

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМУВАННЯ ПУСТОТІЛИХ ЗАГОТОВОК БЕЗ ОПРАВКИ

¹Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ

Розроблено та досліджено новий спосіб кування товстостінних труб. Запропонований спосіб полягає в деформуванні пустотілої заготовки без оправки. Розроблено методику експериментального моделювання. Змінним параметром був відносний внутрішній діаметр пустотілої заготовки, який змінювався в діапазоні 0,30; 0,55; 0,80. За результатами експериментів визначався діаметр отвору труби, який утворюється після кування цим способом. Для аналізу отриманих теоретичних і експериментальних даних побудовані графіки залежності інтенсивності подовження (f), відносного потовщення стінки (S_1/S_0) і відносної зміни діаметра заготовки (d_{1op}/D). Встановлено, що зі збільшенням діаметра отвору заготовки подовження труби збільшується і знижується інтенсивність заковування отвору. Отримані результати дозволили встановити, що зі збільшенням відносного діаметра отвору вихідної заготовки d_0/D до 0,6 збільшується товщина стінки поковки S_1/S_0 . З подальшим збільшенням діаметра отвору ($d_0/D > 0,6$) знижується товщина стінки. Це дозволяє зробити висновок про неефективність співвідношень розмірів заготовки з $d_0/D = 0,6$ для кування без оправки, внаслідок інтенсивного збільшення товщини стінки заготовки. Загальною закономірністю досліджених схем протягування є те, що величина подовження пустотілої заготовки несуттєво змінюється для різних ступенів деформацій за постійних відносних розмірів заготовки. Це дозволило встановити рекомендовану подачу для збільшення подовження труби і зменшення ступеня заковування отвору. Раціональна подача повинна становити $(0,05...0,15)D$. Встановлені закономірності дозволяють визначати остаточний діаметр отвору труби. За результатами дослідження встановлено, що протягування пустотілих заготовок без оправки можливе. Цей спосіб розширює технологічні можливості процесів кування труб. Запропонований спосіб виготовлення пустотілих заготовок придатний для виготовлення довгомірних товстостінних труб з діаметром отвору меншим 300 мм. Кування труб без оправки дозволяє зменшити кількість підігрівань заготовок за рахунок виключення охолодження (в результаті зменшується час кування та витрати енергії на підігрівання заготовки). Запропонований спосіб кування без оправки дозволяє виключити використання спеціальних оправок з жароміцної сталі. Під час кування труб без оправки змінюється плин металу пустотілої заготовки (в результаті при обтисканні метал тече не тільки вздовж осі, але й перпендикулярно до осі заготовки).

Ключові слова: кування, товстостінна труба, протяжка без оправки, заковування отвору, подовження, потовщення стінки.

Вступ

Важливою задачею для розвитку важкого машинобудування є підвищення якості та зниження витрат на виробництво деталей відповідального призначення. До таких деталей відносяться товстостінні труби. Пустотілі поковки типу труб потрібно виготовляти куванням на конічній оправці. На сьогодні товстостінні труби виробляються з суцільних заготовок з використанням операції висвердлювання отвору. Як результат, підвищується тривалість виготовлення труб за рахунок значної механічної обробки та підвищуються витрати металу. Це викликано тим, що при куванні довгомірних труб довжиною більшою 3000 мм та діаметром отвору меншим 300 мм використання ковальської оправки в процесі деформування неможливо. Тому проблема виготовлення заготовок товстостінних труб на сьогодні залишається актуальною, яка потребує удосконалення.

В результаті досліджень Lixia Fan і співавторів була розроблена скінчено-елементна 3D-модель процесу радіальної кування пустотілих заготовок на оправці і проведено всебічний аналіз деформованого стану металу в процесі кування [1]. Показана ефективність процесу всебічного обтискання пустотілої заготовки на оправці. Встановлено, що кут кантування заготовки не чинить значного впливу на формозміну поковки. Однак кування заготовок з малим внутрішнім діаметром із

застосуванням оправки неможливо внаслідок малого діаметра каналу за значної його довжини.

У роботі S. P. Burkin та ін. вивчали експериментальними методами радіальне обтискання пустотілих зливок [2]. Цей спосіб є новим підходом до удосконалення ковальського оснащення для відмови від кування на молотах. Авторами встановлена залежність зміни товщини стінки в процесі заковування отвору.

