

ТЕОРЕТИЧНІ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ТРУБНОГО ПРОКАТУ ЗА СХЕМОЮ ЕКСЦЕНТРИЧНОГО ЗАКРУЧУВАННЯ

У роботі приведені результати теоретичних й експериментальних досліджень енергосилових параметрів процесу розділення, геометричної точності трубчастих заготовок способом «ексцентричного закручування». Розроблена математична модель обладнання з «кривошипно-круговим» механізмом для відрізки труб «ексцентричним закручуванням». Проведене моделювання технологічного процесу відрізки труб «ексцентричним закручуванням» з використанням програмного комплексу DEFORM. Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження розділення труб на установці оригінальної конструкції. Відрізані трубчасті заготовки мають задовільні показники геометричної точності. Отримані результати експериментальних досліджень задовільно узгоджуються з теоретичними даними, які розраховані, як за допомогою запропонованої математичної моделі, так і спеціалізованої програми DEFORM. Розбіжність максимальних значень моменту відрізки, отриманих теоретично та експериментально, не перевищує 6%. Теоретичні результати виявилися трохи заниженими, що пов'язано з необхідністю більш коректного обліку тертя в обертових парах. А також з деякою невідповідністю механічних властивостей матеріалу експериментальних зразків з матеріалом із бази сталей самої програми DEFORM. Для промислового впровадження результатів досліджень запропонована конструкція установки із клиношарнірним приводом з увігнутих клином у комбінації з «кривошипно-круговим» механізмом для розділення труб за схемою «ексцентричного закручування». Клиношарнірний механізм із увігнутих клином має збільшені опорні поверхні, невелику висоту ланок за напрямком дії робочої сили. Тому застосування в машинах клиношарнірного механізму з увігнутих клином забезпечує меншу пружну деформацію й динаміку машини, підвищення коефіцієнта використання ковальсько-пресового устаткування. При цьому розвинена площа опори шатуна у повзуні «кривошипно-кругового» механізму знижує питомі сили в цій опорі й сприяє гасінню коливань, що в комбінації з малою деформаційною зоною призводить до високої динамічної стійкості й відсутності розгойдування на фундаменті.

Ключові слова: розділення, ексцентрик, труба, момент, якість.

Операція розділення трубного прокату на мірні заготовки є однією із самих масових у машинобудівному виробництві. Враховуючи те, що в Україні і світі виробляються мільйони заготовок, вдосконалення способів розділення трубного прокату дозволяє знизити собівартість готової продукції і є завданням актуальним [1].

На сьогоднішній день існує безліч способів розділення труб, кожний з яких характеризується сукупністю техніко-економічних показників і має свою раціональну область застосування [2].

За ознакою витрати металу усі відомі способи розділення труб можна розділити на три групи. Відходні способи: різання на дискових пилках, фрезерно-відрізних верстатах, токарських верстатах, приводних ножівках. Відходні способи з необоротним відходом: різання абразивними, фрикційними інструментами, різання газом, плазмою, лазером. Безвідходні способи: відрізка зсувом, холодна ломка згином, різання клиновими дисковими ножами [3].

Найбільш перспективними, з погляду продуктивності й відходності, є безвідходні способи розділення. Відрізка зсувом є найбільш ефективним і перспективним способом виготовлення мірних заготовок. Так, наприклад, обсяг роботи 7...8 пилок по розрізці труб можна виконати в одному відрізному штампі. Заміна різання труб на металорізальних верстатах розділенням у штампах забезпечує економію (5...40)% металу залежно від довжини заготовки [4, 5].

Спосіб відрізки зсувом у штампах з втулковими ножами із уведенням трубчастої заготовки в отвір ножів-оправок не знайшов широкого застосування через низьку якість отриманих заготовок, а саме – через утворення на торцях заготовок утяжин і заусенців [6].

Одним з методів поліпшення якості розділення труб є послідовний двоххосьовий зсув в горизонтальному й вертикальному напрямках. Однак при цьому якість отриманих заготовок остається невисокою і супроводжується зниженням продуктивності процесу розділення [5, 6]. Для розділення тонкостінних труб запропонована двохперехідна схема. На першому етапі здійснюється попереднє стискання труби в зоні різання на плоский овал у межах пружної деформації і наступна вирізка ділянок, співвісних більшій осі овалу за допомогою вільчастого

плоского пуансона (ножа). На другому – остаточна відрізка труби за допомогою ножа, що рухається в поперечному напрямку. Недоліком даного способу є складність його реалізації [7].

