

DOI: 10.20535/kpissn.2023.1-4.304818

УДК 621.73.043

В. В. Піманов^{1*}, М. В. Орлюк¹, А. М. Гончар¹, С. В. Ситник¹¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: pimanov@ukr.net

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ НАПІВФАБРИКАТУ ДЛЯ ПОРОЖНИСТОЇ ДЕТАЛІ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

Проблематика. Нині актуальними питаннями у виробництві виробів з металів є економія матеріалів та продуктивність виробництва, оскільки це досить суттєво впливає на собівартість готових виробів. Особливо це пов'язано з порожнистими виробами складної геометричної форми. До таких виробів належать деталі або напівфабрикати, які мають глухі порожнини та додаткові елементи в конструкції у вигляді фланців, або змінну товщину стінки за висотою виробу. Такі деталі широко розповсюджені в машинобудуванні, авіабудуванні та у виробництві виробів спеціального призначення, зокрема у галузі виготовлення боеприпасів. Тому технологія виготовлення таких деталей повинна забезпечити масове виробництво і мати економічний ефект.

Мета. Розрахунковим шляхом за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному середовищі DEFORM визначити варіант штампування, із заготовок різного діаметра, напівфабрикату порожнистої деталі складної геометричної форми з використанням технології гарячого об'ємного штампування та проаналізувати запропонований технологічний процес отримання напівфабрикату.

Методика реалізації. Використовуючи МСЕ в програмному середовищі DEFORM проведено моделювання гарячого об'ємного штампування напівфабрикату для порожнистої деталі складної геометричної форми із заготовок різного діаметра. Таким чином обрано варіант отримання напівфабрикату із мінімальною кількістю переходів і гарантованою можливістю реалізації технологічного процесу формоутворення. Для обраного варіанта проведено аналіз силових режимів формоутворення, нормальних напружень на контактних поверхнях заготовки з інструментом та напружено-деформованого стану деформованого металу.

Результат. Запропоновано технологію виготовлення напівфабрикату для порожнистої деталі складної геометричної форми з використанням технології гарячого об'ємного штампування. Така технологія буде впроваджена у виробництві деталі «Корпус-перехідник», який використовується в конструкції міни калібром 120 мм. Розрахунковим шляхом за допомогою МСЕ в програмному середовищі DEFORM визначено варіант формоутворення напівфабрикату для деталі «Корпус-перехідник» з використанням технології гарячого об'ємного штампування та проведено аналіз технологічної операції формоутворення напівфабрикату. Визначено температурний режим процесу, технологічні зусилля, параметри напружено-деформованого стану деформованого матеріалу, розподіл нормальних напружень на деформуючому інструменті. Результати проведеного комп'ютерного моделювання дають змогу врахувати конструктивні особливості та підібрати необхідне технологічне обладнання для масового виробництва.

Висновки. Розроблено та обґрунтовано технологію для серійного виготовлення напівфабрикату гарячим об'ємним штампуванням. Така технологія дозволила підвищити коефіцієнт використання матеріалу у два рази порівняно з технологією отримання деталі механічною обробкою з сортового прокату.

Ключові слова: метод скінченних елементів, боеприпас, штампування, гаряче зворотне видавлювання, зусилля, напруження, деформації, температура, критерій руйнування, коефіцієнт використання матеріалу.

Вступ

Сучасне виробництво виробів з металів потребує впровадження нових або удосконалення

наявних технологій, які спрямовані не тільки на підвищення продуктивності виробництва, але й на ефективне використання матеріалів та прогнозовану якість виробів. Щодо ефектив-

Пропозиція для цитування цієї статті: В. В. Піманов, М. В. Орлюк, А. М. Гончар, С. В. Ситник, "Аналіз технології виготовлення напівфабрикату для порожнистої деталі складної геометричної форми з використанням технології гарячого об'ємного штампування", *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 54–61, 2023. doi: 10.20535/kpissn.2023.1-4.304818

Offer a citation for this article: V. V. Pimanov, M. V. Orliuk, A. M. Honchar, S. V. Sytnyk, "Analysis of the technology of manufacturing a semi-finished part for a hollow part of a complex geometric form using the technology of hot volume stamping", *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 54–61, 2023. doi: 10.20535/kpissn.2023.1-4.30481

ності використання матеріалів, слід особливо звернути увагу на отримання напівфабрикатів методами пластичного формоутворення. Такі технології ефективні у виготовленні напівфабрикатів для порожнистих деталей складної геометричної форми. До таких виробів належать деталі, або напівфабрикати, які мають глухі порожнини та додаткові елементи в конструкції у вигляді фланців, або змінну товщину стінки виробу. Такого класу деталі широко використовують у машинобудуванні, авіабудуванні, виробництві боєприпасів та в інших галузях.