У роботі Qi Zhang [3] встановлено, що кування труби без оправки сприяє інтенсивному заковуванню отвору і мінімальному подовженню пустотілої заготовки. Результати експериментальних даних процесів кування без оправки дозволили встановити, що різнотовщинність стінки пустотілої поковки склала менше 1,1 %. У роботі не досліджено вплив геометрії деформувального інструменту, що дозволило б інтенсифікувати процес подовження пустотілої заготовки без застосування оправки.

У статті M. Sanjari і співавторів досліджується вплив форми вирізних бойків на напружено-деформований стан (НДС) металу заготовки в процесі кування з оправкою [4]. Встановлено, що для отримання трубної заготовки з мінімальною неоднорідністю розподілу деформацій і механічних властивостей по товщині стінки необхідно використовувати бойки з випуклою радіусною кромкою.

Згідно з експериментальними дослідженнями Z. G. Wang процесів кування пустотілих заготовок на радіально-кувальних машинах (РКМ) встановлено, що цей процес дозволяє підвищити міцність і втомні властивості металу [5]. Автором розроблена модель для визначення деформації металу в радіальному, окружному і осьовому напрямках. Встановлено вплив оправки і величини обтискання на технологічні параметри процесу кування. Однак, у роботі не встановлено вплив схеми деформування на утворення текстури металу, яка приводить до анізотропії механічних властивостей.

F. Knauf зі співавторами досліджували процес радіального кування товстостінних труб на оправці [6]. В ході експериментальних досліджень отримані труби значної довжини, різного діаметра з різною товщиною стінок. Автори проводили кування чотирма бойками, що дозволило направити плин металу в осьовому напрямку, знижуючи розширення заготовки.

У разі радіального кування довгомірних пустотілих заготовок досліджувався вплив геометрії інструменту для визначення проробки центральної зони зливка [7]. Автори довели, що можливо отримати однорідні механічні властивості в поздовжньому і в поперечному напрямках.

Дослідженням якості внутрішньої і зовнішньої поверхні сталевих труб при куванні на оправці займалися Jinn-Jong Sheu зі співавторами [8]. Автори дійшли висновку, що зі збільшенням кута вирізу бойка досягається рівномірніший розподіл деформації. Збільшення обтискання також сприяє зменшенню шорсткості внутрішньої поверхні труби, але це може привести і до руйнування поковки.

O. Jaocen і співавтори [9] досліджували розподіл хімічної ліквіації в процесі кування, що дозволяє точніше призначити подальші операції термообробки. Автори розробили програмне забезпечення для моделювання процесу виготовлення виробу від злитка до поковки.

У своїх роботах Yong Li зі співавторами проводили порівняння радіального кування тонкостінних труб між двома і трьома бойками без оправки [10]. В ході експериментів виявлено, що у разі кування двома бойками дефекти поверхні утворюються інтенсивніше, ніж при куванні трьома бойками. Визначено, що сила деформування в двох бойках більше, ніж в трьох бойках. Напруження і деформації кованих товстостінних труб за використання трьох бойків розподіляються рівномірніше. Однак ці методи радіального кування товстостінних труб не можна використовувати для кування довгомірних пустотілих виробів.

Мета роботи — дослідження нового процесу деформування труб без використання оправки для зменшення часу та витрат металу при механічній обробці.

Методика експериментальних досліджень

Основний технологічний параметр, необхідний для розробки технологічних процесів протягування без оправки — формозміна в процесі деформування. У результаті експериментальних досліджень процесів протягування без оправки необхідно встановити вплив основних параметрів на плин металу. Основні параметри, які впливають на заковування отвору при протягуванні без оправки: ступінь деформації, співвідношення розмірів заготовки, величина подачі. В експериментальному дослідженні кування труб використовувалися свинцеві зразки. Додавання у сплав 1 % сурми дозволило наблизити реологічні параметри модельного матеріалу до 40Х за температур гарячої обробки тиском. Діаметр пустотілих заготовок $D = 45$ мм, довжина $h_0 = 25$ мм, діаметри отворів $d_0 = 12,25; 22,5; 35$ мм (рис. 1), масштабний коефіцієнт — 1:20.

