

УДК 621.73.011

Гожій С. П.
Кліско А. В.
Носенко А. І.
Лавріненков А. Д.

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКочУВАННЯМ В СУЧАСНОМУ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Машинобудування масово виготовляє і застосовує вісесиметричні деталі різноманітної конструкції типу кільце, бандаж, фланець. Річна потреба, в тому числі і України, в деталях такого сортаменту коливається в значних межах і може досягати десятків мільйонів штук. Зокрема, потреба в кільцевих заготовках фланців, бандажів, кілець тільки підприємств хімічного машинобудування Російської Федерації складає на рік – 1865,2 тис. шт. (57,3 тис. т), з них штампованих – 778,2 тис. шт. (37,7 тис. т) або лише $\approx 40\%$, при цьому близько 15% від загальної кількості складають фланці з легованих сталей [1].

Відносна кількість деталей зазначеної групи постійно зростає, що пов'язано з тенденцією зниження матеріалоємності машин та використання нових матеріалів з підвищеними механічними властивостями. Їх виготовлення вимагає або обладнання значного зусилля, або методів, які засновані на значних витратах матеріальних і сировинних ресурсів. Такі підходи – неекономічні і мають значні капітальні (дороге і різнопланове устаткування) та поточні (підвищені витрати матеріалів, енергоносіїв і інших ресурсів) витрати. Оскільки більшість традиційних способів обробки металів тиском спрямована на обробку в гарячому стані, то крім економічних витрат (на нагрівання, нагрівальне устаткування та ін.), необхідно враховувати і соціальні проблеми (тяжкі умови праці, забруднення навколишнього середовища, безпоротні відходи та ін.).

Найбільш поширеними на сьогоднішній день методами традиційного промислового виготовлення вісесиметричних деталей є:

- гаряче штампування з суцільної заготовки з прошиванням або вирубуванням центрального отвору;
- гаряче відкрите і закрите та холодне штампування з трубчастої заготовки попередньо відокремленої від труби;
- гаряче подовжнє прокатування прошитої або трубчастої заготовки.

При виготовленні вісесиметричних деталей набувають розповсюдження ротаційні способи, які засновані на обмежені зони пластичного деформування з багаторазовим циклічним переміщенням цієї зони по всьому об'єму деталі.

Зокрема, застосовуються технологічні процеси виготовлення кільцевих деталей необхідного розміру, які складаються з отримання із суцільної заготовки об'ємним штампуванням поковки, в якій видаляють внутрішній і зовнішній відходи і яка після цього має форму товстостінного кільцевого напівфабрикату, з наступним гарячим розкочуванням на спеціальних станах. Виграш за такої технології полягає в тому, що внутрішній та зовнішній відходи мають менші розміри ніж розміри остаточної кільцевої деталі, яку використовують для подальшої обробки. Такий технологічний процес покладений в основу автоматичних ліній Wagner (Німеччина) [2]. Основними недоліками процесу є обробка в гарячому стані, наявність відходу та певні технологічні обмеження щодо геометричних співвідношень розмірів та конструкції перерізу.

Виготовлення деталей при локальному навантаженні дозволяє досягти пластичного стану в зоні деформації при меншому значенні технологічного зусилля. Це дає можливість здійснювати процес на устаткуванні меншої тоннажності або перейти на обробку в холодному стані. Тому відслідковується тенденція переходу на холодне штампування із притаманними йому перевагами [3, 4].

Використання кільцевої заготовки дає очевидні технологічні переваги наступного об'ємного деформування, але виникають технологічні проблеми: низька продуктивність операцій отримання або відокремлювання кільцевої заготовки. Має місце значний відхід металу (до 12 %) при відокремлюванні від труби різанням [5]. Також треба враховувати, що вартість труби $\approx 1,5$ (1,4–1,7) рази дорожча за сортовий суцільний прокат.

Узагальнюючи викладене можна зробити висновок, що найбільш ефективним для вісесиметричних деталей (з відношенням діаметра d до висоти h більше за 2) є: 1) застосування локальних технологій формоутворення; 2) обробка в холодному стані; 3) використання раціональної (кільцевої або циліндричної) заготовки.