Нині в Україні досить активно відновлюється та розвивається військово-промисловий комплекс, особливо виробництво боєприпасів [1].

Особливо з усієї лінійки боєприпасів, що використовуються, до критично необхідних належать і мінометні постріли. Одним з таких є мінометний боєприпас калібром 120 мм [2, 3]. За конструкцією він складається з комплектуючих деталей, які виготовляються з використанням різних технологічних процесів. Схематично конструкцію міни калібром 120 мм показано на рис. 1.

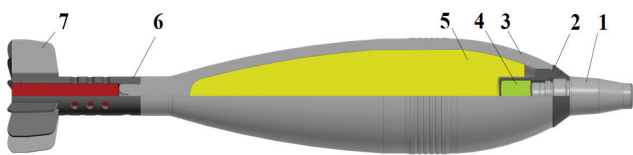


Рис. 1. Конструкція міни калібром 120 мм

Цю схему конструкції міни створено авторами статті в програмному середовищі SolidWorks. Міна складається з корпусу 3, який виготовляють з використанням технології лиття із сталі або сталюого чавуну [4]. До корпусу 3 кріпиться стабілізатор, що складається з трубки 6 та хвоста 7. Корпус 3 споряджається вибуховою речовиною 5. У корпус 3 встановлюється корпус-перехідник 2, у якому розміщується додатковий заряд 4 та підричник 1. Корпус-перехідник 2 дозволяє конструктивно розширити отвір у корпусі 3 для більш зручного його заповнення вибуховою речовиною 5.

Розроблення технології виготовлення напівфабрикату для порожнистої деталі складної геометричної форми з використанням технології гарячого об'ємного штампування

Ескіз деталі «Корпус-перехідник», який виготовляють із конструкційної вуглецевої сталі 45 підвищеної якості зображено на рис. 2.

«Корпус-перехідник» 2 технологічно виготовляють або із застосуванням ливарних технологій, або за допомогою механічної обробки сортового прокату.

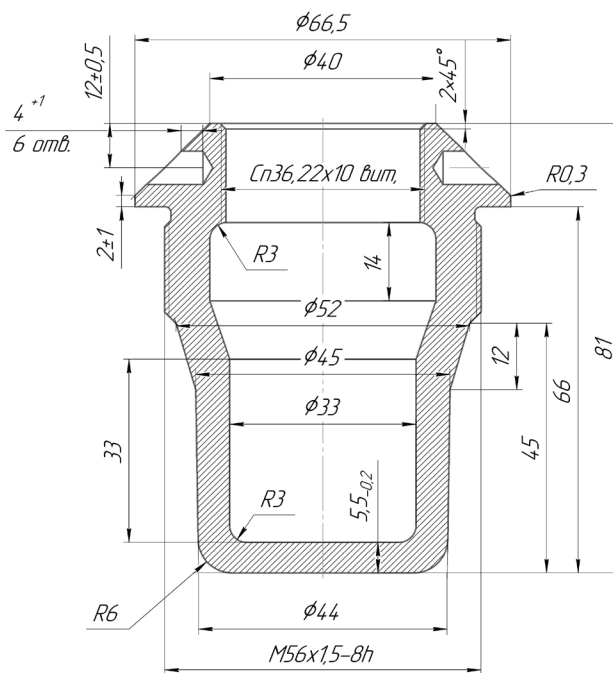


Рис. 2. Ескіз деталі «Корпус-перехідник»

Однак у процесі виготовлення напівфабрикатів методом лиття виникає великий відсоток браку [5, 6]. До того ж напівфабрикати, отримані литтям, мають низьку точність, а їх подальша механічна обробка значно ускладнюється. Так само під час виготовлення виробів за допомогою механічної обробки з суцільного прокату трапляється неефективне використання матеріалу та низька продуктивність виробництва.

Так, наприклад, під час виготовлення цього виробу (рис. 2) механічною обробкою із сортового прокату (ДСТУ 4738) із заготовки діаметром 68 мм та завдовжки 90 мм коефіцієнт використання матеріалу становитиме лише 26,5 %, що в сучасних умовах є неприпустимим.

З погляду організації серійного та масового виробництва виробів спеціального призначення доцільно під час виготовлення напівфабрикатів за можливості здійснювати до них перехід від ливарних технологій до технологій холодного або гарячого об'ємного штампування у штампах [7, 8].

Це підвищить якість та точність напівфабрикатів, а також дозволить звести до мінімуму їх наступну механічну обробку [10].