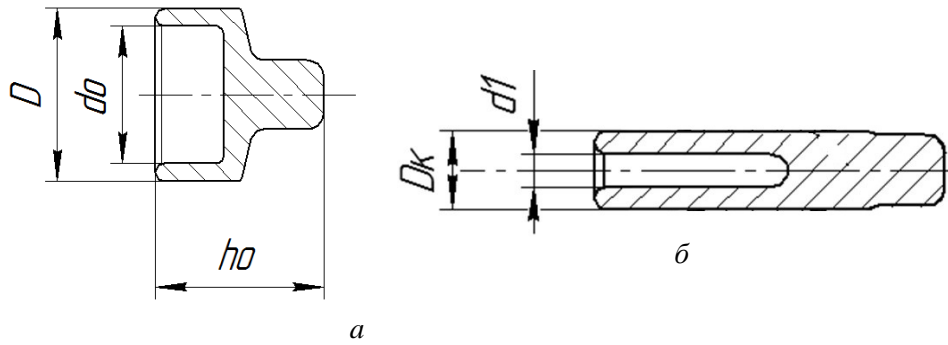


Рис. 1. Ескізи пустотілих заготовок: а — до деформації; б — після деформації



Рис. 2. Пустотілі заготовки до деформації

Пустотілі свинцеві зразки виготовлялися литтям у форму (рис. 2). Для проведення експериментальних досліджень спроектовані та виготовлені бойки, матеріал бойків — сталь 30. Паралельність деформувального інструменту забезпечувалась штамповим пакетом. Кування проводилося на гідропресі МС-500. Швидкість деформування складала 2 мм/с, що відповідало кінематичним умовам подібності (40 мм/с). Протягування проводилося до діаметра $D = 27$ мм. Під час деформування замірялися геометричні параметри моделей при протягуванні з обтисканням 5 %. Проводилися заміри об'єму порожнини поковки з використанням лабораторного волюметра. За відомим об'ємом і глибиною порожнини визначався середній діаметр порожнини труби при протягуванні без оправки. Підготовлені свинцеві моделі протягувалися вирізними бойками з кутом вирізу $\alpha = 120^\circ$ і подачею $0,1D$. Ці параметри вибрані як найефективніші з погляду максимального подовження при протягуванні та якості поверхні заготовки. Деформування здійснювалося поетапно, з обтисканням за прохід 10 % від діаметра зразка. Протягування здійснювалося в такий послідовності:

прохід \rightarrow кантування на 90° \rightarrow прохід \rightarrow кантування на 90° \rightarrow прохід \rightarrow кантування на 45° \rightarrow прохід. Для такої геометрії інструменту в процесі протягування на поверхні поковки не утворюються затиски та метал тече інтенсивніше вздовж осі. По закінченню процесу кування поковка має поверхню, близьку до циліндричної.

Результати експериментального дослідження формозміни при куванні без оправки

На рис. 3 показані результати експериментальних досліджень при протягуванні вирізними бойками заготовок з геометричними параметрами $d_0/D = 0,30; 0,55; 0,80$ (рис. 1а). Для аналізу отриманих теоретичних і експериментальних даних побудовані графіки інтенсивності подовження (f) (рис. 4), відносного потовщення стінки (S_1/S_0) (рис. 5) і відносної зміни діаметра заготовки (d_{1cp}/D) (рис. 6).

Рис. 3. Моделі після деформування без оправки на 20 %: а — $d_0/D = 0,80$; б — $d_0/D = 0,55$; в — $d_0/D = 0,30$

Згідно з отриманими результатами встановлено, що зі збільшенням діаметра отвору інтенсивність подовження заготовки збільшується, а відповідно, зменшується ступінь заковування отвору (рис. 4). Це пояснюється тим, що для тонкої стінки заготовки об'єм деформівного металу менше і відповідно менша кількість металу тече на заковування отвору. Ступінь заковування отвору можна визначити на основі дослідження змінення товщини стінки пустотілої заготовки при протягуванні без оправки.

Отримані результати (рис. 5) дозволили встановити, що зі збільшенням відносного діаметра отвору вихідної заготовки d_0/D до 0,6 збільшується товщина стінки поковки S_1/S_0 .