Під раціональною заготовкою вважаємо заготовку, що отримана з мінімальними витратами, максимально наближена за розмірами до готового виробу і, відповідно, має мінімальну собівартість із достатніми якісними показниками. Це стосується як циліндричних, так і кінцевих заготовок.

Найбільший ефект при максимальних технологічних можливостях досягається при застосуванні такого виду локального ротаційного деформування як штампування обкочуванням (ШО) [4, 6]. Широке впровадження ШО гальмується проблемою недостатньої кількості технологічних схем комплексного застосування, які б розширили можливості процесу та забезпечили ефективність і стабільність протікання, а також відсутністю систематизації технологічних можливостей. Як правило, проведені теоретичні і експериментальні дослідження процесу стосуються лише вирішення конкретної технологічної або конструкторської проблеми і не розглядають питань комплексного застосування локальних методів деформування, що не дає максимального ефекту від їх реалізації.

Мета статті – аналіз на конкретних прикладах досягнутих технологічних можливостей штампування обкочуванням; розроблення класифікації типових за формою деталей, що можуть з максимальною ефективністю вироблятися операціями ШО; систематизація переваг процесу перед традиційними та визначення основних напрямків застосування, розвитку та вдосконалення методу як ресурсозберігаючого; визначення напрямків подальших наукових досліджень.

Загальна схема ШО представлена на рис. 1 на прикладі осадки циліндричної заготовки. Деформація заготовки 1 здійснюється між активним інструментом 2, що має конічну робочу поверхню, і нерухомим інструментом 3. Активний інструмент 2 обкочується відносно вершини O . В залежності від рухів осі OR щодо центральної осі OS можливі різні види руху обкочування інструмента 2. Найбільш простим з реалізації рухом, що використовується при виготовленні визначених деталей, є круговий обертальний рух інструмента 2 (цей вид відображено на рис. 1). При цьому кут нахилу осі інструмента 2 щодо центральної осі OS утворює незмінний кут нутацій – γ . Для створення спіралеподібного руху активного інструменту кут γ поступово змінюється в межах від 0° до максимального значення. Для одержання деталей, що мають одну чи більше осей симетрії (в тому числі деталей типу «важіль»), застосовують покрокові коливальні рухи активного інструмента в одній із площин. Планетарний рух використовується для одержання деталей типу «зірочка» або «хрестовина». Деформування заготовки відбувається в сполученні з поступальним зближенням інструментів. В такому випадку контакт між заготовкою і інструментом здійснюється не по всій торцевій поверхні деталі, а лише по її частині. Зона пластичної деформації при її переміщенні багаторазово переміщається по всьому об'єму заготовки охоплюючи його.

Можна виділити характерні конструктивні риси деталей, які ефективно виготовляти ШО (рис. 2).

Насамперед найбільший ефект досягається при виготовленні деталей відносно тонких або з тонкими елементами конструкції. Деталі з такими конструктивними елементами мають широке розповсюдження і, одночасно, суттєві відмінності друг від друга. Подальший аналіз буде зосереджений якраз на вісесиметричних в плані деталях.

Однією з особливостей, яка зменшує витрати при виробництві вісесиметричних деталей є те, що найбільш простим за організацією рухом для спеціалізованого обладнання є обертальний рух активного інструменту.

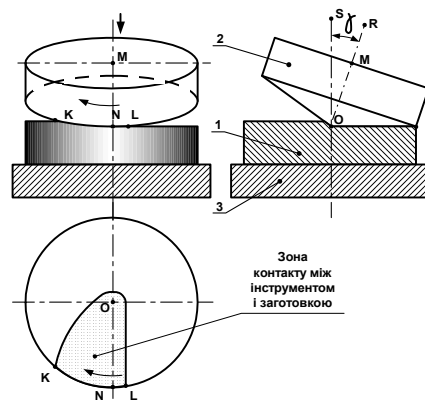


Рис. 1. Загальна схема штампування обкочуванням

В свою чергу, вісесиметричні в плані деталі мають розгалужені конструктивні особливості (рис. 2). Головною класифікаційною відмінністю є відсутність або наявність центрального отвору, що не тільки впливає на технологічні особливості виготовлення, а є вирішальним при виборі початкової заготовки (циліндричної або кільцевої).

