

УДК 621.919

МОДЕЛЮВАННЯ ХОЛОДНОГО ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ОТВОРІВ У ВТУЛКАХ ІЗ СІРОГО ЧАВУНА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Єрьомін Павло Миколайович здобувач

Кириченко Андрій Миколайович д.т.н., доцент

Кіровоградський національний технічний університет

Солона Олена Василівна к.т.н., доцент

Вінницький національний аграрний університет

Eryomin P.

Kyrychenko A.

Kirovohrad National Technical University

Solona O.

Vinnitsia National Agrarian University

Анотація: із застосуванням програмного комплексу DEFORM-2D/3D розроблена модель процесу деформуючого протягування отворів у втулках із сірого чавуна, яка дозволяє визначати формозміну деталі, напружений стан металу у вогнищі деформації та енергосилові параметри. Модель ураховує зміцнення металу при холодній деформації та монотонний характер процесу. Проведені експерименти підтверджують адекватність створеної моделі реальному процесу деформування. Отримані за її допомогою результати дозволяють встановити дійсну картину взаємодії деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею деталі, а також проектувати інструмент для даного виду металообробки.

Ключові слова: сірий чавун, деформуюче протягування, обробка отворів, пружно-пластичне деформування.

Вступ

Підвищення ефективності металообробки, а саме отримання якісних деталей та зниження собівартості продукції є однією із актуальних задач сучасного виробництва. Одним із методів, що забезпечує високу продуктивність та якість обробки найбільш поширених конструкційних металів є протягування. Однак, більшість існуючих рекомендацій щодо обробки деформуючим та комбінованим протягуванням стосується переважно пластичних сталей та кольорових металів. В той же час обробка малопластичних матеріалів, зокрема чавунів, потребує додаткового дослідження процесів, що відбуваються під час взаємодії деформуючого елемента та оброблюваної поверхні. Виходячи із сказаного, постановка наукового дослідження процесу холодного пружно-пластичного деформування круглих отворів в деталях з сірого чавуну аналітичним методом кінцевих елементів, а також розробка рекомендацій для створення високоефективних конструкцій деформуючих та комбінованих протяжок є актуальною задачею.

Наукові передумови

В інституті надтвердих матеріалів ім. Бакуля НАН України (м. Київ) під керівництвом професора Розенберга О.А. був проведений ряд експериментів з деформуючого протягування сталевих труб. Серед інших результатів під час взаємодії деформуючого

елемента та обробленої поверхні було відмічено явище виникнення хвилі позаконтактної деформації (ХПКД) [1]. Наявність хвилі позаконтактної деформації потрібно враховувати при конструюванні протяжного інструменту та побудові технологічного процесу обробки отворів. У подальшому, разом із Розенбергом О.А. параметри хвилі позаконтактної деформації в своїх працях досліджували такі відомі науковці як Крицький, Посвятенко, Лунгол, Неміровський та ін. [2]. Однак, всі ці дослідження проводилися переважно для пластичних матеріалів і відрізнялись великою трудомісткістю. Для виміру та фіксації таких параметрів хвилі позаконтактної деформації, як її довжина та висота за допомогою тензометрії була потрібна коштовна складна апаратура та пристосування [3,4]. Під час досліджень процесів деформуючого протягування отворів в деталях із чавуна також була зафіксована хвиля позаконтактної деформації, але без уточнення її параметрів [5]. При дослідженні контактних явищ, що відбуваються у процесі деформуючого протягування, важливим питанням є встановлення дійсної картини взаємодії деформуючого елемента (ДЕ) з оброблюваною поверхнею деталі. Від правильності рішення цього питання залежить достовірність оцінки фактичної ширини контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, контактних явищ та умов тертя в зоні контакту, а також схеми навантаження деформуючого елемента. Отримання параметрів ХПКД лише на основі практичних дослідів потребує значних витрат часу та коштів, тому використання аналітичних методів розрахунку є актуальною задачею.

