

Розробка рекомендацій для автоматизованого проектування процесів осадження профільованих заготовок

О. Є. Марков • В. М. Злигорєв • О. В. Герасименко • В. В. Панов • Р. Ю. Житніков • Ю. О. Іванова

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

Received: 03 September 2019 / Accepted: 30 September 2019

Анотація. Запропоновано метод кування заготовок, який має на меті осадження профільованих злитків. Запропоновано методіку теоретичного дослідження залежностей зменшення розмірів осьової пористості в заготовках на основі скінчено- елементного моделювання. Базовим показником для дослідження була обрана висота виступів чотирипроменевої заготовки. Висота виступів чотирипроменевої заготовки змінювалась в інтервалі 0,75; 0,80 і 0,85. Кут виступів чотирипроменевої заготовки дорівнював 115°. На основі скінчено-елементних досліджень були встановлені середні напруження при осадженні профільованих злитків. На основі цього параметру встановлювався параметр напруженого стану в центральній частині поковки. Запропонована методика проведення експериментів. Експерименти проводилися на моделях зі свинцю та сталі. В результаті скінчено-елементного моделювання визначено, що раціональна відносна висота виступів становить 0,85. Таке співвідношення призводить до максимального зменшення розмірів осьової пористості. Це можна пояснити значною величиною стискаючих середніх напружень при деформуванні осадженням профільованих заготовок. Визначена раціональна величина обтискання, коли проходить максимальне зменшення розмірів осьової пористості. Визначено середні напруження за об'ємом поковки та зміння параметра напруженого стану осадженої профільованої заготовки. Закриття осьової пористості доведено експериментами на моделях зі свинцю та сталі. Впроваджено запропонований спосіб деформування чотирипроменевих профільованих заготовок. Аналіз результатів УЗК дозволив визначити, що виготовлені вироби позбавлені осьових порожот, які вище за вимоги замовника. В результаті встановлена доцільність операції осадження профільованих злитків, що дозволило підвищити щільність внутрішньої будови крупногабаритних заготовок.

Ключові слова: виступи, операція осадження, напружений стан, осьова пористість, високоякісні вироби

Вступ

У роботі [1] проаналізовані різні методи кування заготовок відповідального призначення. Було виявлено, що відомі методи деформування відрізняються видом застосовуваних ковальських операцій, термомеханічних режимів деформування й використанням спеціального ковальського інструмента [2]. У роботі не вирішеним залишилося питання, щодо підвищення щільності внутрішньої будови в крупних заготовках на основі використання нових схем деформування. Крім цього, не запропоновані методи кування, які б забезпечували закриття осьової пористості під час деформації.

У роботі [3] визначено, що на сьогодні значно зріс попит у крупних заготовках, які куються із використанням операції осадження. Контроль таких виробів проводиться за механічними властивостями, макроструктурі й залишковим напруженням. Було визначено, що відомі техпроцеси кування не гарантують високої якості. Однак у дослідженні не запропоновано спеціальні методи осадження, які б дозволили підвищити якість крупногабаритних заготовок. Тому слід розробляти нові схеми деформування, що будуть сприяли закриттю осьової пористості злитків.

Дослідження, що наведені у роботі [4] показали, що для закриття осьової пористості злитка необхідно провести попереднє його протягування. У роботі запропоновано параметр для оцінки величини закриття осьової пористості у процесі кування, який враховує розподіл напружень у процесі деформування. Було визначено, що деформування уздовж осі злитка без попереднього протягування не зменшує розміри осьової рихлості. У роботі не виявлено вплив геометрії деформуючого інструменту на рівномірність проробки структури заготовок. У свою чергу рівномірність проробки структури заготовки визначає нерівномірність механічних властивостей деталі що виготовляється.

Величина деформації при куванні є основним чинником, який визначає проробку металу заготовки, як було встановлено у роботі [5]. Однак порівнювати різні варіанти техпроцесів виготовлення заготовок необхідно на базі інформації з розподілу середніх напружень в об'ємі заготовки. Це не було зроблено у дослідженні та

може слугувати завданням для подальших досліджень для удосконалення техпроцесів виготовлення деталей відповідального призначення.