Тому для розроблення технологічного процесу виготовлення деталі «Корпус-перехідник» необхідно розробити оптимальну для масового виробництва технологію штампування напівфабрикату, яка при цьому матиме відчутний економічний ефект.

Для цього запропоновано технологію виготовлення напівфабрикату для порожнистої деталі складної геометричної форми з використанням технології гарячого об'ємного штампування для деталі «Корпус-перехідник».

Суть технології полягає у виборі варіанта конструкції штампованого напівфабрикату, який забезпечить не тільки ефективність використання матеріалу, але і дозволить реалізувати процес за мінімальну кількість технологічних переходів. Таким чином під час розроблення

технології враховується форма та розміри деталі, яку необхідно отримати, форма та розміри вихідної заготовки, спосіб отримання напівфабрикату та режими формоутворення.

Використання різних способів штампування дозволяє отримувати для нашого виробу напівфабрикати різної складності, від простих (рис. 3, а–в), для виготовлення яких є типові технології до складних (рис. 3, г), які забезпечують найвищий коефіцієнт використання матеріалу, але потребують або витратних натурних експериментів для відпрацювання багатоопераційного штампування (напівфабрикати складної форми зазвичай штампують за декілька операцій), або дослідження різних варіантів штампування за допомогою комп'ютерного моделювання.