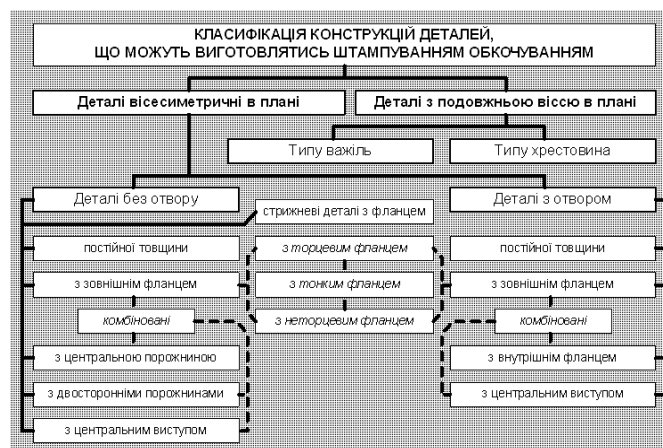


Рис. 2. Класифікація деталей за формою, що можуть ефективно виготовлятися ШО

Наступним рівнем класифікації є наявність та комбінація конструктивних елементів (фланців, порожнин, виступів) та їх розташування.

Осередок локальної пластичної деформації формується в зоні контакту з активним конічним інструментом, і визначається: 1) кутом прецесії – γ , він же є геометричним параметром активного інструменту, оскільки визначає кут нахилу твірної конічної поверхні; 2) частотою нутації (коливаль) осі активного інструменту – n ; 3) осьовою швидкістю зближення інструментів – v . Всі ці технологічні параметри процесу взаємопов'язані.

Одним з основних достоїнств штампування обкочуванням є 5...15-ти кратне зниження зусилля осьового навантаження, яке оцінюється показником λ (де: λ – коефіцієнт співвідношення площ, $\lambda = FK/F$; FK – площа контактної осередку між активним інструментом і заготовкою; F – площа торця заготовки). У якості оптимального прийняте найбільше значення показника $\lambda = (1/12,6)$ при якому поверхневе хвилеутворення не спостерігається.

В залежності від відносних розмірів контакту можливі три варіанти переважного течії. При $\lambda < (1/4,5)$ матеріал впливає радіально і позаконтактна частина заготовки не істотно впливає на характер розподілу контактних напружень. У межах значень $(1/4,5) < \lambda < (1/12,6)$ (оптимальний режим) розвивається тангенціальний перебіг і при $\lambda \approx (1/12,6)$ радіальне витікання можливо тільки у вільного кругового краю. Локалізований приконтактний осередок обмежений тим, що до нього примикають жорсткі зони, які повертаються під дією тангенціальних напружень. Подальше підвищення λ призводить до істотного пластичного спучування переднього фронтального контуру у вигляді хвилі.

В результаті аналітичних та експериментальних досліджень визначення та розподілу питомих зусиль встановлені їх значення та розподіл вздовж і поперек контактного осередку [7]. Максимальні значення питомих зусиль на локалізованому осередку пластичної деформації становлять $p_{max} = (4...5)\sigma_s$, мінімальні $p_{min} = \sigma_s$ (де σ_s – межа пластичності). Діапазон зміни середніх питомих зусиль визначається в залежності від геометрії осередку деформації, виду деталі та співвідношення розмірів заготовки:

– для циліндричної заготовки:

а) із співвідношенням розмірів $d/h < 4$ (де d – діаметр; h – висота) $p_{cp} = (2,2...2,6) \sigma_s$;

б) із співвідношенням розмірів $d/h > 4$ $p_{cp} = (1,8...2,1) \sigma_s$;

– для кільцевої заготовки $p_{cp} = (1,5...1,7) \sigma_s$.

Такий розбіг значень середніх питомих зусиль пояснюється тим, що в кожному з зазначених випадків мають місце відмінні схеми протікання пластичних контактних і позаконтактних деформацій та відповідного напружено-деформованого стану [8].