Надмірне розширення лікваций в середній частині зливка в процесі осадження є причиною незадовільної щільності внутрішньої будови деталі після механічної обробки [6]. Проте у дослідженні не виявлено вплив профілювання заготовки на зміну напруженого стану (НС) при осадженні.

Не вирішеними на сьогодні залишаються питання удосконалення техпроцесів кування виробів відповідального призначення, що дозволило б підвищити якість продукції що випускається. На виробництві використовується процес осадження заготовок, які мають циліндричну форму. Цей процес характеризується несприятливим напружено-деформованим станом НДС у металі заготовки під час осадження, що призводить до появи внутрішніх розривів та тріщин.

Альтернативою осадження заготовок циліндричної форми є попереднє формування на заготовці виступів [7, 8]. Зміна поперечного перерізу заготовки за рахунок формування виступів дозволить змінити НС металу при осадженні. Виступи заготовки будуть забезпечувати підпір металу при деформації, що буде сприяти зменшенню рівня середніх напружень що розтягують у металі заготовки. Це дозволить виключити тріщиноутворення та зменшити відсоток браку. Поздовжні виступи легше отримати на заготовці, що робить спосіб простішим для реалізації. Для цього необхідно провести дослідження, які дозвольть встановити ефективний профіль заготовки з виступами, що буде сприяти закриттю осьової пористості злиwkів.

Мета

Мета роботи – розробка способу та технологічних рекомендацій, що будуть сприяти закриттю осьової пористості на основі застосування осадження профілюваних злитків, що дозволить підвищити якість крупних заготовок та автоматизувати процес профілювання злитків.

Для цього були поставлені та вирішені наступні завдання:

- оцінити вплив геометрії чотирипроменевої заготовки на НС і закриття осьової пористості при осадженні, що дозволить розробити технологічні рекомендації для обтискання злитка;
- перевірити теоретичні результати експериментальними дослідженнями змінення розмірів осьової пористості при профілюванні й осадженні профілюваних заготовок;
- провести промислові експерименти техпроцесу осадження профілюваних злитків.

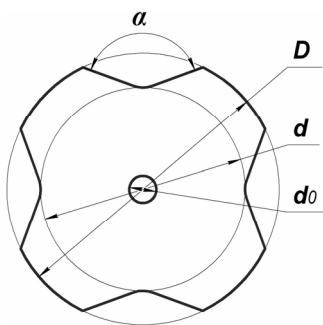


Рис. 1. Поперечний переріз чотирипроменевої заготовки

Теоретичний аналіз осадження профілюваних злитків проводився на основі скінчено-елементного моделювання. Результатами розрахунків є розподіл напружень, а також зміна форми й розмірів осьової пористості при осадженні. Величина обтискання при осадженні становила 50 %, як рекомендована величина для одержання достатньої проробки металу [9]. Вихідна заготовка мала наступні параметри: зовнішній діаметр 1,5 м та висоту 3,75 м. Діаметр осьової пористості становив 0,1 від діаметру виступів заготовки (рис. 1).

Заготовка мала виступи з ухилом в 115° . Відносна висота виступів (d/D) змінювалась в інтервалі 0,75; 0,80; 0,85. Матеріал моделі – 34ХН, температура деформування складала 1180°C , швидкість руху осадочних плит 35 мм/с [10]. Параметр НС в осьовій зоні, який обґрунтовано у роботах [11–15], визначався за формулою Г.О. Смирнова-Аляєва

$$\Pi_\sigma = \frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i},$$

де σ_{cp} , σ_i – гідростатичні напруження та інтенсивність напружень, відповідно, МПа.