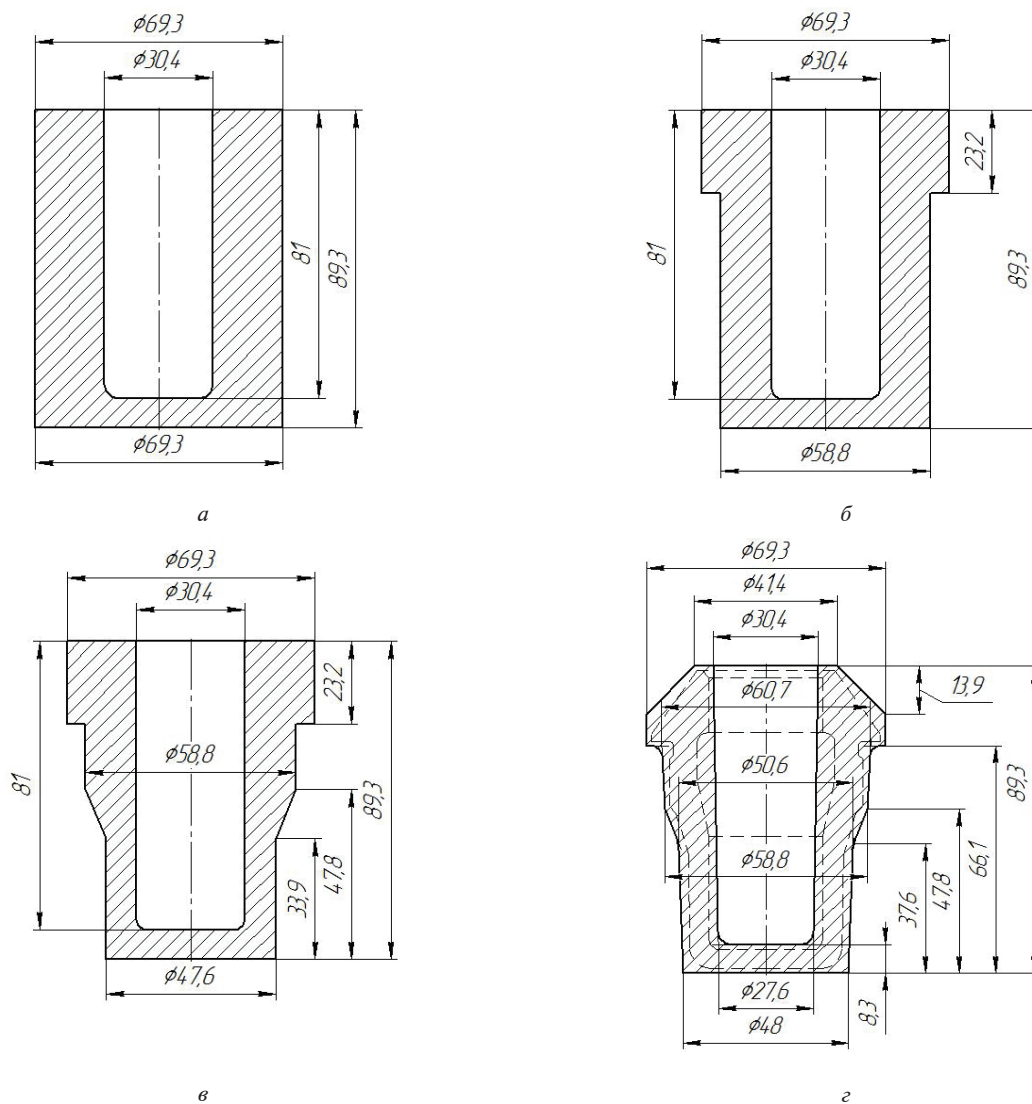


Рис. 3. Варіанти конструкцій штампованого напівфабрикату

Оскільки сталь 45 належить до матеріалів, що важко деформуються у холодному стані, то напівфабрикати з цього матеріалу зазвичай штамнуються у гарячому, рідше напівгарячому станах.

Тому в надалі під час розроблення технології отримання складного напівфабрикату (рис. 3, з) для деталі «Корпус-перехідник» використовуємо спосіб гарячого штампування. За цієї геометрії напівфабрикату (рис. 3, з) коефіцієнт використання матеріалу становитиме 53 %

Комп'ютерне моделювання процесу гарячого об'ємного штампування напівфабрикату для деталі складної геометричної форми в програмному комплексі DEFORM 2D.

Оскільки напівфабрикат (рис. 3, з) вісесиметричний, то для проведення чисельних розрахунків застосовується метод скінченних елементів (МСЕ) у програмному комплексі DEFORM-2D [9], який забезпечує достатньо високу відповідність результатів моделювання та результатів натурних експериментів за незначних витрат часу на проведення моделювання.

Під час моделювання використовуються криві зміцнення матеріалу DIN-C45[70-2000(20-1100C)], що є аналогом сталі 45.

Температурний інтервал гарячого штампування сталі 45...750–1250 °С.

Модель матеріалу – пластична. Фактор тертя за Зібелем задано з постійною величиною 0,3, коефіцієнт контактного теплообміну – 5 Н/с/мм/С (5000 Вт/(м²ЧК)), критерій руйнування Normalized C&L.

Об'єм заготовки визначений з умови сталості об'єму за допомогою програмного забезпечення SolidWorks і становить 163448,6 мм³.

Початкова температура деформуючих інструментів (пуансона та матриці) не повинна перевищувати 400 °С, швидкість переміщення пуансона має забезпечити у процесі деформування час, за який заготовка не встигне охолонути до мінімальної температури – 750 °С (відповідно до температурного інтервалу штампування).

Основна задача моделювання – пошук варіанта штампування напівфабрикату з мінімальною кількістю формозмінних операцій.

Варіанти штампування напівфабрикату та результати моделювання формоутворення напівфабрикату для деталі «Корпус-перехідник»

Під час пошуку оптимального варіанта штампування напівфабрикату, за допомогою

МСЕ в програмному комплексі Deform було виконано низку моделювань формоутворення заготовок різних діаметрів за різними технологічними схемами.

Результати комп'ютерного моделювання показали, що оптимальним для отримання проміжного напівфабрикату під подальшу механічну обробку є спосіб гарячого зворотного видавлювання з роздачею заготовки діаметром 48 мм та завдовжки 90,4 мм (рис. 4, а).



Рис. 4. Варіанти штампування напівфабрикату виробу із заготовок різного діаметра: а – одноопераційне штампування із заготовки діаметром 48r90,4; б – одноопераційне штампування із заготовки діаметром 58r61,9; в – штампування після попереднього формування заготовки діаметром 58r61,9

Також за результатами моделювання було встановлено, що під час використанні заготовки діаметром 58 мм та завдовжки 61,9 мм відштампувати напівфабрикат за подібною схемою неможливо (рис. 4, б). Як видно з рисунку в нижній частині напівфабрикату спостерігається неповне заповнення донної частини напівфабрикату, аналіз параметрів напружено-деформованого стану процесу вказує на високу ймовірність руйнування напівфабрикату у процесі деформування.

Отримати якісний напівфабрикат із заготовки діаметром 58 мм можливо лише за попереднього профілювання вихідної циліндричної заготовки (рис. 4, в)

Тому подальші дослідження були зосереджені на визначенні раціональних параметрів процесу штампування за схемою рис. 4, а.

За результатами комп'ютерного моделювання було встановлено, що у разі підігрівання пуансона та матриці до 300 °C та швидкості переміщення пуансона 100 мм/с необхідний температурний інтервал штампування витримується за температури нагрівання заготовки не менше 1100 °C. Як видно з рис. 5, а в кінці процесу деформування температура у поперечному перерізі напівфабрикату не опускається нижче 750 °C, за винятком незначної застійної зони в кутовій частині напівфабрикату, що не вплине на якість штампованого напівфабрикату.