Якщо вважати, що швидкість робочого ходу відповідає середній швидкості робочого ходу традиційного гідравлічного обладнання $v = 30...50$ мм/с то можна однозначно визначитись із частотою обкочувальних рухів активного інструменту – n .

Концептуально рентабельним об'єктом технологічних розробок в напрямку ШО є номенклатура вісесиметричних деталей типу заготовок шестерень, кареток синхронізаторів автомобільних коробок передач, катків ходової частини гусеничних тракторів, фігурних фланців трубопроводів хімічної апаратури та ін. Розробки подібних технологічних процесів та відповідних досліджень проведені на кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «КПІ». Прикладом служить дослідження з модернізації виробництва деталей «тарілка пружини клапану» двигуна внутрішнього згоряння (рис. 3). Кінцевим результатом розробок є зниження матеріальних витрат на 24 %, надалі сумарний економічний показник становить приблизно 38 % від діючої собівартості.

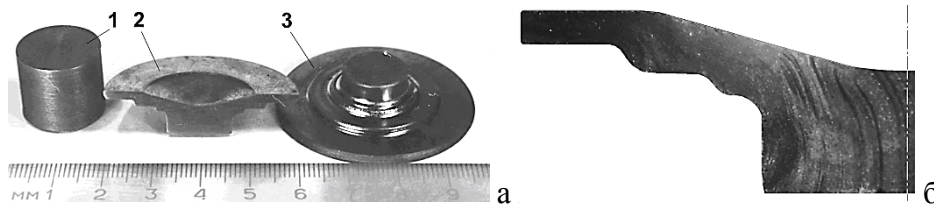


Рис. 3. Заготовка 1 і штамповані обкочуванням деталі 2, 3 (а) та структура волокон (б)

У якості заготовки використовувалась ефективна циліндрична заготовка, що забезпечило отримання необхідної формозміни, яка визначена особливостями деформування заготовки з відповідними співвідношеннями геометричних розмірів (в даному випадку $d/h = 1$). Як видно з рисунку на рис. 3 деталь має розвинуту фланцеву частину. Експериментальне дослідження осаджування (висаджування) циліндричної заготовки з такими та близькими співвідношеннями розмірами вказує на специфічну формозміну циліндричної заготовки, що зводиться до набуття грибоподібної форми. Такі ж результати отримані при імітаційному моделюванні за допомогою методів скінчених елементів.

Розрахункова модель відтворена для осаджування високого зразка із Ст.20А з початковим співвідношенням $d/h = 1$; активним інструментом при куті нахилу його осі $\gamma = 2^\circ 30'$ та подачі $S = 0,6$ мм/об; із умовою жорсткої прив'язки поверхні активного інструменту та обкочуваної поверхні і на плоскому нижньому штампі при $\mu = 0,1$; при абсолютній жорсткості інструменту. При розрахунках застосовувалось розбивання на 8-ми вузлові скінчені елементи. Моделювання проводилось із застосуванням пакету Abaqus/Standart 6.9-1.

Оскільки доведено, що при штампуванні обкочуванням має місце складна циклова схема навантаження, яка призводить до уповільненого зміцнення, то для цього матеріалу застосовували залежності: для зміни межі текучості $\sigma_S = \sigma_{02} = 23 + 1,73 \cdot \varepsilon_{0,6}$ [кгс/мм²]; для твердості $HV = 100 + 4,83 \cdot \varepsilon_{0,55}$, які відповідають експериментальним вимірюванням.

Результати моделювання наведені на рис. 4 при висотній деформації $\varepsilon_z = 28\%$ та $\delta\rho = \delta D = 0,25$. На рис. 4, а наведений розподіл σ_z вздовж вертикального перерізу, що проходить по середині бічної дуги контакту, а на рис. 4, б – розподіл деформацій за відповідним напрямом.