Мета роботи

Визначення геометричних параметрів хвилі позаконтактної деформації за допомогою моделювання методом кінцевих елементів процесу деформуючого протягування отворів у втулках із сірого чавуна. Виходячи із вищесказаного, для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

- 1) Розробка методики проведення моделювання.
- 2) Моделювання процесу холодного пружно-пластичного деформування отворів при різних значеннях кута робочого конуса деформуючого елемента та товщини стінки оброблюваної втулки, а також оцінка їх впливу на геометричні параметри хвилі позаконтактної деформації.

Матеріал та результати дослідження

Для проектування технологій деформуючого та комбінованого протягування, інструмента та устаткування або оцінки можливості використання обладнання потрібне знання ряду взаємних залежностей між величинами тиску, тертя, геометрією інструмента, діючими силами та параметрами формозміни металу. Відомі теоретичні дослідження процесів протягування деталей типу втулка базуються на використанні аналітичних методів механіки деформації твердого тіла, вони виконані для конкретних розмірів і тому не є універсальними. Обмеженість застосування отриманих до теперішнього часу рішень викликана в тому числі і більшою кількістю допущень, що вводяться, та які знижують точність одержуваних розрахункових величин. Застосування сучасних програмних продуктів що використовують метод кінцевих елементів при моделюванні процесів обробки металів тиском дає можливість визначати пружно-деформований стан металу та енергосилові параметри при протягуванні. Одним з таких програмних комплексів є сучасний продукт DEFORM-2D/3D американської фірми SFTC (Scientific Forming Technologies Corporation) [6].

У випадку використання даного програмного комплексу в пакеті об'ємного моделювання, наприклад Kompas 3D або SolidWorks створюються прототипи оброблюваної деталі, деформуючого інструмента та допоміжного устаткування. Потім створені прототипи за допомогою сумісних форматів файлів експортуються до препроцесора (модуль підготовки моделювання) DEFORM, де проводиться їх розбивка кінцевими елементами та задається вид матеріалу, граничні умови та параметри навантаження. Приклад розбивки досліджуваного зразка на ряд кінцевих елементів у препроцесорі DEFORM-2D/3D показаний на рис. 1.

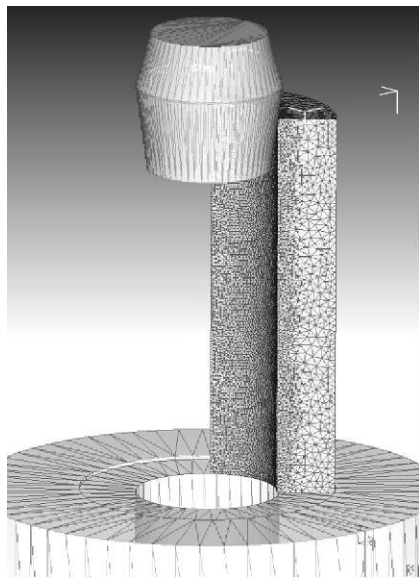


Рис. 1. Фрагмент вікна препроцесора програми DEFORM—2D/3D

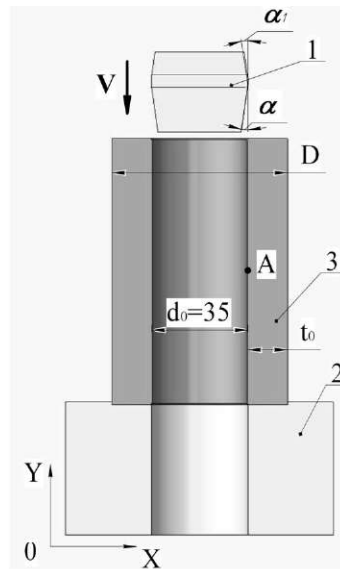


Рис. 2. Схема обробки деформуючим протягуванням: 1 — деформуючий елемент; 2 — опора; 3 — дослідний зразок

Після рішення завдання отримані результати виводяться за допомогою постпроцесора (модуля виводу результатів розрахунків) в виді наявних зображень, графіків, епюр, діаграм, табличних даних. Авторами проведені теоретичні дослідження процесу холодного пружно-пластичного деформування отворів у чавунних деталях типу втулка. Розглянуто випадок взаємодії деформуючого елемента та обробленої поверхні при різних значеннях кута робочого конуса деформуючого елемента та товщини стінки втулки.