Водночас максимальне значення критерію руйнування Normalized C&L дорівнює 0,367 (рис. 5, б) та не перевищує граничного значення [10], тобто деформування заготовки за цією схемою буде проходити без руйнування.

Розподіл інтенсивності деформацій у поперечному перерізі штампованого напівфабрикату (рис. 5, в) свідчить про ретельне пропрацювання структури вихідної заготовки. Однак найбільше пропрацювання спостерігається на внутрішній поверхні напівфабрикату (з боку пуансона). Тут інтенсивність деформацій коливається в межах 2...7 одиниць, а таке інтенсивне деформування може призводити до значного додаткового нагрівання пуансона і конструкція штампу потребуватиме додаткового охолодження пуансона.

Питомі зусилля на деформуючих поверхнях пуансона та матриці (рис. 5, г) не перевищують 1000 МПа, що може свідчити про високу стійкість інструмента у процесі деформування, при цьому в радіальному напрямку на поверхні матриці діють питомі зусилля в межах 450...650 МПа, що вказує на можливість використання однобандажованої матриці.

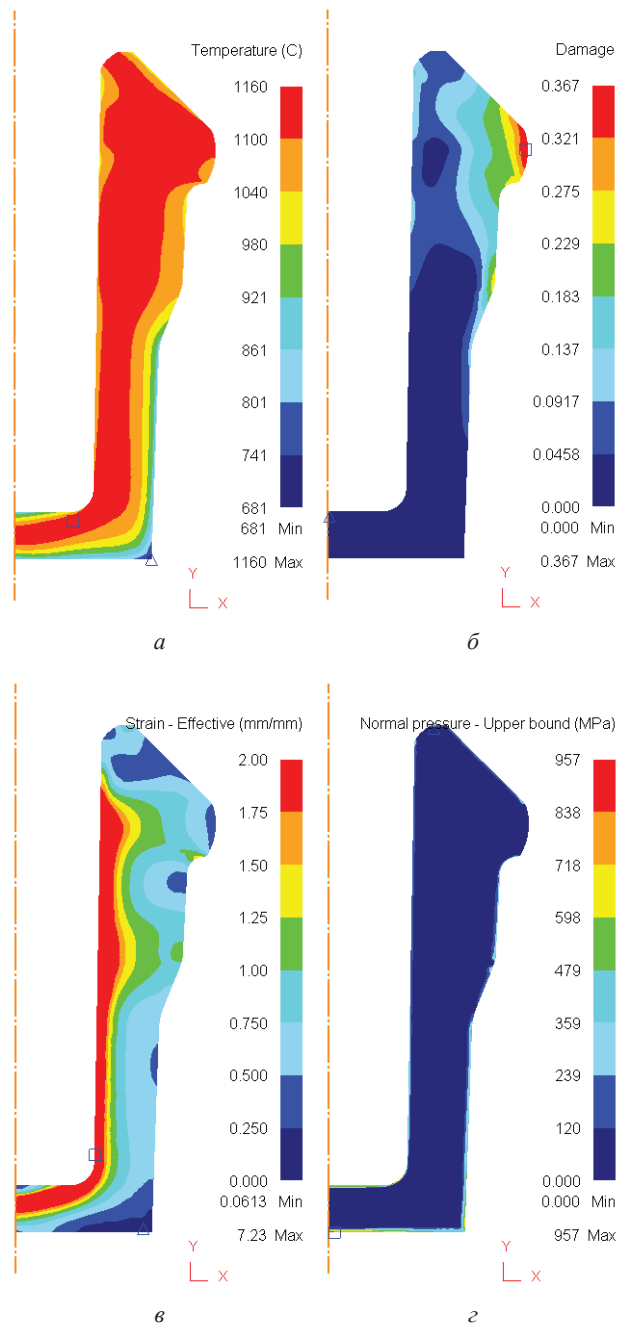


Рис. 5. Результати моделювання процесу деформування: а – розподіл температур; б – розподіл значень критерію руйнування Normalized C&L; в – розподіл інтенсивності деформацій; г – розподіл питомих зусиль на деформуючих поверхнях інструмента

Максимальне технологічне зусилля за результатами моделювання (рис. б) становить приблизно 1300 кН (136 тс), тобто запропонований процес може бути реалізований на наявному технологічному обладнанні.

