорації 19, 20, 21.

Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується (див. табл. 7, рис. 19), що дозволяє реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

Висновки. Внаслідок вивчення морфології зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачка із круглої та квадратної сітчастої вихідної заготовки виявлено явище утворення на фланці круглої заготовки чотирьох симетрично розташованих «залишків» сітки, які не використовуються і підлягають обрізуванню. В той же час показано, що квадратний контур вихідної заготовки поступово перетворюється у круглий, а «залишок» на фланці практично не утворюється. Дане явище пов'язано з інтенсивним деформуванням вічок сітки при витягуванні в діагональному напрямку. Показано, що із підвищенням діаметру (розміру) вихідної заготовки D мінімальна висота ковпачка h_{min} зростає, але до певної межі. Дана межа визначається граничним значенням коефіцієнта витягування, який найменший для квадратної заготовки із сітки ($m_c = 0,252$). Доведено, що при однаковій висоті витягування, площа квадратної сітчастої вихідної заготовки на 5,7 % менша площі круглої вихідної заготовки із листової сталі 08 та на 24,4 % менша площі круглої вихідної заготовки із сітки. Використання квадратної сітчастої вихідної заготовки дозволяє суттєво зменшити собівартість витягнутого із неї виробу. Експериментально доведено, що зусилля витягування циліндричного ковпачка із сітки пропорційно площі фланцю вихідної заготовки. За цією причиною, при рівності діаметра круглої та діагоналі квадратної вихідних заготовок, зусилля витягування із квадратної заготовки завжди менше. Встановлено, що при граничному значенні коефіцієнта витягування кількість дротів сітки на вхідному перерізі матриці збільшується настільки, що подальше витягування «ромбів» в напрямку штампування потребує значного збільшення зусилля. Концентрація «ромбів» приводить до моменту переходу пластичного гнуття вічок сітки у холодне об'ємне розтягання її складових дротів. Тому, при зменшенні коефіцієнта витягування нижче граничного значення, найбільш навантажені тертям дроти сітки починають розриватися. Встановлено, що вічка сітки на різних за геометрією її поверхнях деформуються по різному. Дані пропозиції щодо раціональної розробки

технологічних процесів витягування деталей із сітки з урахуванням цього фактору. За результатами виконаних досліджень запропоновано новий спосіб витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком, який відрізняється тим, що витягування здійснюють із квадратної заготовки, сторони якої паралельні діагоналям вічка сітки. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких нерівномірність висоти циліндричної частини деталі суттєво зменшується, що дозволяє на 35-40% знизити собівартість штампування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком.

Запропоновано та експериментально випробувано новий спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки, який відрізняється тим, що заготовку попередньо перфорують; перфорацію заготовки виконують тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі; перфорацію заготовки виконують так, щоб сума Σ усіх перемичок за шириною a_i на кожному концентричному колі розташування отворів перфорації дорівнювала довжини кола за середнім діаметром d_c отриманої циліндричної деталі, тобто є справедливим вираз: $\Sigma a_i = \pi \cdot d_c$. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується ($< 0,46$), що дозволяє реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

Список літератури

1. Ковка и штамповка. Т. 1. Листовая штамповка: справочник / под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семёнов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1985-1987. 544 с.
2. Suchy I. Handbook of Die Design, 2-nd ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
3. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: учеб. . 3-е изд. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 432 с.
4. Oluwole O. O., Anyaech C. O., Faola O. V. Effect of draw ratio and sheet thickness on earing and drawability of Al 1200 cups. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2010; 9 (5): 461 – 470. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2010.95032>.
5. Ramirez F. J., Domingo R., Packianather M. S., Sebastian M. A. Enhancing multistage deep-drawing and ironing manufacturing processes of axisymmetric components: analysis and experimentation. International Journal of Manufacturing Engineering. 2014; 2014(596128). <http://dx.doi.org/10/1155/2014/596128>
6. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 60-е изд., пере раб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
7. Боков В. М. Конструювання та виготовлення штампів. Проектування штампів: формозмінних, складної дії, для складання та автоматичного штампування: навч. посіб. . Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2010. 322 с.
8. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
9. Dong Weiping, Wang Qichao, Wayg Xiaoming, Wang Bin. Stress analysis of cylindrical parts during deep drawing based on Dynaform. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 423 (2018) 012166. doi:10.1088/1757-899X/423/1/012166
10. Ravi Kumar D. F. Formability analysis of extra-deep drawing steel. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130-131:31-41. [http://dx.doi.org/10/1016/S0924 01136 \(02\) 00789-6](http://dx.doi.org/10/1016/S0924 01136 (02) 00789-6)
11. Ehsan Karajibani 1, Ali Fazli 2, Ramin Hashemi. Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6978-5>
12. Savas V, Secgin O (2010). An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. Int J Mater Form 3(3):209-213. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0672-9>
13. M. Mahmoodi, H. Sohrabi. Using the Taguchi Method for Experimental and Numerical Investigation on Square-Cup Deep-Drawing Process for Aluminum/Steel Laminated Sheets. Mechanics of Advanced Composite Structures 4 (2017) 169-177.

14. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. 5-е изд. М.: Машиностроение, 1989. 728 с.
15. Сетка для микрофона DPA microphones DUA0710N. URL: <https://muzline.ua/dpa-microphones-dua0710n/> (дата обращения: 14.10.2020)
16. Спосіб витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком: пат. 143027 Україна: МПК В26F 1/40, В21D 22/00, u2019 12214; заявл. 24.12.2019; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13.
17. Спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки: пат. 138268 Україна: МПК В26F 1/40, В21D 22/00. u2019 04647; заявл. 02.05.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.

References

1. Matveeva, A.D. (Eds.). (1985-1987). Forging and stamping. Vol. 1. Sheet stamping. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Suchy, I. (2006). Handbook of Die Design, 2-nd ed. New York: McGraw-Hill [in English].
3. Zubcov, M. E. (1980). *Sheet stamping*. (3d ed.). L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie [in Russian].
4. Oluwole O. O., Anyaech C. O., Faola O. V. Effect of draw ratio and sheet thickness on earing and drawability of Al 1200 cups. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2010; 9 (5): 461 – 470. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2010.95032>. [in English].
5. Ramirez F. J., Domingo R., Packianather M. S., Sebastian M. A. Enhancing multistage deep-drawing and ironing manufacturing processes of axisymmetric components: analysis and experimentation. *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2014; 2014(596128). <http://dx.doi.org/10.1155/2014/596128> [in English].
6. Romanovskij, V.P. (1979). *Cold Forging Handbook*. (60th ed.). L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie [in Russian].
7. Bokov, V.M. (2010). *Konstruiuvannia ta vyhotovlennia shtampiv. Proektuvannia shtampiv: formozminnykh, skladnoi dii, dlia skladannia ta avtomatychnoho shtampuvannia: navchal'nyj posibnyk [Design and manufacture of stamps. Design of stamps: changeable, complex action, for assembly and automatic stamping]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyj tsentr TOV «Imeks-LTD» [in Ukrainian]
8. Popov, E.A. (1977). *Osnovy teorii listovoj shtampovki [Fundamentals of the theory of sheet stamping]*. M.: Mashinostroenie [in Russian].
9. Dong Weiping, Wang Qichao, Wayg Xiaoming, Wang Bin. Stress analysis of cylindrical parts during deep drawing based on Dynaform. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 423 (2018) 012166. doi:10.1088/1757-899X/423/1/012166 [in English].
10. Ravi Kumar D. F. Formability analysis of extra-deep drawing steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;130-131:31-41. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924 01136 \(02\) 00789-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924 01136 (02) 00789-6) [in English].
11. Ehsan Karajibani 1, Ali Fazli 2, Ramin Hashemi. Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6978-5> [in English].
12. Savas V, Secgin O (2010). An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. *Int J Mater Form* 3(3):209-213. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0672-9> [in English].
13. M. Mahmoodi, H. Sohrabi. Using the Taguchi Method for Experimental and Numerical Investigation on Square-Cup Deep-Drawing Process for Aluminum/Steel Laminated Sheets. *Mechanics of Advanced Composite Structures* 4 (2017) 169-177. [in English].
14. Anur'ev, V.I. (1989). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja [Handbook of the designer-machine builder]*. Vol. 1. (5th ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
15. Setka dlja mikroфона DPA microphones DUA0710N [Grid for microphone DPA microphones DUA0710N]. Retrieved from <https://muzline.ua/dpa-microphones-dua0710n/> [in Russian].
16. Sposib vytiahuvannia tsylindrychnykh detalej iz ploskoi metalevoi sitky z kvadratnym vichkom [Method of extracting cylindrical parts from flat metal mesh with square mesh]: пат. 143027 Україна: МПК В26F 1/40, В21D 22/00, u2019 12214; zaiavl. 24.12.2019; opubl. 10.07.2020, Biul. № 13 [in Ukrainian].
17. Sposib vytiahuvannia detalej z prytytskom flantsiu ploskoi lystovoi zahotovky [Method of extracting parts with flange clamp of flat sheet blank]. пат. 138268 Україна: МПК В26F 1/40, В21D 22/00. u2019 04647; zaiavl. 02.05.2019; opubl. 25.11.2019, Biul. № 22 [in Ukrainian].

