

Д.А. Гусачук, О.Д. Клименко, І.О. Парфентьева, М.В. Дмитріюк, Н.Ю. Імбірович,
Ю.П. Фещук, М.М. Карпюк

Луцький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ ПОКОВКИ ВУШКА ГІДРОЦИЛІНДРУ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ QFORM

В роботі виконані дослідження та оптимізація процесу гарячого штампування поковок для виготовлення проушини гідроциліндру у програмному комплексі QForm. Основними критеріями оптимізації були мінімальна кількість формуютьоруючих переходів, якісне заповнення робочих порожнин штампів, мінімізація витрат матеріалу та енергії формоутворення, з метою можливої реалізації технології на малопотужному штампувальному молоті в одному суцільному штампі. В результаті симуляції формоутворення оптимізована кількість та конструкція профілюючих переходів, і відповідних їм ривчаків молотового штампів, розроблена конструкція штампів.

Ключові слова: гаряче штампування, багатоперехідний процес штампування, поковки, технологічне конструювання, молот, оптимізація, QForm

Д.А. Гусачук, А.Д. Клименко, И.А. Парфентьева, Н.В. Дмитриук, Н.Ю. Имбиревич,
Ю.П. Фещук, Н.Н. Карпюк

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВКИ ПРОУШИНЫ ГИДРОЦИЛИНДРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ QFORM

В работе выполнены исследования и оптимизация процесса горячей штамповки поковок для изготовления проушины гидrocилндра в программном комплексе QForm. Основными критериями оптимизации были минимальное количество формообразующих переходов, качественное заполнение рабочих полостей штампа, минимизация затрат материала и энергии формообразования, с целью возможной реализации технологии на маломощном штамповочном молоте в одном штампе. В результате симуляции формообразования оптимизировано количество и конструкцию профилирующих переходов, и соответствующих им ручьев молотового штампа, разработана конструкция штампа.

Ключевые слова: горячая штамповка, многoperеходный процесс штамповки, поковки, технологическое конструирование, молот, оптимизация, QForm

D. Husachuk, O. Klymenko, I. Parfentieva, M. Dmytryuk, N. Imbiryvych, Yu. Feshchuk, M.
Karpyuk

THE OPTIMIZATION OF THE HOT FORGING PROCESS OF AN EYE-END FOR HYDRAULIC CYLINDER IN THE QFORM SOFTWARE PACKAGE

The research and optimization of the process of hot die forming of forgings for the manufacture of a hydraulic cylinder eyelet in the QForm software package have been carried out, in this work. The main optimization criteria were the minimum number of shaping stages, high-quality filling of the die working cavities, minimization of material consumption and shaping energy, with the aim of the possible implementation of the technology on the low-power drop hammer in one die. As a result of the simulation of shaping, the number and design of the profiling stages and the coincide die cavities of hammer were optimized, and the design of the die was developed.

Key words: hot die forging, multi-stage forging process, forgings, technology design, drop hammer, optimization, QForm

Постановка проблеми. Багатоперехідні процеси гарячого штампування дозволяють виготовляти велике різноманіття деталей, як за формою та розмірами, так і матеріалами. В цих процесах важливо оптимальним чином спроектувати переходи формоутворення. Якщо раніше налаштування та підготовка штампувальних переходів в основному проводилося на основі практичного досвіду, інтуїції та використання експериментальних штампів, то сьогодні доцільним є застосування спеціалізованих програмних пакетів, які засновані на методах FE (кінцевих елементів) та FV (кінцевих об'ємів) [1-3]. Використання цих програм дозволяє створювати оптимізацію процесу штампування більш ефективним, надійним та дешевим способом, і в менші терміни.

Важливим етапом формоутворення поковок в гарячештампувальному виробництві є процеси профілювання початкової заготовки з метою її фасонування під профіль чистового ривчака штампів. Успішне профілювання дозволяє покращити умови пластичної деформації в чистових ривчаках, досягнути кращої якості отримуваних поковок, зменшити витрати металу, підвищити стійкість робочої поверхні кінцевих ривчаків, з рештою підвищити ресурсозбереження та конкурентну привабливість технологій гарячого штампування. Проте, профільна підготовка

заготовок, як правило, є трудомісткою, вимагає виконання окремих переходів, часто і операцій технологічного процесу виготовлення поковки, окремого обладнання та інструменту, що ускладнює виробництво та збільшує капіталовкладення, які можна виправдати лише великою кількістю поковок. За умов сучасної індивідуальності промислових замовлень та контрактів, характеру їх різноформатності при малих об'ємах випуску виробів, гарячештампувальне виробництво складних фасонних поковок, отримання яких вимагає декількох профілюючих переходів, є невигідним. Собівартість таких поковок може складати до 95 % (іноді вище) від їх ціни, що робить спеціалізовані процеси штампування невиправдано дорогими та не конкурентними серед інших технологічних способів заготівельного виробництва.