Дослідження процесу деформуючого протягування проводилось за допомогою програмних комплексів SolidWorks 2008 та Deform-2D/3D v.10. Вибір розмірів та форми деталей проводився з урахуванням найбільш поширених типорозмірів у промисловості: втулках із початковим діаметром отвору $d_0=35$ мм, довжиною $L=100$ мм і товщиною стінки $t_0=5...20$ мм.

Межі експериментальних досліджень: швидкість протягування $V=0,05$ м/с; номінальний натяг на деформуючий елемент $a_{ном}=0,2$ мм; матеріал деформуючого елемента - твердий сплав ВК8, діаметр $D_{дЕ}=35,2$ мм; кут робочого та зворотного конуса $a=a_1=2...12$ град. Постановка задачі - вісесиметрична. Властивості досліджуваного матеріалу (сірий чавун марки СЧ20) задавались у вигляді кривої стиснення, а також твердістю $HB=1,7$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu=0,27$ та модулем Юнга $E=1,6 \times 10^5$ МПа. В процесі моделювання величина кута деформуючого елемента складала відповідно 2, 4, 8 та 12 град, а товщина стінки втулки 5, 10, 15 та 20 мм. Схему обробки зразків наведено на рис. 2.

Дослідний зразок у формі втулки з круглим отвором 1 вільно встановлюється на опорній плиті 2, яка жорстко закріплена. На початку досліджень деформуючий елемент 3 знаходиться на невеликій відстані зверху над втулкою, причому його геометричні розміри забезпечують потрібний натяг та кут робочого конуса. Робочий рух інструмента задається його монотонним повздовжнім переміщенням на певну відстань через отвір втулки, що опирається на нерухому основу. Обробка проводиться одним деформуючим елементом. Об'єктом дослідження є переміщення по вісі ОХ точки А, що розташована на оброблюваній поверхні втулки на відстані 50 мм від краю отвору.

В результаті проведеного моделювання отримано ряд даних для різних умов протягування. В якості прикладу на рис. 3 показано ряд точок, що відповідають переміщенню точки А по осі ОХ за кожен крок розрахунку, який дорівнює 1 мм переміщення ДЕ при $\alpha=2$ град та $t_0=5$ мм.

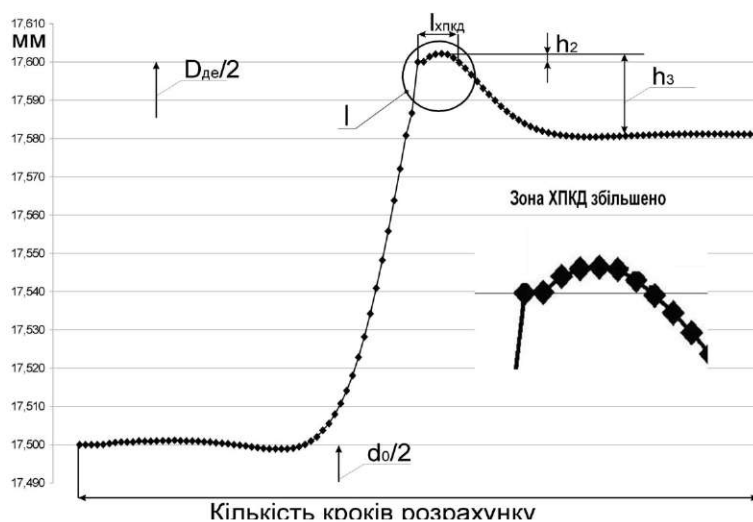


Рис. 3. Переміщення точки А під час взаємодії деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею при $\alpha=2$ град, $t_0=5$ мм, де: $I_{хпкд}$ — довжина хвилі позаконтактної деформації; h_2 — висота хвилі; h_3 — усадка отвору