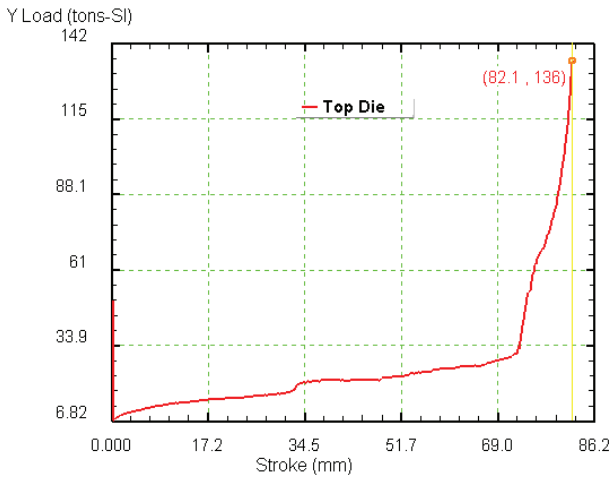


Рис. 6. Графік зміни технологічного зусилля

Конструювання принципової схеми штамп для виготовлення напівфабрикату для деталі «Корпус-перехідник»

Для реалізації процесу формоутворення напівфабрикату за допомогою гарячого об'ємного штампування було розроблено конструкцію штамп. Принципову схему штамп зображено на рис. 7.

Для ефективного видалення відштампованого напівфабрикату із зони штампування у штамп передбачено виштовхувач 22 та знімач оригінальної конструкції, який складається з матриці верхньої 4, тримача верхнього 5, який кріпиться гвинтом 6 до плити рухомої 7.