Однією з перспективних комбінованих механічних схем деформації при розділенні прокату є схема відрізки «ексцентричним закручуванням» у втулкових ножах (різновид неповністю закритої відрізки) [8, 9]. Сутність способу полягає у тому, що заготовка здійснює круговий рух навколо осі, зміщеної стосовно осі профілю прокату на певну відстань, яка називається ексцентриситетом e . Даний спосіб відрізки є сполученим процесом відрізки зсувом і кручення і поєднує позитивні сторони обох процесів. При $e = 0$ має місце чисте кручення, при $0 < e < r$ – «ексцентричне закручування», при $e \geq r$ – відрізка по дузі, а при $e = \infty$ маємо відрізка зсувом поступальним переміщенням інструмента і заготовки.

Отримані результати щодо ексцентричного закручування стосуються виключно розділення прокату суцільного перерізу. При цьому схеми розділення трубчастого прокату, які побудовані на русі інструменту по периметру заготовки, є перспективними і практично не дослідженими. Вони забезпечують найменші енергосилові параметри процесу розділення і підвищення геометричної точності трубчастих заготовок за рахунок зменшення їх пластичної деформації [10].

Мета роботи – отримання геометрично точних трубчастих заготовок способом «ексцентричного закручування» та зниження величин енергосилових параметрів процесу розділення.

На рис. 1 представлені можливі конструктивні схеми механізмів для реалізації потрібної кінематики руху ножів при відрізці «ексцентричним закручуванням». Прийняті позначення: 1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – повзун; 4 – куліса

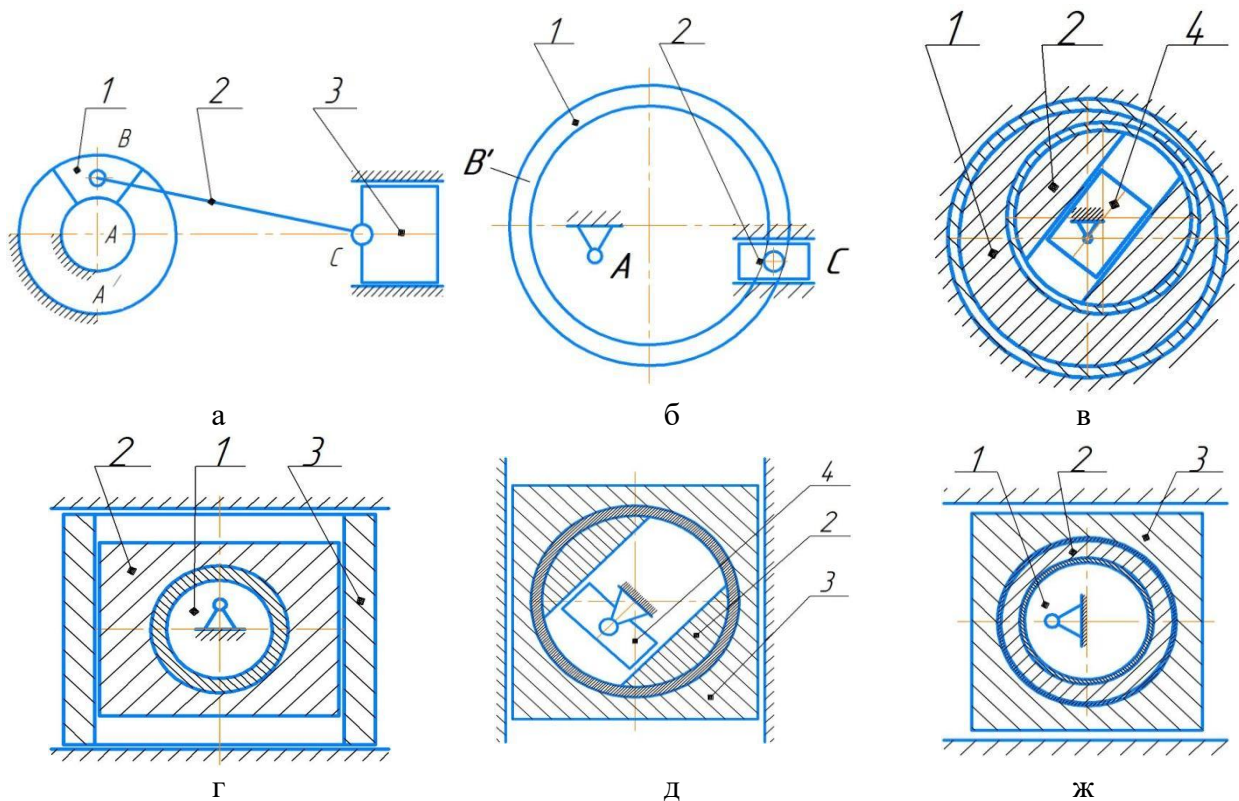


Рис. 1. Конструктивні схеми механізмів для розділення трубного прокату

У кривошипно-повзунному механізмі (див. рис. 1, а) виконаний круговий паз A' . У ньому розміщено кривошип 1 у вигляді вкладиша B , у якості якого може бути використаний відрізний інструмент (ніж, ролик).