Часто виробничі об'єднання та підприємства, стикаючись з такою ситуацією, відмовляються від впровадження процесів штампування, спираючись на значні витрати, пов'язані з проектною підготовкою, розробкою спеціалізованого інструменту, його випробуванням, налагодженням та виготовленням. З іншого боку, саме структурна проробка металу під час пластичної деформації дозволяє отримувати якісні заготовки із значним ресурсом характеристик міцності, довготривалої стійкості під час експлуатації в умовах динамічних навантажень. Поєднання цих двох аспектів є актуальним завданням штампувальних виробництв та визначає їх конкурентні можливості перед багатьма іншими технологічними процесами формоутворення якісних виробів. Ефективним рішенням такого завдання може бути використання методів симуляції процесів пластичного формоутворення в спеціалізованому програмному середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасних умовах господарювання машинобудівних підприємств, об'єм комерційного замовлення, здебільшого, є малим та недостатнім для запровадження процесів вироблення штампованих заготовок, з використанням спеціалізованих пресів, інструмент яких є дорогим [4-6]. Тому, такі процеси можна розглядати на предмет можливості їх реалізації з використанням більш простого інструменту та обладнання, зокрема, повітряних, пароповітряних штампувальних молотів, налагодження, модернізація та експлуатація яких є більш дешевими [7]. Ще більшої економії в статті витрат у собівартості поковок можна досягнути зменшуючи кількість переходів штампувальних операцій, які вимагають використання окремого інструменту та обладнання [8, 9]. Водночас, слід уникати процесів кування, оскільки, вони, як правило, є надто трудомісткі, та вимагають використання кваліфікованих працівників. Осадка, як основна підготовча операція, також може бути використана як профілююча [10-12], з її різновидами аж до вертикальної висадки. Проте, використання різноманітного підкладного інструменту збільшує трудомісткість, виробничі витрати та є невигідним для технологічних процесів штампування. Добре відомі процеси молотового штампування з реалізацією осадки в одному штампі [13], на окремій площадці для осаджування, можна використати для проектування та дослідження варіанту реалізації місцевої осадки із защемленням кінця заготовки з метою одночасної реалізації профілювання початкової заготовки. Це зменшить витрати на окремі процеси профілювання. Гарних результатів профілювання перед штампуванням фасонних поковок досягають використанням процесів вальцювання [13, 14], проте це також вимагає впровадження окремих операцій технологічного процесу, розробки спеціалізованого інструменту та використання окремих машин, ковальських вальців, що може бути виправданим для випадків виробництва великих партій поковок. Способи багатоступового чи спареного штампування [10, 13] вимагають збільшення розмірів штампувального інструменту, що для фірми виконавця замовлення було не раціональним, бо вимагало придбання окремого більш потужного обладнання.

Постановка завдання та мета дослідження. Вигідним варіантом реалізації технологічних процесів штампування може бути вироблення обмеженої кількості заготовок для дрібних деталей машинобудування, де можливе використання малопотужних ковальсько-штампувальних машин, зокрема, молотів. Дрібні деталі систем гідроприводів – штоки, вушка та провусини гідроциліндрів і подібні їм конструктивні елементи, часто мають фасонну форму та вимагають перерозподілу металу під час пластичного формування в рівчачкових штампах. Актуальним для такого роду технологічних процесів є оптимізація профілювання заготовок без використання додаткового інструменту та обладнання, щоб зберегти конкурентні переваги перед іншими способами виготовлення. Ефективними засобами реалізації цього, на стадії проектування технологічних процесів, є сучасні програмні CAD, CAE, CAM системи моделювання, що засновані на FEM методах та враховують багатоваріантність інженерних завдань, в поєднанні з візуальними

інтерактивними засобами формування структури багатоперехідних процесів формоутворення. В роботі використаний один з найбільш ефективних на ринку багатозадачних цифрових систем аналізу та симуляції процесів обробки металів тиском – програмний комплекс QForm фірми “Micas Simulation Ltd” [15].