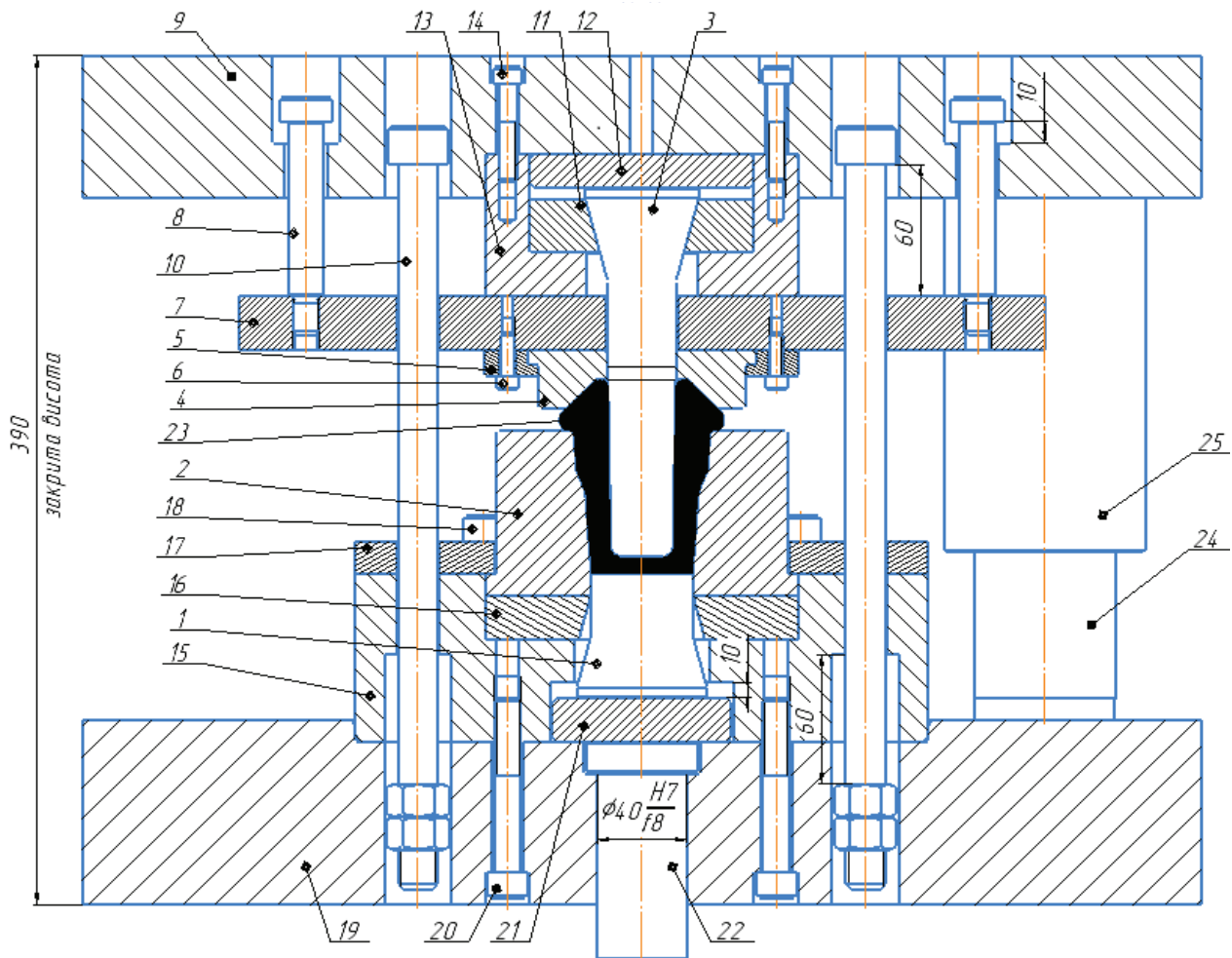


Рис. 7. Принципова схема штамп: 1 – виштовхувач; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 – матриця верхня; 5 – тримач верхній; 6 – гвинт; 7 – плита рухома; 8 – гвинт упорний; 9 – плита верхня; 10 – тяга; 11 – шайба опорна; 12 – плита підкладна; 13 – пуансонотримач; 14 – гвинт; 15 – обойма; 16 – опорна плита нижня; 17 – тримач матриці; 18 – гвинт; 19 – плита нижня; 20 – гвинт; 21 – опора; 22 – виштовхувач; 23 – напівфабрикат; 24 – колонка направляюча; 25 – втулка направляюча

Висновки

Результати досліджень, отримані під час пошуку оптимального варіанта гарячого штампування напівфабрикату для деталі «Корпус-перехідник», свідчать про те, що оптимальною з погляду мінімізації кількості штампувальних операцій під час виготовлення напівфабрикатів подібного типу є схема гарячого зворотного видавлювання з роздачею.

Запропонована в роботі схема штампу, порівняно з іншими можливими, дозволяє під час використання заготовки з розмірами діаметром 48–90,4 мм отримати задану геометрію напівфабрикату для деталі «Корпус-перехідник» за одну формозмінну операцію.

За результатами комп'ютерного моделювання з використанням МСЕ за певних початкових параметрів процесу (фактор тертя за Зібелем – 0,3, коефіцієнт контактного теплообміну – 5 Н/с/мм/С, підігрівання інструмента – 300 °С) були встановлені інші необхідні для реалізації процесу штампування технологічні параметри, такі як початкова температура нагрівання вихідної заготовки – 1100 °С та швидкість переміщення пуансона 100 мм/с, за яких температура напівфабрикату в кінці процесу не опускається нижче нижньої границі температурного інтервалу (750 °С) для сталі 45. Зрозуміло, що зміна будь-якого параметра процесу штампування потребуватиме додаткової оптимізації інших параметрів процесу.

Також за результатами комп'ютерного моделювання для відповідних вихідних параметрів процесу були встановлені енергосилові параметри процесу та параметри напружено-деформованого стану в напівфабрикаті у процесі штампування.

Так, максимальне зусилля штампування для запропонованих початкових умов становить 1300 кН (136 тс), а питомі зусилля на деформуючих поверхнях пуансона та матриці не перевищують 1000 МПа.

Отримані результати свідчать про те, що цей процес не потребує специфічних умов та може бути реалізований на наявному технологічному оснащенні зусиллям 1600 кН (або більшим). Під час розрахованих питомих зусиль у 1000 МПа прогнозована стійкість штампового оснащення буде достатньою для серійного та масового виробництва. Водночас максимальне значення критерію руйнування Normalized C&L за результатами моделювання дорівнює 0,367, що дозволяє з високою ймовірністю прогнозувати відсутність браку, пов'язаного з руйнуванням матеріалу у процесі штампування.

Збільшення коефіцієнта використання матеріалу під час штампування за запропонованою схемою (до 53 % порівняно з 26,5 % за механічної обробки із сортового прокату) свідчить про суттєву економічну ефективність запропонованої технології.