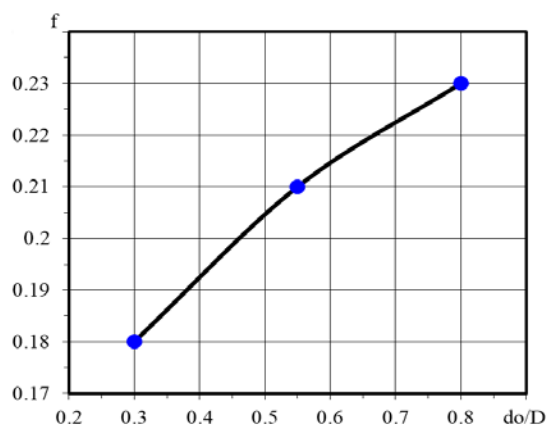


Рис. 4. Залежність інтенсивності подовження від відносного діаметра отвору заготовки після протягування

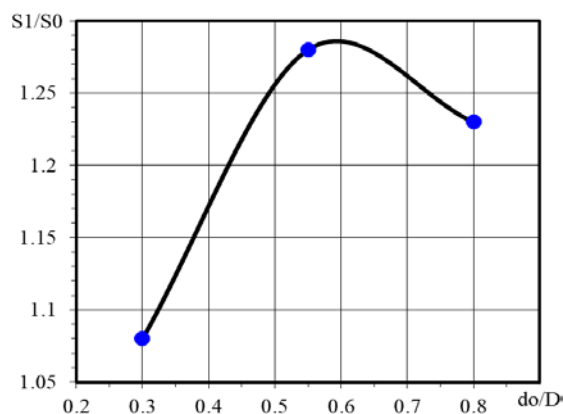


Рис. 5. Закономірність зміни відносної товщини стінки від діаметра отвору заготовки

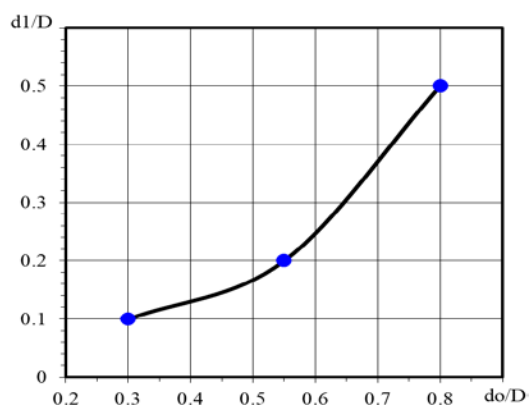


Рис. 6. Залежність заковування отвору від вихідного діаметра отвору при куванні без оправки

Подальше збільшення діаметра отвору ($d_0/D > 0,6$) приводить до зниження товщини стінки. Це дозволяє зробити висновок про неефективність співвідношень розмірів заготовки з $d_0/D = 0,6$ для кування без оправки, внаслідок інтенсивного збільшення товщини стінки заготовки.

Аналіз експериментальних даних заковування отвору залежно від діаметра отвору пустотілої заготовки (рис. б) дозволив встановити, що збільшення вихідного діаметра отвору приводить до збільшення остаточного отвору труби. Встановлені закономірності дають можливість визначити остаточний діаметр отвору труби.

Обговорення результатів досліджень формозміни при куванні без оправки

За результатами досліджень встановлено закономірності зміни розмірів отвору та стінки труби в процесі кування без оправки. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити ефективні геометричні параметри вихідної заготовки перед протягуванням труб без оправки і переваги перед існуючими способами кування труб:

- запропоновано новий спосіб виготовлення пустотілих заготовок, які йдуть на виготовлення довгомірних товстостінних труб з діаметром отвору меншим 300 мм. Раніше такі вироби виготовлялись із суцільних заготовок свердленням, що потребувало значного часу на механічну обробку та збільшувало витрати металу;

- кування труб без оправки дозволяє зменшити кількість підігрівань заготовок за рахунок виключення охолодження, яке притаманне способу протягування з використанням охолоджувальної оправки, що встановлюється в отвір заготовки. В результаті зменшується час кування та витрати енергії на підігрівання заготовки;

- запропонований спосіб кування без оправки дозволяє виключити використання спеціальних оправок із жароміцної сталі, ціна яких більша за ціну труби, яка виготовляється;

- при куванні труб без оправки змінюється плин металу пустотілої заготовки. В результаті при обтисканні метал тече не тільки вздовж осі, але й перпендикулярно до осі заготовки.

До обмежень розробленого способу кування довгомірних товстостінних заготовок слід віднести:

- протягування без оправки приводить до плину металу перпендикулярно до осі труби, що впливає на збільшення товщини стінки та ускладнює керованість формозміною заготовки, яка потребує точного витримування заданих режимів деформування;
- відсутність оправки призводить до збільшеної хвилястості внутрішньої поверхні труби;
- запропонований спосіб може застосовуватися тільки для виготовлення товстостінних труб.