Форма траєкторії руху точки А наглядно показує вид та розміри ХПКД, а також наявність усадки отвору після проходження деформуючого елемента. Результати обробки даних у вигляді різниці початкових та кінцевих геометричних координат точки, що були отримані в результаті моделювання, зображено на графіках (рис. 4,5). Так, авторами було отримані дані щодо зміни геометричних параметрів ХПКД в залежності від зміни кута α та товщини t_0 . Графік залежності висоти хвилі позаконтактної деформації від робочого кута деформуючого елемента та товщини стінки втулки показано на рис. 4. Залежність має складний характер. Так, при $\alpha=2$ град збільшення товщини стінки до 15 мм спочатку зменшує висоту хвилі, а потім при $t=20$ мм вона починає зростати. При $\alpha=4$ град та $\alpha=8$ град товщина стінки має незначний вплив на величину ХПКД. При $\alpha=12$ град графік хвилі має екстремум на $t=15$ мм, а потім вона починає зменшуватись практично до нульового значення.

Аналіз графіка показує, що при величині натягу на деформуючий елемент $\alpha \wedge \wedge \wedge$ мм, зміна кута α незначно впливає на величину ХПКД. Це пояснюється тим, що при таких умовах контакт деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею відбувається у зоні переходу робочого конуса в циліндричну стрічку, а фактична площа контакту становить

лише 5...10% від загальної площини робочого конуса. За отриманими даними, максимальна висота хвилі при різних значеннях кута α складає до 0,03 мм і вона практично не буде впливати на умови роботи інших робочих елементів протяжки.

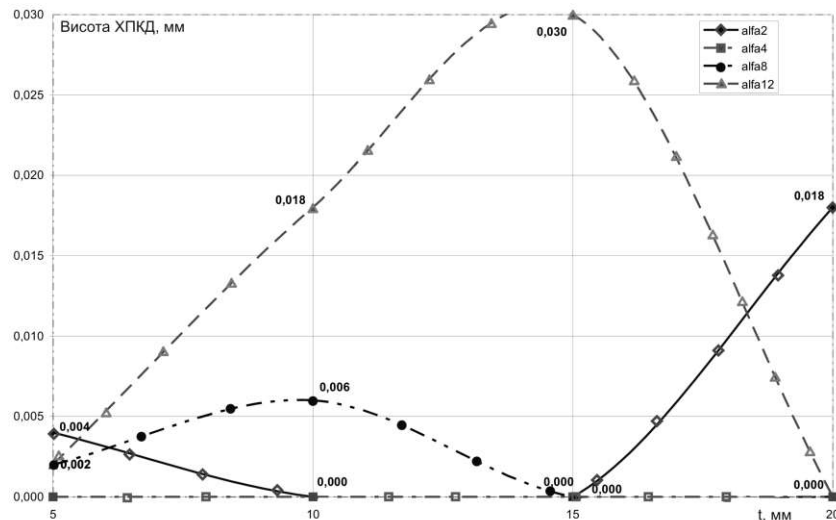


Рис. 4. Висота ХПКД в залежності від кута робочого конуса та товщини стінки втулки

Також розглянуто, як змінюється величина усадки обробленого отвору в залежності від значень кута α та товщини t_0 . Графік залежності усадки отвору від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки показаний на рис. 5.