Запропонована методика неруйнівного виміру розмірів осьової пористості для встановлення впливу осадження профілюваних злитків на закриття осьової пористості. Методика передбачала свердління отвору (рис. 2, а, б) діаметром 0,1 від діаметру виступів заготовки. Отриманий отвір був з'єднаний за допомогою гнучкої трубки з волюметром. Зміна розмірів осьової пористості при осадженні призводить до зміни об'єму рідини. Діаметр свинцевих та сталевих моделей (рис. 2, в) становив 50 мм, осьовий отвір мав діаметр 5 мм. Верифікація результатів закриття осьової пористості на свинцевих моделях проводилась експериментальними дослідженнями на сталі 34ХН. Осьова пористість моделювалася штучним дефектом діаметром 4 мм.

Заготовки попередньо профілювали деформуючим інструментом з кутом 115° (рис. 2, з) для утворення виступів. Ступінь обтискання дорівнювала 15; 20 та 25 % $((D-d)/D)$.

Для розробки ефективних технологічних режимів кування необхідно встановити закономірності розмірів осьової пористості від величини обтискання при осадженні. Для кількісної оцінки ступеня закриття осьової пористості були розраховані дані по зміні величини відносного діаметра осьової пористості від величини обтискання (рис. 3). Загальна закономірність отриманих результатів моделювання для різних перерізів

заготовок: закриття осової пористості відбувається після осадження на 15 %; інтенсивність зменшення розмірів осової пористості для різних заготовок відрізняється максимум на 10 %. Заготовки з відносною висотою виступів 0,85 при ступені деформації 40 % мають найменше значення відносної осової пористості, d_1/d_0 становить 0,6 (що означає закриття осової пористості відбувається на 40 %). Рекомендована величина обтискання, яка буде забезпечувати закриття осової пористості, повинна бути більше 50 %.

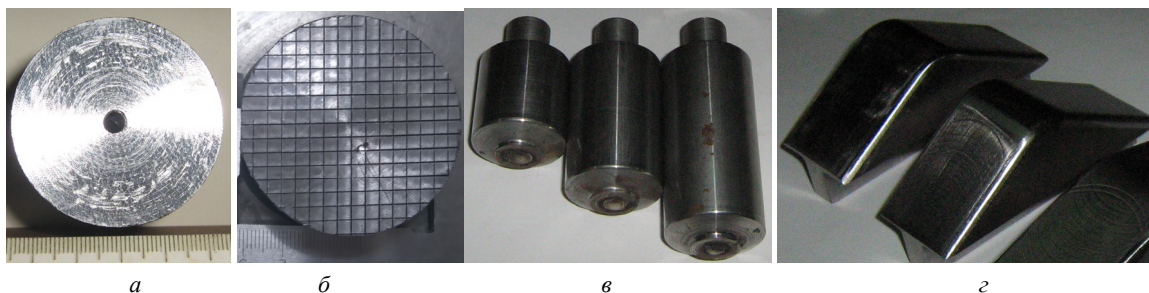


Рис. 2. Моделі заготовок та бойки для експериментальних досліджень: *a* – свинцеві зразки; *б* – координатна сітка; *в* – сталеві зразки; *г* – випуклі бойки для профілювання

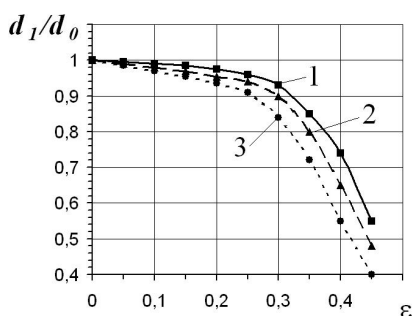


Рис. 3. Зміна відносного діаметру осової пористості залежно від величини обтискання для різних відносних висот виступів: 1 – 0,75; 2 – 0,80; 3 – 0,85