Reference

- [1] “European arms hub”. How Ukraine is increasing the production of weapons. Available: <https://www.unian.ua/weapons/yak-ukrajina-naroshchuye-virobnictvo-vlasnoji-zbroji-12409137.html/> (29.09.2023).
- [2] New 120-mm mines, the production of which was announced in February, “lit up” in Ukraine. Available: https://defence-ua.com/news/v_ukrajini_zasvitilisja_novi_120_mm_mini_pro_virobnitstvo_jakih_bulo_ogolosheno_v_ljutomu-11307.html (16.04.2023).
- [3] Construction and operation of the 120-mm mortar 2C12: Training manual / O.M. Droban, S.V. Bondarenko, B.S. Fedor [and others]. – Lviv: ASV, 2012. – 184 p.
- [4] Khrychikov V.E., Menyaylo O.V. Foundry production of ferrous and non-ferrous metals: Education. manual. – The second edition, revised. – Dnipropetrovsk: NMetAU, 2015. – 89 p.
- [5] Fedorov G.E., Yamshinskyi M.M., Fesenko A.M., Fesenko M.A. Product quality control in mechanical engineering. – Kramatorsk: DDMA, 2008. – 332 p.
- [6] J.K. Hatsu, A.K. Sunnu, G.K. Ayetor, G. Takyi, Investigation of shell mold casting technique in Ghana using indigenous materials, *Scientific African* (2021), doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e01052.
- [7] Orlyuk, M., Pimanov, V., Zhukov, V. (2021). Cold stamping of a 40x53 mm grenade launcher shell blank. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 359–365. doi: 10.20535/2521-1943.2021.5.3.248054.
- [8] V.L. Kalyuzhny. The use of cold stamping to obtain a hollow product with the necessary properties of deformed metal / V.L. Kalyuzhny, A.S. Tsybenko, Y.O. Chuvilov, E.O. Chuvilov // *Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”*. Series: Mechanical engineering. – 2015. – No. 1. – P. 124–130.
- [9] “Computer technologies for designing processes and machines”: laboratory workshop [Electronic resource]: study guide for students studying in educational programs: Applied mechanics of materials, Technology of production of aircraft specialty 131 “Applied mechanics” / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; comp.: A.D. Lavriienkov, V.V. Pimanov, V.M. Ermine. – Electronic text data (1 file, 5 Mbytes). – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021. – 138 p.

- [10] Orlyuk M.V. The limit values of the criteria of destruction in the simulation of the extraction processes in the DEFORM medium // Processing of materials by pressure: collection of scientific papers. – Kramatorsk: DSMA, 2017. – No. 2(45). – P. 22–29. – Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27990>, [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf).

V. V. Pimanov, M. V. Orliuk, A. M. Honchar, S. V. Sytnyk

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING A SEMI-FINISHED PART FOR A HOLLOW PART OF A COMPLEX GEOMETRIC FORM USING THE TECHNOLOGY OF HOT VOLUME STAMPING

Background. Today, the actual issues in the production of metal products are the saving of materials and the productivity of production, as this has a significant impact on the cost of finished products. This especially applies to hollow products with a complex geometric shape. Such products include parts or semi-finished products that have hollow cavities and additional elements in the design in the form of flanges, or variable wall thickness along the height of the product. Such parts are widely distributed in mechanical engineering, aircraft construction and in the production of special purpose products, in particular in the field of ammunition production. Therefore, the manufacturing technology of such parts should ensure mass production and have an economic effect.

Objective. By calculation, using the finite element method (FEM) in the DEFORM software environment, determine the option of stamping, from blanks of different diameters, a semi-finished product of a hollow part of a complex geometric shape using the technology of hot three-dimensional stamping, and analyze the proposed technological process of obtaining a semi-finished product.

Methods. Using MSE in the DEFORM software environment, simulation of hot three-dimensional stamping of a semi-finished product was carried out for a hollow part of a complex geometric shape made of blanks of different diameters. In this way, the option of obtaining a semi-finished product with a minimum number of transitions and a guaranteed possibility of implementing the technological process of mold formation was chosen. For the selected option, an analysis of the force modes of forming, normal stresses on the contact surfaces of the workpiece with the tool, and the stress-strain state of the deformed metal was performed.

Results. A semi-finished product manufacturing technology for a hollow part of a complex geometric shape using hot three-dimensional stamping technology is proposed. This technology will be implemented in the production of the adapter housing part, which is used in the design of the 120 mm mine. By calculation, with the help of MSE in the DEFORM software environment, the variant of semi-finished product molding for the "Body-adapter" part was determined using the technology of hot three-dimensional stamping, and an analysis of the technological operation of semi-finished product molding was carried out. The temperature regime of the process, technological efforts, parameters of the stress-strain state of the deformed material, the distribution of normal stresses on the deforming tool are determined. The results of the conducted computer modeling make it possible to take into account the design features and select the necessary technological equipment for mass production.

Conclusions. The technology for serial production of semi-finished products by hot volumetric stamping has been developed and substantiated. This technology made it possible to increase the rate of material utilization by two times compared to the technology of obtaining a part by mechanical processing from graded rolled steel.

Key words: finite element method, ammunition, stamping, hot back extrusion, forces, stresses, strains, temperature, failure criterion, material utilization factor

Рекомендована Радою
НН механіко машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
9 вересня 2023 року

Прийнята до публікації
11 грудня 2023 року