Метою роботи було оптимізувати технологію виготовлення поковок вушка силового гідроциліндру в умовах дрібного комерційного замовлення та використання одного ковальського агрегату для формоутворюючих операцій гарячого штампування. В процесі моделювання процесу намагалися розмістити всі профілюючі та формоутворюючі переходи в одному молотовому штампі. Це значно скоротить витрати на підготовку та організацію виробництва, які займають значну частку за статтями собівартості гарячештампованих заготовок.

Викладення основного матеріалу. Моделювання та FEM симуляція процесів пластичного формоутворення матеріалів дозволяє максимально заощадити матеріальні витрати виробництва, що не завжди досягається розрахунковими та табличними методами проектування технологічних процесів ковальсько-штампувального виробництва. Це пов'язано з значним завищенням розрахункових параметрів, що закладені у традиційних алгоритмах розрахунку та проектування, зокрема гарячештампованих поковок, у відповідності до діючих стандартів. Наявні зараз САД, САЕ системи (QForm-3D та інші) дозволяють удосконалити процес проектування заготовок в заготівельному виробництві, дозволяючи зменшити витрати на одиницю продукції. Крім того, сучасні програми моделювання процесу формоутворення дозволяють оптимізувати пластичне течіння металу, шляхом підбору форми профілюючих заготівельних рівчаків. У роботі, з метою організації проекту розрахунку переходів формоутворення поковки вушка гідроциліндру (рис. 1) були використані цифрові просторові моделі поковок, отримані в програмі Solidworks. За конфігурацією поковку слід віднести до видовжених в плані, які вимагають перерозподілу металу перед остаточним формуванням. Виконуючи побудову розрахункової заготовки встановлено, що для поковки вушка доцільне використати підкатного рівчача, але зі значним надлишком об'єму середньої заготовки. Це не дозволяє кардинально зменшити витрати металу. Тому, в роботі було прийнято рішення використати площадку для плющення кінця заготовки для формування зони кільця вушка, з моделюванням процесу в САЕ комплексі QForm 9.0.7 (ключ ліцензії U2636 (id:1639796648)). Розміри початкової заготовки становили 53×165 мм. Передачу геометрії об'єктів в проект програми QForm виконували через просторові моделі з розширенням step. Моделі чистового рівчача розроблялись за моделлю гарячої поковки з облойним заусенцем.

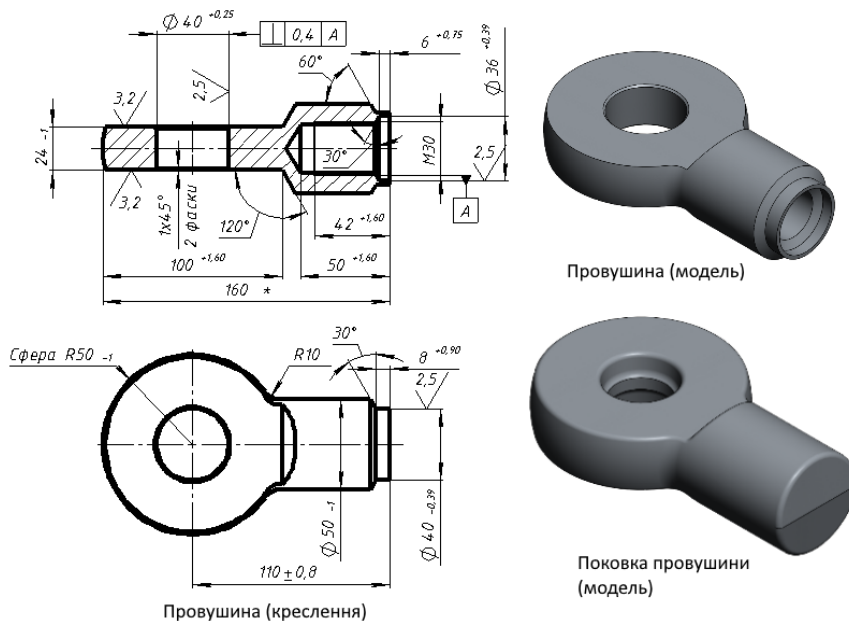


Рис. 1. Вушко гідроциліндру, просторова модель та модель поковки

В процесі моделювання встановлено, що простим плющенням кінця заготовки не вдається сформувати поковку вушка (рис. 2). Це пов'язано з недостатнім перерозподілом металу заготовки та відсутністю його об'єму в зоні вушка. З метою оптимізації формування було запропоновано