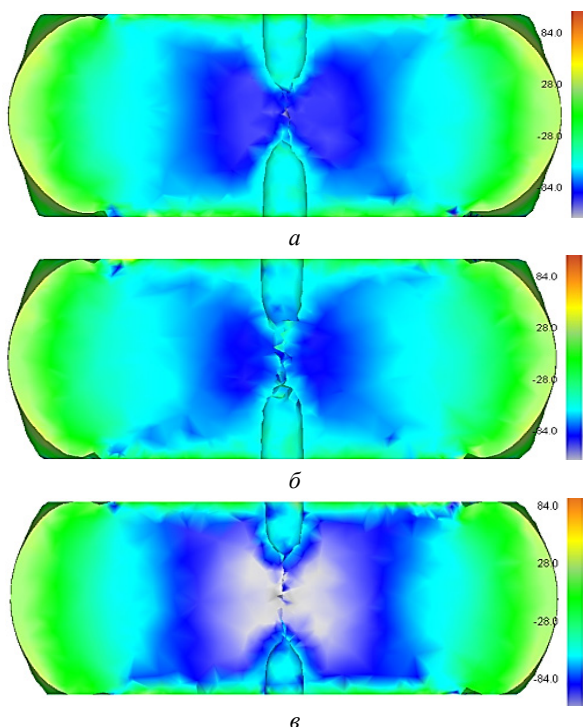


Рис. 4. Середні напруження після осадження профільованих заготовок для різних відносних висот виступів: *a* – 0,75; *б* – 0,80; *в* – 0,85

Залежність зміни розмірів і форми осової пористості при осадженні профільованих литків з різною висотою виступів представлені на рис. 3. Аналізуючи результати осадження профільованих злитків було визначено, що для усіх досліджуваних варіантів спостерігається закриття осової пористості на середині висоти заготовки. Кількісне порівняння величини закриття осової пористості при осадженні заготовок на 50 % з різною висотою виступів представлено на рис. 3. Діаметр осової пористості, розрахований через його об'єм і висоту осадженої заготовки, залежить від висоти виступів заготовки. Інтенсивність закриття осової пористості (рис. 3) вище при осадженні заготовок із відносною висотою виступів 0,85. Висота виступів більше 20 % не призводить до зменшення розмірів осової пористості при осадженні. Для кута виступів 115° зі збільшенням їх висоти ступінь закриття осової пористості збільшується.

На рис. 4 показаний розподіл середніх напружень у меридіональному перерізі поковки при осадженні на 50 %. Деформування профільованих злитків призводить до змінених НС заготовки. Максимальні стискаючі середні напруження (-65 МПа) утворюються у місці осової пористості для висоти виступів 15 % (рис. 4, *в*). Збільшення висоти виступів призводить до зниження величини й площі стискаючих середніх напружень. Змодельовані способи осадження характеризуються наявністю стискаючих середніх напружень в середній частині поковки (рис. 4).

Аналіз змінених розмірів пористості дозволив визначити, що максимальне закриття відбувається при осадженні заготовок з відносною висотою виступів 0,85. Такі результати можна пояснити розподілом напружень в центрі заготовки під час деформування. Параметр НС (P_σ) зі знаком «мінус» (рис. 5) доводить перевагу стискаючих напружень. Як результат,

збільшується закриття осьової пористості. Загальною характеристикою осадження профільованих злитків є збільшення величини стискаючих середніх напружень в середній частині поковки при підвищенні величини обтискання. Заготовка з відносною висотою виступів 0,85 має високу величину напружень що стискають при деформації 50 %.

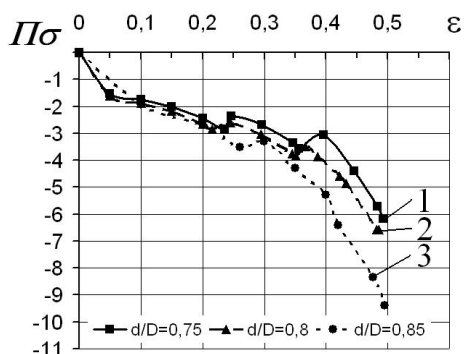
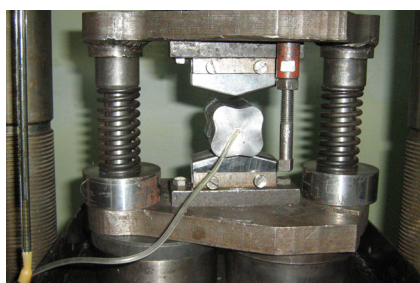