Victor Bokov, Prof., PhD tech. sci., **Oleh Sisa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Pavlenko**, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Drawing Cylindrical Parts From Non-Continuous

A new method for drawing cylindrical parts from a flat metal mesh netting with square openings has been proposed, developed and investigated. According to this method, drawing is carried out from a square workpiece, whose sides are parallel to the diagonals of the netting mesh. A new method of drawing parts with flange clamping of a sheet workpiece has been proposed and experimentally tested, which differs in that the workpiece is pre-perforated; perforation of the workpiece is performed only in the flange area, whose inner diameter is equal to the average diameter d_c of the cylindrical part obtained; perforation of the workpiece is performed so that the sum Σ of all jumpers by the width a_i on each concentric circle of the location of the perforation holes is equal to the circumference at the average diameter d_c of the cylindrical part obtained, i.e. formula $\Sigma a_i = \pi \cdot d_c$ is valid. The use of the proposed method, in comparison with the known one, creates such conditions for drawing, under which the limiting drawing ratio becomes significantly lower ($< 0,46$), which makes it possible to conduct a deeper drawing of parts in one press run.

The scientific novelty of this research is as follows. Usually, when manufacturing parts such as caps or box shapes, stamping is used in several runs to avoid the phenomenon of tearing-off of the bottom. However, the use of stamping in several runs leads to a complication of the process equipment and an increase in the cost of the product, which is justified only for cases of obtaining a high-quality product and provided that the integrity of the part is intact at a considerable depth. When trying to draw parts of considerable depth, objective difficulties arise associated with breaking-off of the bottom, which are due to exceeding by the tensile stresses in the critical section of the workpiece (between the bottom and lateral surfaces) of the ultimate tensile strength σ_s of the latter. As part of the research described in this article, a way to overcome those difficulties has been proposed. It is based on the fact that when implementing the stamping process at lower values of the drawing ratio than the critical one, a metal mesh netting or perforated workpiece is used, and tearing-off of the bottom is therefore no longer observed. This method made it possible to obtain an integral shape of the part while using a significant depth of drawing due to the prior perforation of the workpiece, which significantly reduces the cost of the product. That means that the obtained scientific result in the form of a proposed kinetic description of the stamping process compared to the known one creates such drawing conditions, under which the unevenness of the height of the cylindrical portion of the part is significantly reduced, which in turn reduces by 35-40% the cost of stamping cylindrical parts from a flat metal mesh netting with square openings. This result is interesting from a theoretical point of view. As far as the practical point of view is concerned, a mechanism of transition of plastic bending of netting meshes into cold volumetric expanding of its constituent wires has been revealed, which makes it possible to determine the conditions for using the process of manufacturing parts from metal mesh netting or perforated workpieces.

Consequently, an applied aspect of using the scientific result obtained is the possibility of improving the typical technological process of stamping, where the stamping force will be significantly reduced and hence the stress in the critical section, which will make it possible to reduce significantly the limiting drawing ratio and increase the depth of stamping. This constitutes prerequisites for the transfer of the obtained technological solutions of the process of drawing from a metal mesh netting or a perforated workpiece.

drawing of cylindrical parts, metal mesh netting, square workpiece, perforation, drawing ratio

Одержано (Received) 27.07.2021

Прорецензовано (Reviewed) 08.09.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021