Моделювання підтверджує наступні якісні ефекти осаджування обкочуванням:

- постійність радіальних напружень вздовж осередку деформацій, в центральній зоні та в периферійній контактній зоні;
- наявність позаконтактної зони у вигляді шарніру пластичності, що протилежить контактній, та наявність в ній тангенціальних напружень розтягування;
- відповідність зовнішньої формозміни експериментальним результатам, в перше чергу це стосується відсутності деформування нижньої частини заготовки та утворення специфічної грибоподібної форми;
- відповідність розподілу контактних напружень до результатів експериментальних досліджень.

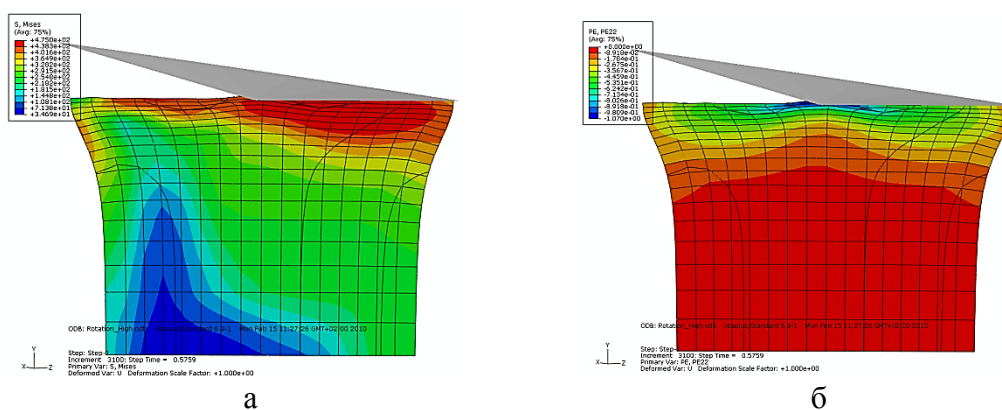


Рис. 4. Розподіл напружень (а) та деформацій (б) вздовж вертикальної площини

Підвищений ефект від ШО можна отримати при застосуванні ефективної і кільцевої заготовки. Пріоритетним напрямом, який враховує якісні можливості ШО, є застосування кільцевих виробів із зігнутої та звареної прямолінійної заготовки [9] (рис. 5, а). Після пластичного формоутворення ШО (рис. 5, б) якість зварного шва відповідає характеристикам основного матеріалу (рис. 5, в).

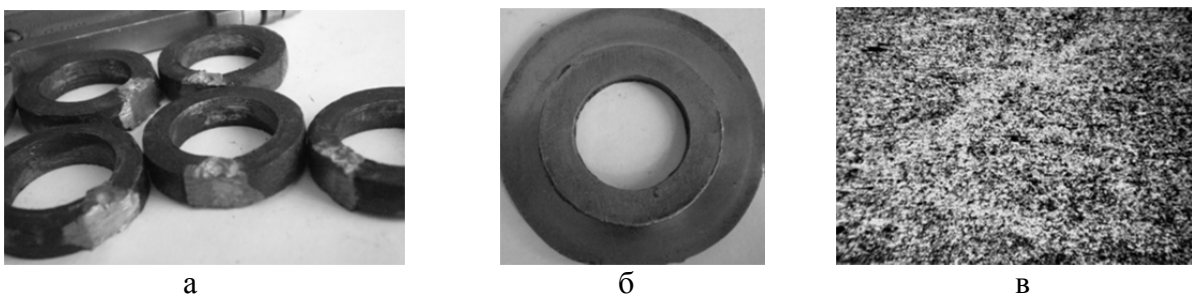


Рис. 5. Зварні кільцеві заготовки (а), фланцева деталь після ШО (б) та межа між основним металом заготовки та зоною зварного шва після ШО при збільшенні $\times 100$ (в)

Характерним об'єктом деталей з тонким фланцем є номенклатура деталей електрокерамічних виробів. Прикладом служить манжети одержувані штампуванням з ковару (Cu-Ni сплав) (рис. 6). Коефіцієнт використання металу базової технології досягає 0,2. Поєднання металевої основи з керамічним ізолятором є типовим для більшості електрокерамічних виробів: вакуумних комутаторів, потужних напівпровідникових приладів, високовольтних конденсаторів та ін. При штампуванні моноблочних корпусів обкочуванням необхідність у коваровій манжеті 2, як і у застосуванні паяння деталей 2 і 3, відпадає. При ШО заготовка 4