Рис. 5. Параметр ПС при осадженні профільованих злитків з відносними висотами виступів: 1 – 0,75; 2 – 0,80; 3 – 0,85



а



б

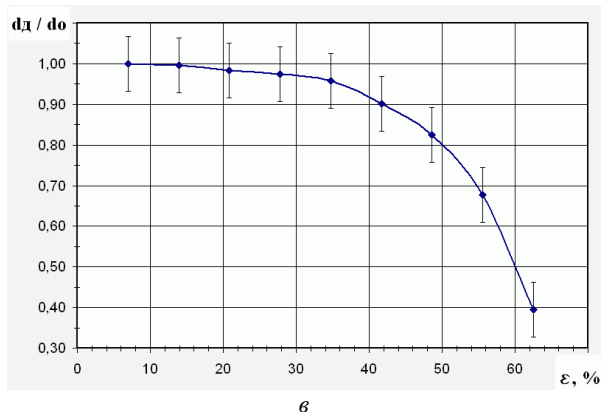


Рис. 6. Експериментальні дослідження:

а – профільовання заготовки; б – осадження профільованої моделі; в – змінення відносного діаметру осьової пористості при осадженні

Свинцева профільована та осаджена заготовка з підключеним шлангом для вимірювання кількості витисненої води наведена на рис. 6. Закономірність закриття осьової пористості при осадженні свинцевих моделей для різних висот виступів, представлені на рис. 6, в.

Кут виступів 115° призводить до закриття осьової пористості при осадженні (рис. 6, в). Це можна пояснити збільшенням величини стискаючих напружень чотирипроменевої заготовки під час осадження, як це було встановлено у теоретичному дослідженні (рис. 5). Встановлені залежності дозволили визначити, що закриття осьової пористості при осадженні профільованих злитків проходить при обтисканні більш 25 % (рис. 6, в). Після деформування на 60 % діаметр осьової пористості зменшується на 70 % (рис. 6, в). Встановлені результати збігаються з даними, отриманими при теоретичному дослідженні (рис. 3).

Результати з формозмінення й зменшення розмірів осьової пористості на свинцевих зразках перевірялися експериментом на сталі. Нагріті заготовки профільовали випуклим інструментом з кутом 115° з величиною обтискання за два проходи 20 %. По закінченню профільовання відбувалося осадження на половину висоти заготовки (рис. 7).

Після підготовки площини розрізу проводився макроструктурний аналіз слідів осьової пористості. Деформування чотирипроменевої заготовки бойками з кутом 115° та величиною обтискання 20 % дозволило визначити величину закриття осьової пористості. Встановлені результати дозволили визначити, що для досліджуваного способу після деформування проходить неповне закриття осьової пористості.

Отримані результати перевірялися у виробничих умовах при осадженні злитків вагою 35 т (рис. 8). Відмінність запропонованого техпроцесу полягає у використанні профільовання заготовки випуклим бойком на плоскій плиті зі ступенем обтискання 20 %. Після осадження на заготовці відсутня діжкоподібність, що підтверджує змінення ПС, що сприяє збільшенню величини напружень що стискають. Як результат – не виникає утворення тріщин при осадженні. Для запропонованого техпроцесу був знижений коефіцієнт уковування з 2,5 до 2,0. Заготовки проходили ультразвуковий контроль (УЗК).

Основна частина першої деталі не має дефектів з розмірами більш ніж 2 мм. УЗК другої деталі, має схожі результати. В центральній частині деталі залишаються одиночні дефекти з розмірами не більш 4...6 мм, що нижче висуваєних вимог.