виконати вертикальну висадку, з формуванням потовщення на верхньому кінці заготовки, при фіксації нижнього кінця у конічній порожнині (рис. 3), та, відповідно, набором металу для формування вушка. Як відомо висадка довгих заготовок, з відношенням довжини до діаметру більше 3,0 є нестабільним процесом та для задовільного її виконання вимагає прийняття конструктивних рішень [12]. Зокрема, підвищити повздовжню стійкість заготовки у вертикальному напрямку можна застосовуючи фіксацію її кінців, з повздовжнім підпиранням. Тому, в процесі оптимізації геометрії робочих контурів інструменту, в конструкції верхньої плити, також як і нижньої, було спроектоване конічне заглиблення. Геометрію конусних заглиблень та їх конструктивні розміри оптимізували в процесі симуляції всіх переходів формоутворення поковки: висадки, плющення висадженого кінця, чорнового штампування, чистового штампування. В процесі симуляції процесу висадки розміри заготовки були оптимізовані до значень: 52×175 мм, що перевищує оптимальні умови звичайної осадки циліндричних заготовок в 1,2...1,4 рази. Дослідженнями встановлено, що під час висадки заготовка розширювалась зверху до діаметру з максимальним його значенням 65,9 мм. За рахунок осадки виступаючої частини її довжина зменшувалась до значення 138,5 мм, яке передбачалось збільшити під час плющення набраної частини металу, що вимагало моделювання та оптимізації.

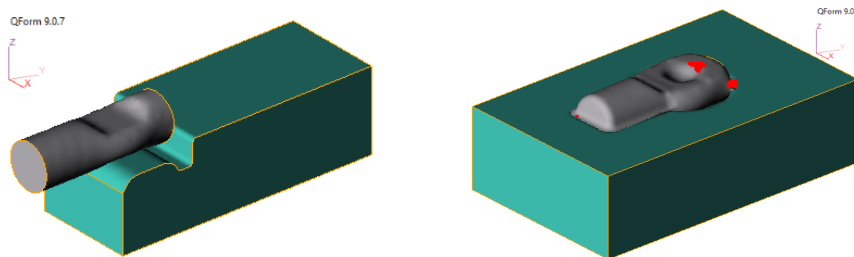


Рис. 3. Моделювання процесу плющення заготовки та штампування в чорновому ривчаку (затиски металу та недоштампування при недостатньому профілюванні)

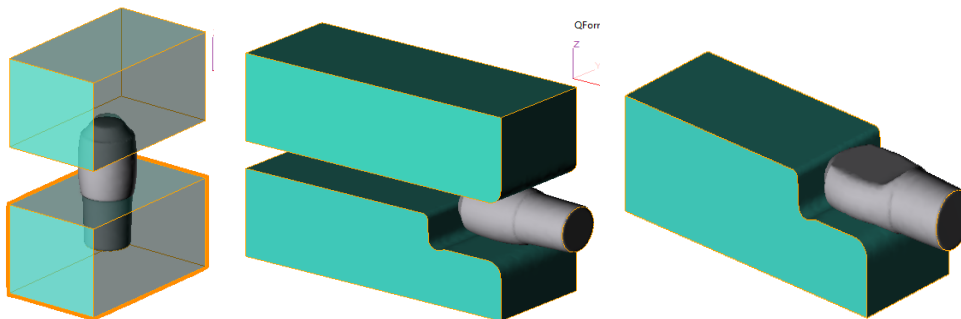


Рис. 3. Моделювання переходів висадки та плющення

Шляхом моделювання та геометрично-розмірної оптимізації заготівельних та штампувальних переходів було досягнуто задовільного виконання формоутворення поковки вушка. Встановлено, що після висадки профіль заготовки є більш оптимальним для виконання плющення потовщеного кінця. В процесі плющення заготовка частково видовжується. Моделюванням отримано оптимальні значення товщину ділянки плющення – 35 мм. При цій товщині довжина заготовки досягає значення 153 мм, яке є близьким (з мінусовим відхиленням) до довжини розрахункової заготовки. Крім того, в процесі моделювання вісь плющення зміщена вниз. Це дозволить полегшити орієнтування заготовки при ударах молоту та досягнути потрібного дозування металу. Заготовка в процесі плющення утримується за вільний кінець кліщами з круглими губками.