Встановлені в роботі рекомендації по геометричним параметрам заготовок є важливими науково-технічними напрацюваннями, які можна використовувати в теорії і технології процесів кування пустотілих поковок без оправки. Практичним аспектом використання результатів дослідження є вдосконалення технологічного процесу кування довгомірних товстостінних труб з діаметром отвору меншим 300 мм, коли використання оправки неможливе.

Висновки

Визначено, що зі збільшенням внутрішнього діаметра заготовки подовження збільшується та зменшується заковування отвору труби. Загальна залежність змодельованих процесів деформування — подовження відбувається незначно за різних рівнів деформування для фіксованих розмірів трубної заготовки. Це дозволило встановити рекомендовану подачу і зменшення заковування внутрішнього діаметра. Рациональна відносна подача для інтенсивної витяжки пустотілої заготовки складає 10 % від діаметра заготовки. За відносного внутрішнього діаметра 0,6 відбувається максимальне потовщення стінки поковки. Встановлені закономірності дають можливість встановити остаточний діаметр отвору труби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] L. Fan, Z. Wang, and H. Wang, "3D finite element modeling and analysis of radial forging processes," *Journal of Manufacturing Processes*, 16, pp. 329-334, 2014.
- [2] S. P. Burkin, E. A. Korshunov, V. L. Kolmogorov, N. A. Babailov, and V. M. Nalesnik, "A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuously cast ingots," *Journal of Materials Processing Technology*, 58, pp. 170-173, 1996.
- [3] Q. Zhang, K. Jin, D. Mu, P. Ma, and J. Tian, "Rotary swaging forming process of tube workpieces," *11th International Conference on Technology of Plasticity, Nagoya, Japan. Procedia Engineering*, 81, 2014, pp. 2336-2341.
- [4] M. Sanjari, P. Saidi, A. K. Taheri, and M. H. Zadeh, "Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test," *Materials and Design*, 38, pp. 147-153, 2012.
- [5] Z. G. Wang, "The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel," *Nanjing University of Science and Technology*, pp. 28-30, 2011.
- [6] F. Knauf, P. J. Nieschwitz, A. Holl, H. Pelster, and R. Vest, "Latest Development in Railway Axle and ThickWalled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX," *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, USA. September 12-15, 2011*, pp. 215-220.
- [7] R. Koppensteiner, and Z. Tang, "Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product," *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, USA. September 12-15, 2011*, pp. 225-229.
- [8] J. J. Sheu, S. Y. Lin, and C. Y. Hsien, "Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation," *11th International Conference on Technology of Plasticity*, 19-24 October. Nagoya, Japan. *Procedia Engineering*, 81, 2014, pp. 688-693.
- [9] O. Jaouen, F. Costes, P. Lasne, and M. Barbelet, "From Hollow Ingot to Shell with a Powerful Numerical Simulation Software Tool," *18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. Pittsburgh, USA. September 12-15, 2011*, pp. 513-518.
- [10] Y. Li, T. He, and Z. Zeng, "Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thinwalled copper tube with axially inner micro grooves by radial forging," *Journal of Materials Processing Technology*, 213, pp. 987-996, 2013.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.04.2019

Герасименко Олексій Васильович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри комп'ютеризованого дизайну та моделювання процесів і машин, e-mail: mto@dgma.donetsk.ua

Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ

Modeling the Processes of Hollow Billets Deformation without Mandrel

¹Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

A new method of thick-walled pipes forging has been developed and researched. The proposed method consists in deforming a hollow billet without a mandrel. An experimental modeling technique was developed. The variable parameters were the inner diameter of the hollow billet, which varied in the range of 0,30; 0,55; 0,80. According to the results of the experiments, the diameter of the hole in the pipe, which is formed after forging by this method, has been determined. To analyze the obtained theoretical and experimental data, we plotted the dependence of the intensity of elongation (f), relative wall thickening (S_1/S_0), and relative change in the diameter of the workpiece (d_{1cp}/D). It was found that with an increasing of the hole diameter in the workpiece, the elongation of the pipe increases and the intensity of the chaining of the hole decreases. Obtained results allowed to establish that with an increase in the relative diameter of the opening of the original billet d_0/D to 0,6, the wall thickness of the forging S_1/S_0 increases. A further increasing in the hole diameter ($d_0/D > 0,6$) leads to a decrease in wall thickness. This allows us to conclude about the inefficiency of the ratios of the dimensions of the workpiece with $d_0/D=0,6$ for forging without a mandrel, as a result of an intense increase in the thickness of the wall of the billet. The general regularity of the investigated forging schemes is that the magnitude of the hollow billet elongation does not change significantly for different degrees of deformation at constant relative sizes of the billet. This made it possible to establish the recommended feed rate to increase pipe elongation and reduce the degree of the hole closing. Rational feed rate should be $(0,05...0,15)D$. The established relation allows to determine the final diameter of the pipe hole. According to the results of the research, it was established that the drawing of hollow billets without mandrel is possible. This method expands the technological capabilities of pipe forging processes. The proposed method of manufacturing hollow billets is suitable for the manufacture of long thick-walled pipes with a hole diameter of less than 300 mm. Forging pipes without a mandrel allows you to reduce the number of heated blanks by eliminating cooling (as a result, forging time and energy costs for heating the blank are reduced). The proposed method of forging without a mandrel eliminates the use of special supports from heat-resistant steel. When forging pipes without a mandrel, the current of the hollow billet metal changes (as a result, when the metal is compressed, the metal flows not only along the axis, but also across the axis of the workpiece).

Keywords: forging, thick-walled pipe, drawing without mandrel, hole forging, elongation, wall thickening.

Gerasymenko Oleksii V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Doctoral Student of the Chair of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, e-mail: mto@dgma.donetsk.ua

A. V. Герасименко¹

Моделирование процессов деформирования пустотелых заготовок без оправки

¹Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск

Разработан и исследован новый способковки толстостенных труб. Предложенный способ заключается в деформировании пустотелой заготовки без оправки. Разработана методика экспериментального моделирования. Варьируемым параметром был относительный внутренний диаметр пустотелой заготовки, который изменялся в диапазоне 0,30; 0,55; 0,80. По результатам экспериментов определялся диаметр отверстия трубы, который образуется послековки этим способом. Для анализа полученных теоретических и экспериментальных данных построены графики зависимости интенсивности удлинение (f), относительного утолщения стенки (S_1/S_0) и относительного изменения диаметра заготовки (d_{1cp}/D). Установлено, что при увеличении диаметра отверстия в заготовке удлинение трубы увеличивается и снижается интенсивность заковывания отверстия. Полученные результаты позволили установить, что с увеличением относительного диаметра отверстия исходной заготовки d_0/D до 0,6 увеличивается толщина стенки поковки S_1/S_0 . Дальнейшее увеличение диаметра отверстия ($d_0/D > 0,6$) приводит к снижению толщины стенки. Это позволяет сделать вывод о неэффективности соотношений размеров заготовки с $d_0/D=0,6$ дляковки без оправки, в результате интенсивного увеличения толщины стенки заготовки. Общей закономерностью исследованных схем протяжки является то, что величина удлинения пустотелой заготовки несущественно меняется для различных степеней деформаций при постоянных относительных размерах заготовки. Это позволило установить рекомендованную подачу для увеличения удлинения трубы и уменьшения степени заковывания отверстия. Рациональная подача должна составлять $(0,05...0,15)D$. Установленные закономерности позволяют определять окончательный диаметр отверстия трубы. По результатам исследования установлено, что протяжка пустотелых заготовок без оправки возможна. Этот способ расширяет технологические возможности процессовковки труб. Предложенный способ изготовления пустотелых заготовок пригоден для изготовления длиномерных толстостенных труб с диаметром отверстия менее 300 мм. Ковка труб без оправки позволяет уменьшить количество подогреваемых заготовок за счет исключения охлаждения (в результате уменьшается времяковки и расходы энергии на подогрев заготовки). Предложенный способковки без оправки позволяет исключить использование специальных оправок из жаропрочной стали. Приковке труб без оправки меняется течение металла пустотелой заготовки (в результате при обжатии металл течет не только вдоль оси, но и перпендикулярно к оси заготовки).

Ключевые слова: ковка, толстостенная труба, протяжка без оправки, заковывание отверстия, удлинение, утолщение стенки.

Герасименко Алексей Васильевич — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры компьютеризированного дизайна и моделирования процессов и машин, e-mail: mto@dgma.donetsk.ua