Якісну та кількісну схожість результатів розподілу середніх напружень при осадженні можна пояснити



Рис. 7. Осьова пористість після осадження чотирипроменевої заготовки

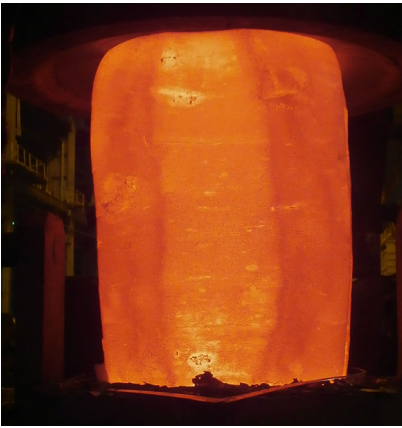


Рис. 8. Апробація запропонованого осадження профільованих злитків

Проведені дослідження є важливими науково-практичними напрацюваннями та можуть бути корисними для теорії та практики процесів кування заготовок відповідального призначення. З практичної точки зору виявлений залежності зменшення розмірів осьової пористості заготовки під час осадження дозволяє визначити умови використання запропонованого способу деформування в технології кування крупних заготовок. Прикладним аспектом використання отриманого результату є можливість удосконалення техпроцесу виготовлення заготовок відповідального призначення у важкому машинобудуванні.

Висновки

Осьовий дефект при осадженні інтенсивніше закривається при відносній висоті виступів у діапазоні 0,8...0,85. Такі геометричні параметри можуть бути рекомендовані як ефективні з погляду підвищення якості осьової частини поковки в процесі осадження.

На основі експериментальних даних виявлено, що заварювання осьової пористості відбувається при осадженні профільованих злитків на 25 %. Рекомендована величина обтискання, при якій проходить зменшення розмірів осьової пористості, складає більш за 50 %. Після деформації на 60 % розмір осьової пористості зменшується на 70 %.

Були розроблені й апробовані на виробництві нові техпроцеси виготовлення крупних заготовок із використанням операції осадження профільованих злитків. Виготовлені деталі відповідають умовам стандарту SEP 1921. Аналіз результатів УЗК доводить ефективність осадження профільованих злитків з точки зору зменшення розмірів осьової пористості злитка. А саме, розмір осьової пористості зменшився з 7...8 мм для базової технології до максимум 4...6 мм для запропонованої.

References

1. Banaszek G., Stefanik A. Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects. J. Mater. Proc. Technol. – 2006. – Vol. 177. – P. 238–242.
2. Scarabello D., Ghiotti A., Bruschi S. FE modelling of large ingot hot forging. Int. J. of Mater. Form. – 20103. Vol. 3. – P. 335–338.

однаковим об'ємом металу заготовки та однаковими граничними умовами деформування. Закриття дефектів в середній частині заготовки пояснюється виникненням у цій частині стискаючих напружень. Зменшення розмірів внутрішніх дефектів після деформування на 15...25 % для досліджуваних способів деформування пояснюється виникненням максимальних деформацій в центральній частині заготовки.

Максимальну ступінь зменшення розмірів осьової пористості при осадженні чотирипроменевих злитків з відносною висотою виступів 0,85 можна пояснити максимальними стискаючими середніми напруженнями. Збільшення величини стискаючих напружень в центральній частині при збільшенні величини обтискання пояснюється виникненням інтенсивних деформацій. Переваги запропонованого осадження профільованих злитків:

– Закриття осьової пористості починає відбуватися при осадженні на 15 %. При осадженні на 40 % найменше значення відносною осьової пористості d_1 / d_0 становить 0,6 для відносною висоти виступів 0,85. Заготовка з відносною висотою виступів 0,85 та ухилі 115° забезпечує високу величину стискаючих середніх напружень ($P\sigma = -9$) при осадженні на 50 %.

– Стискаючі напруження утворюються у місці внутрішньої осьової пористості при висоті виступів 15 %, що позитивно вплине на закриття осьової пористості заготовки при малих величинах профілювання.

– При підвищенні величини обтискання збільшується рівень середніх напружень в центрі поковки, що призводить до закриття осьової пористості у порівнянні з традиційним осадженням циліндричних заготовок.

– Обробка результатів УЗК доводить ефективність способу осадження заготовки з виступами на зменшення розмірів осьової пористості злитка.