В роботі виконували спробу виконання чистового штампування профільованої заготовки, безпосередньо, після плющення. Проте, в процесі підбору параметрів та симуляції в QForm такий спрощений варіант формоутворення не дозволяє отримати остаточно сформовану поковку. Уникнути дефектів в зонах намітки центрального отвору попереку кільця вушка не вдається, також присутні ділянки недоштампування. Облойний заусенець, за такого варіанту штампування,

має значний ступінь нерівномірності по периметру поковки, що робить ймовірним появу недоштампувань за головною віссю поковки у випадку неточного позиціонуванні профільованої заготовки в кінцевому рівчаку.

Для оптимізації кінцевого формування доцільно застосувати чорновий рівчак. Це дозволить покращити умови течіння металу та забезпечить формування якісної намітки отвору вушка та отримати більш рівномірний облойний заусенець, що буде гарантувати потрібну якість чистової поковки, її стабільність та повторюваність в процесі. Просторові моделі інструменту для чорнового штампування будували за моделлю чорнової поковки, профіль якої початково був сконструйований за традиційними вимогами проектування [13] та коректувався в процесі симуляції в QForm. Зокрема, у зоні кільця вушка оптимізувалась геометрія заглиблень та відповідні виступи у верхньому та нижньому інструментах, для початкової намітки отвору.

В результаті моделювання процесу чорнового та чистового штампування профільованої заготовки (рис. 4), яка отримана з початковою висадкою досягнуті оптимальні умови пластичного формування. Модель кінцевої чистової поковки вушка має рівномірний заусенець по контуру та повністю оформлену просторову форму. Можливі затиски металу повністю витиснені в облойний заусенець та відсутні в тілі поковки.

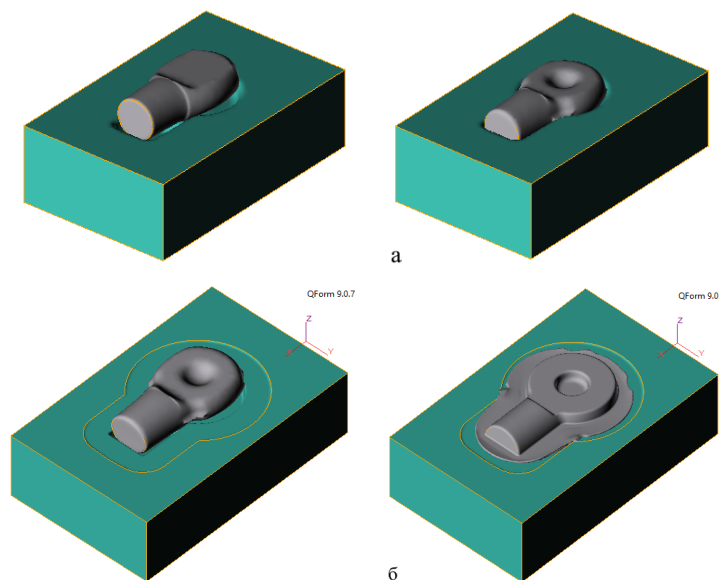


Рис. 4. Моделювання чорнового (а) та чистового (б) штампування оптимізованої заготовки (ліворуч – початок формування, праворуч – кінець)

За результатами FEM аналізу в програмному комплексі QForm робота (енергія) та зусилля приймають найбільшого значення для кінцевого переходу – чистового штампування поковки вушка гідроциліндру (рис. 5).

Як видно максимальні значення зусилля при чистовому формуванні поковки сягають майже 8 МН, а робота пластичної деформації – 17,2 кДж. Ці параметри зростають порівняно плавно, що свідчить про достатню оптимізацію форми профільованої чорнової поковки та стабільність плинності металу. Найбільший ріст зусилля та роботи деформування спостерігається в діапазоні відстаней між інструментом, які відповідають інтенсивному виходу металу в облойний місток. Таким чином штампування на молоті поковки вушка доцільно виконати в чотири переходи: висадка, плющення, чорнове та чистове штампування. Всі рівчаки можна виконати в блочних чи суцільних штампах. За енергетичними параметрами процесу, отриманими в процесі симуляції, для здійснення всього циклу формоутворення можна використати пароповітряний, чи іншого типу, молот з енергією удару понад 20 кДж.