набуває форми моноблочної основи з манжетою 5 або 6, відповідно, діоду або тиристору. Усувається механічна обробка, за винятком притирання торців. Товщина манжетної частини деталей 5 та 6 становить $0,3 \pm 0,05$ мм. Коефіцієнт використання дефіцитної вакуумної міді М0Б ГОСТ 10988-85 складає 0,96. Кільцевий відхід 7 легко перероблюється. Собівартість виробу знижується приблизно втричі.

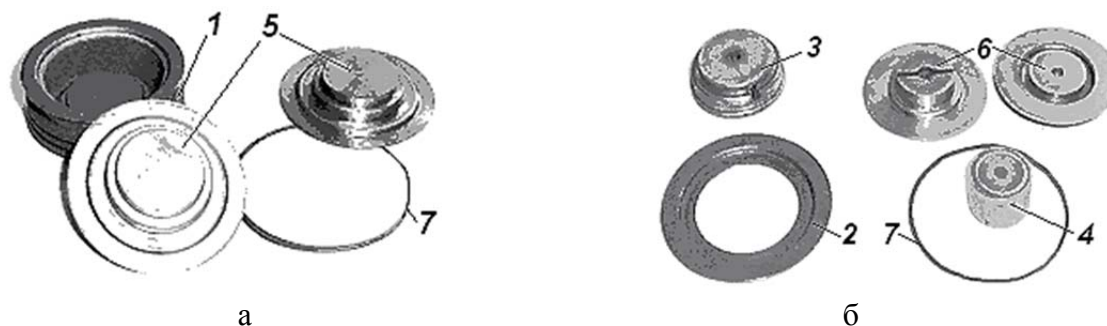


Рис. 6. Деталі потужних пігулкових діода (а) і тиристора (б):

1 – керамічна основа; 2, 3 – манжета та основа виготовлені за базовою технологією; 4 – заготовка за новою технологією; 5 – моноблочна деталь – основа з фланцем діоду; 6 – моноблочна деталь – основа з фланцем тиристора; 7 – відхід за новою технологією

Метод ефективний для виготовлення набірної труби теплообмінника (рис. 7, а). Основна перевага запропонованої конструкції полягає, у відсутності з'єднання між ребром і трубою. За наявності відповідного з'єднання порушується теплопровідність і, як наслідок, знижується ефективність теплообміну. Послідовність операцій виготовлення наведена на рис. 7, б.

Розглянуті приклади стосуються деталей, які не мають альтернативних методів ефективного промислового виробництва. Але в багатьох випадках можливість ШО виготовляти порівняно тонкі фланці використовується лише з метою економії кольорових металів і сплавів.

Останній приклад свідчить про ефективне застосування ШО в поєднанні із використанням ефективною (в даному випадку листової) заготовки. Відповідне поєднання має місце і при виготовленні деталей тиристорів та діодів із циліндричної заготовки. Таку заготовку можна вважати ефективною при співвідношенні діаметра до висоти ≈ 1 (див. рис. 3, рис. 6). Однак отримати її з відповідною якістю та перпендикулярністю торця можливо або різанням (що знижує ефективність), або методами із застосуванням відокремлення обкочуванням [10].

Схема навантаження і деформування при штампуванні обкочуванням приводить до ряду позитивних ефектів, які забезпечують ресурсозбережність процесу [3, 4, 6]:

- зниженню зусилля деформування в порівнянні з традиційними методами в 5...20 разів;
- зменшенню впливу контактного тертя;
- досягненню рівномірності деформації в пластичній зоні;
- збільшенню граничного ступеня деформації в порівнянні зі звичайним штампуванням на 15...20 %;
- збільшенню стійкості штампового оснащення;
- можливістю виготовлення деталей в холодному стані;
- зведення до мінімального рівня наступної механообробки різанням;
- створенню технологічних процесів і устаткування, що відповідають високим вимогам безпеки, умов праці та екології;
- можливістю механізації і автоматизації;
- зменшенню розмірів, ваги і вартості обладнання і штампового оснащення;
- можливістю використання переваг холодного зміцнення, одержання оптимальної передбаченої структури;
- можливістю реалізації штампуванням обкочуванням широкого спектру операцій об'ємного і листового штампування.