3. Chenot J.-L., Fourment L., Ducloux R., Wey E. Finite element modelling of forging and other metal forming processes. *Int. J. of Mater. Form.* – 2011.3. – P. 359–362.
4. Skubisz P., Łukaszek-Solek A., Kowalski J., Sińczak J. Closing the internal discontinuities of ingots in open die forging. *Steel Research International.* – 2008. Vol. 79. – P. 555–562.
5. Meng F., Labergere C., Lafon P. Methodology of the shape optimization of forging dies. *Int. J. of Mater. Form.* – 2010. – Vol. 3. – P. 927–930.
6. Nowak J., Madej L., Grosman F., Pietrzyk M. Material flow analysis in the incremental forging technology. *Int. J. of Mater. Form.* – 2010. – Vol. 3. – P. 931–934.
7. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings. *J. Mater. Proc. Technol.* – 1998. – Vol. 57. – P. 129–140.
8. Kim Y., Cho J., Bae W. Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot. *J. Mater. Proc. Technol.* – 2011. – Vol. 211. – P. 1005–1013.
9. Turin V.A. Some methods for quality control of large ingots. *Forging and stamping production.* – 1977. – Vol. 11. – P. 35–39.
10. Valberg H.S. *Applied Metal Forming*, CUP. Cambridge. – 2010.
11. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool / O. Markov, M. Kosilov, V. Panov, V. Kukhar, S. Karnaukh, N. Ragulina, P. Bochanov, P. Rizak // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2019. Vol. 6/1(102). – P. 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>
12. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. Development of a new process for expanding stepped tapered rings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2019. 2/1(98). – P. 39–46. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>
13. Markov O., Gerasimenko O., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R., Puzyr. R. Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2019. – 3/1(99). – P. 42–48. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>
14. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. () Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering.* – 2019. – Vol. 2. – P. 52–60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00877>

Разработка рекомендаций для автоматизированного проектирования процессов осадки профилированных заготовок

О. Е. Марков, В. Н. Злыгорев, А. В. Герасименко, В. В. Панов, Р. Ю. Житников, Ю. О. Иванова

Аннотация. Предложен методковки заготовок, который заключается в осадке профилированных слитков. Предложена методика теоретического исследования зависимостей уменьшения размеров осевой пористости в заготовках на основе конечно-элементного моделирования. Базовым показателем для исследования была выбрана высота выступов четырехлучевой заготовки. Высота выступов четырехлучевой заготовки менялась в интервале 0,75; 0,80 и 0,85. Угол выступов четырехлучевой заготовки равен 115°. На основе конечно-элементных исследований были установлены средние напряжения при осадке профилированных слитков. На основе этого параметра устанавливался параметр напряженного состояния в центральной части поковки. Предложенная методика проведения экспериментов. Эксперименты проводились на моделях из свинца и стали. В результате конечно-элементного моделирования определено, что рациональная относительная высота выступов составляет 0,85. Такое соотношение приводит к максимальному уменьшению размеров осевой пористости. Это можно объяснить значительной величиной сжимающих средних напряжений при осадке профилированных заготовок. Определена рациональная величина обжатия, когда проходит максимальное уменьшение размеров осевой пористости. Определены средние напряжения по объему поковки и изменение параметра напряженного состояния осажённой профилированной заготовки. Закрытие осевой пористости доказано экспериментами на моделях из свинца и стали. Внедрен предложенный способ деформирования четырехлучевых профилированных заготовок. Анализ результатов УЗК позволил определить, что изготовленные изделия лишены осевых пустот, которые превышают требования заказчика. В результате установлена целесообразность операции осадки профилированных слитков, что позволило повысить плотность внутреннего строения крупногабаритных заготовок.