Отримані симуляцією процесу кінцевого формоутворення силові параметри штампування добре корелюють зі значеннями, отриманими розрахунковим методом. В роботі визначали необхідну масу падаючих частин молоту згідно аналітичної залежності для некруглих в плані штампу поковок, що враховує: умовний опір матеріалу деформуванню при температурі штампування, приведений діаметр некруглої в плані поковки та її геометричні розміри. Умовний

опір деформуванню сталі 35 при гарячому штампуванні приймали для температури нижньої межі штампування 850 °С (65 МПа).

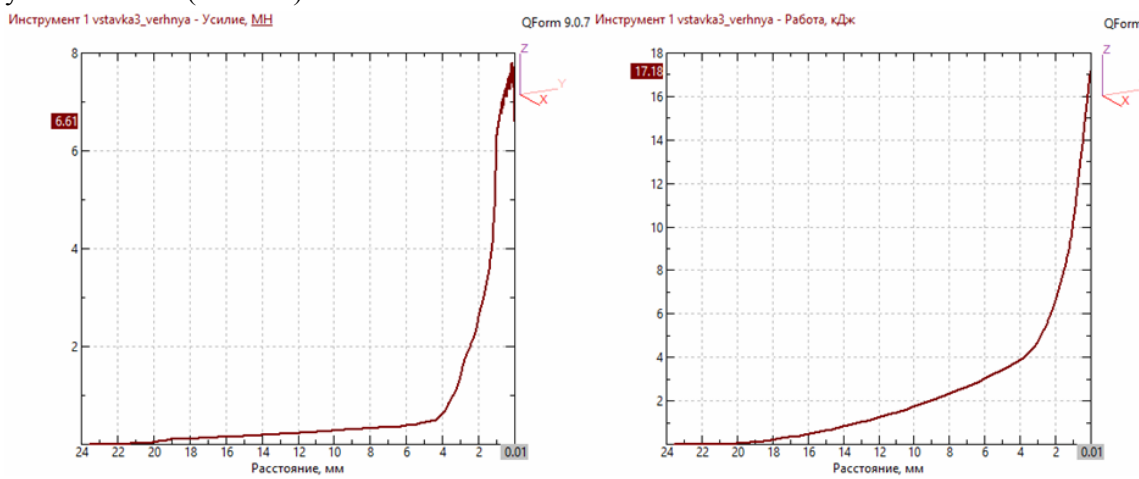


Рис. 5. Зусилля та робота деформування в залежності від відстані між верхнім та нижнім інструментом для чистового штампування

Симуляцією процесу багатоперехідного штампування поковки вушка встановлено, що температура сталі в кінці циклу штампування сягала 900...930 °С, в тілі поковки, та не менше 850 °С в зоні облоїного містка. Отримане розрахункове значення маси падаючих частин становило 807 кг, що приблизно на 5 % більше за значення, встановлені комп'ютерною симуляцією процесу. В результаті для процесу молотового штампування поковки вушка, згідно запропонованого процесу формоутворення, можна рекомендувати малопотужний штампувальний молот, зокрема, моделі М2140, із масою падаючих частин 1000 кг.

На основі моделювання та комп'ютерної симуляції процесу в роботі були спроектовані ескізи (рис. 6) та цифрові моделі переходів штампування поковки вушка гідроциліндру. Комбінацією висадки та плющення вдається досягнути оптимального профілювання початкової заготовки, що покращує умови пластичного формування металу в штампувальних рівчаках.