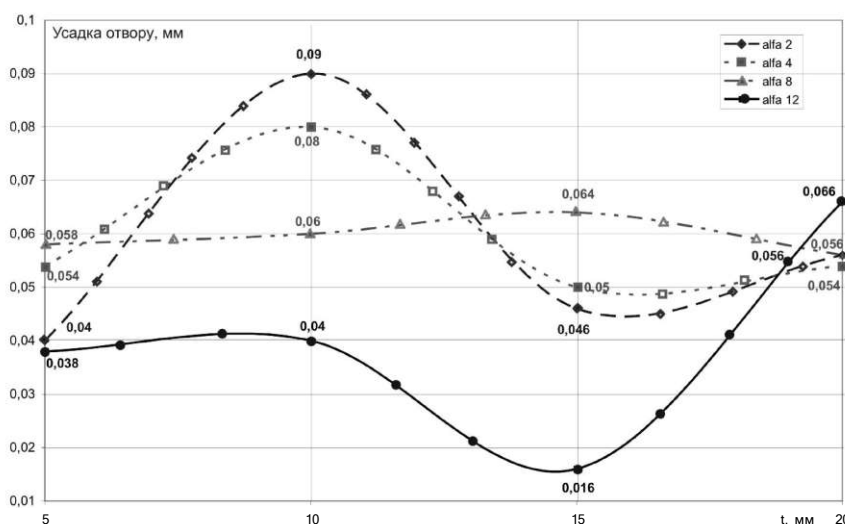


Рис. 5. Усадка отвору на діаметр ($2h_3$) в залежності від кута робочого конуса ДЕ та товщини стінки втулки

Аналіз графіків показує, що при натягу на деформуючий елемент $a_{\text{ном}}=0,2$ мм незалежно від робочих кутів деформуючого елемента та товщини стінки оброблюваної втулки має місце явище тільки усадки отвору. Отримані дані підтверджують результати практичних дослідів з деформуючого протягування чавунних втулок, наведені у [5]. Величина усадки залежить від товщини стінки втулки, причому для різних значень t_0 вона

має немонотонний вид. Величина робочого кута також впливає на висоту ХПКД. Залежність має складний характер.

Також встановлено що при значеннях кута робочого конуса 8-12 град та товщині стінки 15-20 мм перед деформуючим елементом починає формуватись валик із оброблюваного матеріалу, приклад якого зображено на рис. 6. Поява валику свідчить про наявність пластичної деформації матеріалу втулки в зоні її контакту з ДЕ.

Також відмічено, що висота валика залежить від кута робочого конуса і товщини стінки. Наприклад, при значеннях $\alpha=12$ град та $t_0=20$ м вона складає до 0,34 мм на сторону.

Висновки:

1) Проведені дослідження процесу протягування отворів у чавунних деталях типу втулка з використанням програмного комплексу DEFORM 2D/3D дозволили отримати дані про зміну висоти хвилі позаконтактної деформації, а також усадки отвору в залежності від робочого кута деформуючого елемента та товщини стінки оброблюваної деталі;

2) Підтверджено наявність тільки усадки обробленого отвору втулки із чавуну СЧ20 в незалежності від початкових геометричних параметрів ДЕ та товщини втулки;

3) При збільшенні кута робочого конуса, а також при збільшенні товщини стінки втулки зафіксовано появу валика із оброблюваного матеріалу поперед ДЕ, що свідчить про наявність пластичної деформації у зоні контакту інструмента та виробу;

4) Моделювання процесу пружно-пластичного деформування отворів у втулках із сірого чавуна методом кінцевих елементів дозволяє встановити картину взаємодії деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею деталі при заданих умовах обробки.