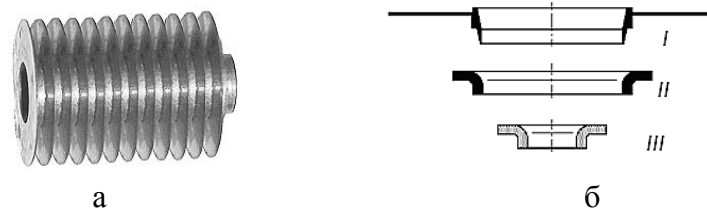


Рис. 7. Набірна труба теплообмінника (а) та технологічні операції виготовлення окремого елементу теплообмінника (б), де: I – готова деталь; II – відбортована заготовка; III – заготовка меншого типорозміру, що отримана з відходів від попередньої деталі

ВИСНОВКИ

На основі розглянутих технологічних процесів визначена сутність та сформульовані основні переваги технології штампуванням обкочуванням, що дає змогу визначити основні напрямки розвитку, вдосконалення та застосування методу як ресурсозберігаючого. При цьому важливе місце займають технологічні процеси отримання ефективної циліндричної або кільцевої заготовки, які також базуються на принципах локалізації осередку пластичної деформації. Що, в свою чергу, свідчить про комплексне застосування штампування обкочуванням як при отриманні заготовки, так і при кінцевому формоутворенні з отриманням максимального ефекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Механизированный участок изготовления кольцевых заготовок методом горячей раскатки* / Деметьев В. П. и др. // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – № 1. – С. 14–15.*
2. *Гринфельд Л. А. Автоматическая линия для производства заготовок крупных колес и бандажных колес* / Л. А. Гринфельд, В. А. Агеенко // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – № 12. – С. 20–22.*
3. *Кривда Л. Т. Теорія і практика штампування обкочуванням : монографія* / Л. Т. Кривда. – Київ, 1998. – 179 с.
4. *Гожій С. П. Засади і проблеми використання ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском* / С. П. Гожій // *Технологические системы. – 2006. – № 2 (34). – С. 64–68.*
5. *Лазуткин Г. С. Совершенствование технологии изготовления колец подшипников* / Г. С. Лазуткин, Л. А. Гринфельд // *Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 8. – С. 16–17.*
6. *Гожій С. П. Штампування обкочуванням як засіб ресурсозбереження* / С. П. Гожій, Л. Т. Кривда // *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2006. – № 2(46). – С. 55–60.*
7. *Кривда Л. Т. Вплив обкочування на середнє питоме зусилля при осаджуванні* / Л. Т. Кривда, С. П. Гожій, А. Г. Абиєв // *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – 2003. – № 44. – С. 41–43. – (Серия «Машиностроение»).*
8. *Гожій С. П. Модель деформацій при осаджуванні обкочуванням високого циліндричного зразка* / С. П. Гожій // *Машинознавство. – 2009. – № 7 (145). – С. 34–37.*
9. *Пат. 15241 Україна. Спосіб виготовлення кільцевих деталей* / Кривда Л. Т., Гожій С. П.; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u20512818; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6. – 7 с.
10. *Пат. 30822 Україна. Спосіб відокремлення заготовок обкатуванням* / Кривда Л. Т., Гожій С. П., Кривда Є. О.; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u2007133371; заявл. 30.11.2007; опубл. 11.03.2008, Бюл. № 5. – 7 с.

Гожій С. П. – д-р техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;
 Кліско А. В. – аспірант НТУУ «КПІ»;
 Носенко А. І. – аспірант НТУУ «КПІ»;
 Лавріненков А. Д. – аспірант НТУУ «КПІ».

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ.

E-mail: k_OMD@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 23.03.2012 р.