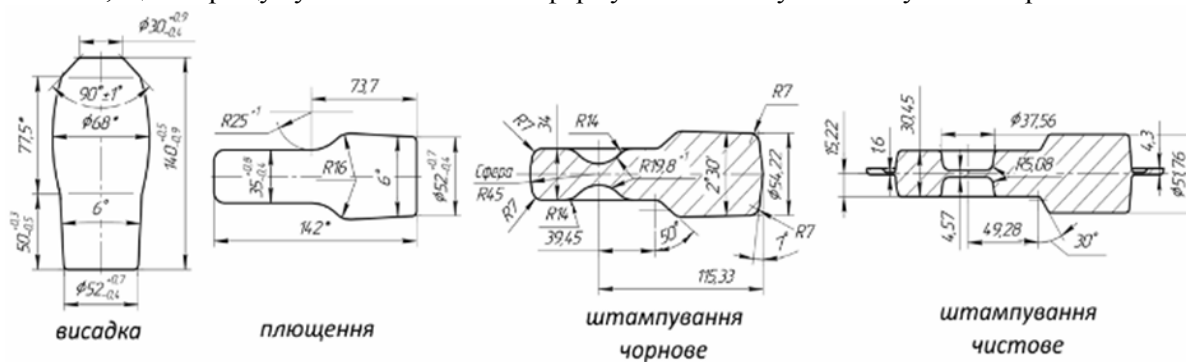


Рис. 6. Переходи гарячого штампування поковки вушка

Моделюючи геометрію конічних заглиблень для першого переходу – висадки, отримано оптимальну їх геометрію. Конусність отвору у нижньому інструменті можна встановити з ухилом на сторону, відповідно, у 7°, що є мінімальним значенням штампувальних ухлонів для молотового штампування. При співвідношенні глибини до діаметру заглиблення, приблизно, в одиницю (навіть менше), істотне заклинювання заготовки після висадки мало ймовірно, за умов охолодження зацементованого кінця у рівчаку штампа. Видалення та зняття заготовки тут можливе підважуванням її кліщами за розширену середню частину.

За результатами моделювання в QForm, використовуючи отримані цифрові просторові моделі переходів штампування, в роботі виконаний дизайн та розробка конструкції штампу для штампувального молота М2140. При цьому використані модельний інструмент, вставки, конструкція яких оптимізована в програмі. З практики виконання процесів штампування на молотах, модельний інструмент доцільно скомбінувати у послідовності, яка показана на рисунку 7, б. Штампувальні рівчаки, відповідно, розміщені у центральній зоні дзеркала штампу, їх

позиціонування визначали за мінімально допустимим значенням стінки між рівчачками у відповідності до їх глибини. Заготівельні профілюючі рівчачки доцільно розмістити по краях дзеркала штампу. З лівої сторони доцільно розмістити рівчачок для висадки, з правої – площадку для плющення.

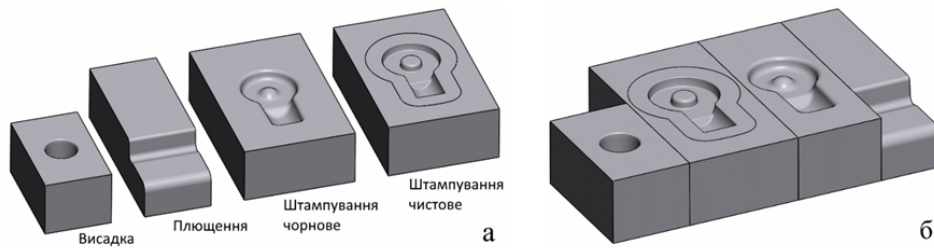


Рис. 7. Комбінування модельних вставок в молотовому штампі

На основі прийнятих конструкторських рішень та розрахунків щодо вибору положень рівчачків, було розроблено просторову конструкцію штампу для молота М2140, який складається з суцільних верхнього та нижнього штампів (рис. 8). З фронтальної сторони штампів передбачені западини під кліщі для маніпулювання та видалення поковок зі штампу, конструкція яких є стандартною, так само як і опорних хвостових частин. З задньої сторони штампів виконані кутові замки для попередження зсуву штампів в площині роз'єму. Згідно розробленої конструкції площа дзеркала штампу становить 780 см^2 , що не менше норми на одну тону падаючих частин молота.



Рис. 8. 3D-модель молотового штампу для штампування поковки вушка гідроциліндру

Площадка плющення, яка розміщена з правої сторони штампу, опущена вниз так, щоб її робочий простір повністю розміщувався в нижньому напівштампі. Робоча поверхня верхнього штампу в цій зоні має звичайну плоску поверхню в рівень дзеркала штампу, з виконанням скруглення на фронтальному куті. Таке розміщення дозволяє утворити задній упор у вигляді стінки в нижньому штампі, що дозволить легко позиціювати заготовку після висадки та, відповідно спростить процес виконання штампування. Висадку варто виконувати легкими ударами молоту за два, три удари, з поворотом заготовки навколо осі для мінімізації ймовірності втрати стійкості заготовки та її повздовжнього згину.