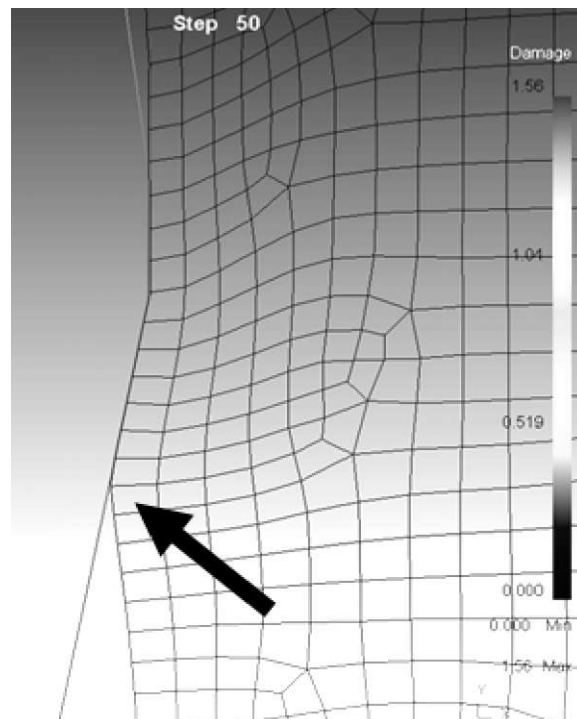


Рис. 6. Формування валика перед деформуючим елементом

Список літератури

1. Розенберг О.А., Розенберг А.М., Бусел Ю.Ф. и др. Эффект внеконтактной деформации. - Киев: Синтет. алмазы, 1973. Вып. 3. - С. 22-24.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания.-Киев: Наук. Думка, 1990.- 320 с.
3. А.с. 432354 (СССР) Устройство для измерения деформаций деталей в процессе обработки отверстия /Розенберг А.М., Розенберг О.А., Крицкий А.Д., Бусел Ю.Ф.- Оpubл. в Б.И., 1974 г., №22.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Крицкий А.Д., Бусел Ю.Ф. Тензометрическое устройство и метод определения коэффициента трения при деформирующем протягивании / Кузнечно-штамповое пр-во, 1978, №7, с. 18-20
5. Чернявский А.В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из чугуна деформирующим протягиванием: Автореф. дисс...канд. техн. наук - Кировоград, 1988. - 18 с.

6. Паршин В.С., Карамышев А.П., Некрасов И.И. и др. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие /Екатеринбург: УрФУ, 2010, 266 с.

References

1. Rozenberg, O.A., Rozenberg, A.M., Busel, Yu.F. and et al. "The effect of non-contact strain" (1973), *Synthetic diamonds*, Kyiv, vol. 3, pp. 22-24.
2. Rozenberg, O.A. *Mehanika vzaimodeystviya instrumenta s izdeliem pri deformiruyuschem protyagivani* [Mechanics of the interaction tool with the product deforming pulling], Nauk. dumka, Ryiv, Ukraine
3. Rozenberg, A.M., Rozenberg, O.A., Kritskiy, A.D. and Busel, Yu.F, Certificate of authorship USSR IPC B23D43/02 "The device for measurement of deformations of details in opening processing", priority from 1974, bulletin №22.
4. Rozenberg, A.M., Rozenberg, O.A., Kritskiy, A.D. and Busel, Yu.F "The tensometric device and method of determination of coefficient of friction at deforming drawing" (1978), *Forge and press production*, vol. 7, pp. 18-20.
5. Cherniyavskiy, A. V. (1988) "Improving the efficiency of hole in the details of deforming pulling iron, Thesis abstract for Cand. Sc. (Engineering.) 05.03.01, Institute for Superhard Materials, National Academy of Ukraine, Ryiv, Ukraine.
6. Parshin, V.S. *Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM-3D: uchebnoe posobie* [How to program complex DEFORM-3D: Tutorial], UrFU, Ekaterinburg, Russia.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОЛОДНОГО УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ВО ВТУЛКАХ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация: с применением программного комплекса DEFORM-2D/3D разработана модель процесса деформирующего протягивания отверстий во втулках из серого чугуна, которая позволяет определять изменение формы, напряженное состояние металла в очаге деформации и энергосиловые параметры. Модель учитывает упрочнение металла при холодной деформации и монотонный характер процесса. Проведенные эксперименты подтверждают адекватность созданной модели реальному процессу деформирования. Полученные с её помощью результаты позволяют установить истинную картину взаимодействия деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью детали, а также проектировать инструмент для данного вида металлообработки.

Ключевые слова: серый чугун, деформирующее протягивание, обработка отверстий, упруго-пластическое деформирование.

SIMULATION OF COLD ELASTOPLASTIC DEFORMATION OF HOLES IN GRAY IRON SLEEVES BY FINITE ELEMENT METHOD

Summary: DEFORM-2D/3D program complex was applied to simulate deforming broaching of holes in gray cast iron sleeves, which allowed developing a model to define deformation, strain and energy of the process. The model considers cold-work strengthening and monotonous nature of process. The experiments confirmed the model is adequate to real process of deformation. The obtained results show a true picture of interaction of deforming element with workpiece surface, and also help to design the proper tool.

Keywords: cast iron, deforming broaching, bores machining, elastoplastic deformation.