Ключевые слова: выступы, операция осадка, напряженное состояние, осевая пористость, высококачественные изделия

Development of recommendations for computer-aided design of profiled upsetting workpieces

O. E. Markov, V. N. Zlygorev, O. V. Gerasimenko, V. V. Panov, R. Yu. Zhytnikov, U. O. Ivanova

Abstract. A method of forging billets has been proposed, which consists in the upsetting of profiled ingots. A technique has been proposed for a theoretical study of the dependencies of axial porosity size reduction in workpieces based on finite element modeling. The baseline for the study was the height of the protrusions of the four-beam workpieces. The height of the protrusions of the four-beam workpieces varied in the range of 0.75; 0.80 and 0.85. The angle of the protrusions of the four-beam workpieces was 115°. Based on the finite-element studies, average stresses has been established during the upsetting of shaped ingots. Based on this parameter, the stress state parameter was set in the central part of the forging. The proposed technique of conducting experiments. The experiments were carried out on models of lead and steel. As a result of the finite element modeling, it was determined that the

rational relative height of the protrusions is 0.85. This ratio leads to a maximum decrease in the size of the axial porosity. This can be explained by the significant amount of compressive average stresses during the upsetting of profiled workpieces. A rational amount of compression is determined when the maximum reduction in the size of the axial porosity takes place. The average stresses in the forging volume and the change in the stress state parameter of an upsetting profiled workpieces are determined. The closure of the axial porosity has been proven by experiments on lead and steel models. The proposed method of deforming four-beam profiled workpieces has been introduced. Analysis of the USC results made it possible to determine that the manufactured products lack axial voids that exceed customer requirements. As a result, the expediency of the operation of the profiled ingots upsetting was established, which made it possible to increase the density of the internal structure of large-sized workpieces.

Keywords: protrusions, upsetting operation, stress state, axial porosity, high-quality products

References

1. Banaszek, G. and Stefanik, A. (2006), "Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects", *J. Mater. Proc. Technol.*, no. 177, pp. 238 – 242.
2. Scarabello, D., Ghiotti, A. and Bruschi, S. (2010), "FE modelling of large ingot hot forging", *Int. J. of Mater. Form.*, no. 3, pp. 335 – 338.
3. Chenot, J.-L., Fourment, L., Ducloux, R. and Wey, E. (2011), "Finite element modelling of forging and other metal forming processes", *Int. J. of Mater. Form.*, no. 3, pp. 359 – 362.
4. Skubisz, P., Łukaszek-Solek, A., Kowalski J. and Sińczak, J. (2008), "Closing the internal discontinuities of ingots in open die forging", *Steel Research International*, no. 79, pp. 555 – 562.
5. Meng, F., Labergere, C. and Lafon, P. (2010), "Methodology of the shape optimization of forging dies", *Int. J. of Mater. Form.*, no. 3, pp. 927 – 930.
6. Nowak, J., Madej, L., Grosman, F. and Pietrzyk, M. (2010), "Material flow analysis in the incremental forging technology", *Int. J. of Mater. Form.*, no. 3, pp. 931 – 934.
7. Park, C.Y. and Yang, D.Y. (1998), "A study of void crushing in large forgings", *J. Mater. Proc. Technol.*, no. 57, pp. 129 – 140.
8. Kim, Y., Cho, J. and Bae W. (2011), "Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot", *J. Mater. Proc. Technol.*, no. 211, pp. 1005 – 1013.
9. Turin, V.A. (1977), "Some methods for quality control of large ingots", *Forging and stamping production*, no. 11, pp. 35 – 39.
10. Valberg, H.S. (2010), *Applied Metal Forming*, CUP, Cambridge.
11. Markov, O., Kosilov, M., Panov, V., Kukhar, V., Karnaukh, S., Ragulina, N., Bochanov, P. and Rizak, P. (2019), "Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6/1(102), pp.19 – 25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>
12. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L., Shapoval, A. and Kosilov, M. (2019), "Development of a new process for expanding stepped tapered rings", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/1(98), pp. 39 – 46. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>
13. Markov, O., Gerasimenko, O., Khvashchynskyi, A., Zhytnikov, R. and Puzyr, R. (2019), "Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1(99), pp. 42 – 48. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>
14. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L. and Shapoval, A. (2019), "Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method", *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 2, pp. 52 – 60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00877>