Виготовлення такого штампу буде займати значну частку витрат на організацію виробничого процесу. Проти ці витрати будуть меншими у випадку розділення процесу формування на окремі операції, із застосуванням окремого інструменту та обладнання. Для зменшення вартості штампу можна рекомендувати його виготовлення зі сталі 5ХГМ, яка є більш дешевою за хромонікелеві сталі та придатною до використання на малопотужних молотах з масою падаючих частин до трьох тон.

Висновки. В роботі виконано оптимізацію технології виготовлення поковок вушка силового гідроциліндру в умовах дрібного комерційного замовлення з використанням технології гарячого пластичного формування, яка забезпечує високу якість структури сталі. FEM симуляцією процесу у програмному комплексі QForm обґрунтовано мінімізацію переходів штампування. Встановлено, що комбінацією переходів висадки та плющення вдається досягнути оптимального профілювання початкової заготовки, виконати потрібний набір металу в зоні кільця вушка гідроциліндру, та, відповідно, покращити умови пластичного формування металу в штампувальних рівчачках, зі зменшенням об'єму штампувальних відходів. В процесі моделювання всі профілюючі та

формоутворюючі переходи розміщено в одному молотовому штампі, що зменшує витрати на виготовлення інструменту, які займають значну частку за статтями собівартості гарячештапованих заготовок для потреб машинобудування.

Список використаних джерел:

1. Jong, de, J. E. (1983). Numerical analysis of metalforming processes: applications and experimental verification. Technische Hogeschool Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR107405>.
2. Niu J. T., Li H. T., Meng X. D. and Karjaleinen P.: Numerical simulation methods and their application in material hot-working, Acta Metallurgica Sinica, Vol. 13, No2, 2000, pp 494-501.
3. Behrens B. A., Schäfer F., Hundertmark A., Bouguecha A.: Numerical Analysis of Tool Failure in Hot Forging Processes, 17th International Scientific And Technical Conference “Design and Technology of Drawpieces And Die Stampings” Poznań-Wąsowo, 22-24 September 2008, pp 163 – 175.
4. Сучасні технології точного об'ємного штампування / Євстратов В. О. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – №46(952). – С. 33-40
5. Бурко В.А. Основные способы получения профилированных заготовок в ресурсосберегающих технологиях объемной штамповки / А.В. Бурко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць / ПДТУ.– Маріуполь, 2012.– Вип.24.–С. 75-83.
6. Володин И.М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на её основе технологии / И.М. Володин, А.А. Ромашев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 19-29.
7. Гринкевич В.А. Бесштаповое профилирование на прессах с повышением точности формоизменения на окончательных операциях / В.А. Гринкевич, В.В. Кухарь, К.К. Диамантопуло // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – № 5. – 2010. – С. 19-23.
8. Кухарь В.В., Бурко В.А. Ресурсосберегающие технологии штамповки медных осесимметричных (круглых в плане) поковок на основе предварительного формирования бокового профиля заготовок свободной подготовительной осадкой / В.В. Кухар, А.В. Бурко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць / ПДТУ.– Маріуполь, 2014.– Вип.29.–С. 75-83.
9. Movrin D., Plančak M., Vilotić D., Milutinović M., Skakun P., Lužanin O., Trbojević I.: Optimization and design of multistage hot forging processes by numerical simulation and experimental verification, Journal for Technology of Plasticity, Vol. 35 (2010), No.1-2, pp. 75-89, <https://www.researchgate.net/publication/277101911>.
10. Kukhar, V., Burko, V., Prysiashnyi, A., Balalayeva, E., & Nyhnbida, M. (2016). Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(7(81)), 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063>.
11. Воронцов А.Л. Определение формы боковой поверхности заготовки при осадке / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 3. – С. 7-16.
12. Experimental Research and Method for Calculation of 'Upsetting-with-Buckling' Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece / V. Kukhar, V. Artiukh, A. Prysiashnyi, A. Pustovgar // E3S Web Conf., 33 (2018) 02031, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.
13. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х томах. Под ред. Е.И. Семенова. Т.2. Горячая объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1986. – 592 с.
14. Смирнов В.К. Горячая вальцовка заготовок / В.К. Смирнов, К.И. Литвинов, С.В. Харитонин – М.: Машиностроение, 1980. – 150 с.
15. About Micas Simulations Limited / QForm (qform3d.co.uk).

Рецензент В.І. Шваб'юк, професор кафедри прикладної математики та механіки ЛНТУ, доктор технічних наук