У механізмі (див. рис. 1, б) кривошип виконаний у вигляді ексцентрика із круговим пазом B' , який взаємодіє зі сполученим вузлом «шатуна + шарнір C ». Така конструктивна схема механізму також дозволяє забезпечити задану траєкторію руху відрізного інструмента по периметру труби.

На рис. 1, в наведено два варіанти конструктивного виконання кривошипно-кулісних механізмів, які забезпечують задану кінематику руху інструменту при відрізці труби.

Для забезпечення багаторазового відносного зсуву відрізаємої трубчастої заготовки в декількох радіальних напрямках можна використовувати синусний механізм (див. рис. 1, г), у якому кривошип 1 у вигляді ексцентрика поміщено усередину шатуна 2, який, у свою чергу, розташовано усередині повзуна 3.

Для цих цілей також можна використовувати тангенсний механізм (див. рис. 1, д) – різновид кулісного механізму, у якому кулісу 4 поміщено усередину шатуна 2, який, у свою чергу, перебуває усередині шарніра B , встановленого усередині повзуна 3.

Найбільш перспективною із розглянутих схем відрізки, з огляду конструктивної реалізації та надійної роботи, представляється схема відрізки труб «ексцентричним закручуванням» з використанням кривошипно-кругового механізму (див. рис. 1, ж).

Запропонована принципова конструктивна схема установки для відрізки трубчастих заготовок за схемою ексцентричного закручування з використанням кривошипно-кругового механізму (рис. 2). Основними елементами установки є: рухома 1 і нерухома 2 повзушки, кругова шайба 3, яка розташована в рухомій повзушці 1 з ексцентрично вставленими ріжучими ножами-втулками 4, 5. Ріжучий ніж-втулка 4 встановлений ексцентрично щодо своєї осі обертання. Величина ексцентриситету ee дорівнює радіусу кривошипа rr [11].

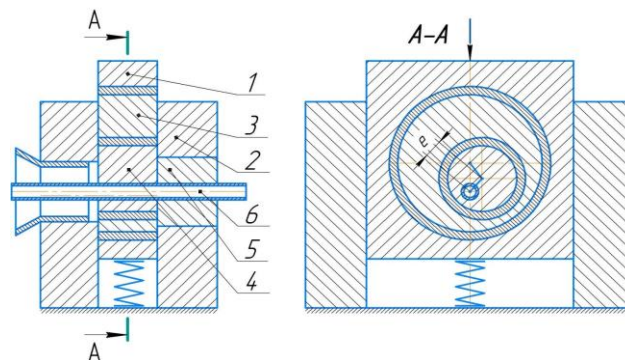


Рис. 2. Принципова конструктивна схема установки для відрізки трубчастих заготовок за схемою ексцентричного закручування

Установка працює у такий спосіб. У вихідному положенні ріжучі ножі-втулки 4, 5 розташовані співвісно. У порожнину цих ножів подається трубчастий зразок 6 до упору. Під дією сили з боку приводу рухома повзушка 1 переміщується вниз у напрямних. При цьому зразок заклинюється в ножах 4, 5. Відбувається пластичне вдавлювання ножів, що супроводжується пластичним тангенціальним зсувом відрізаємої трубчастої заготовки. Тобто на трубний зразок у площині розділення наноситься концентратор напружень. При перевищенні сил тертя на поверхнях ріжучого ножа 4, кругової шайби 3 і трубчастого зразка 6 ріжучий ніж 4 здійснює обертовий рух відносно своєї осі. При цьому він передає рух і навантаження заготовці. Таким чином, у площині розділення діє крутий момент, що приводить до остаточного відділення трубчастої заготовки. Відрізка закінчується при повороті ріжучого ножа-втулки 4 на величину, яка залежить від механічних властивостей матеріалу трубчастого зразка. Після здійснення ножем 4 повного обороту на 360° , осі ріжучих ножів-втулок 4, 5 знову збігаються. Цикл роботи установки поновлюється.

Розроблена математична модель даної установки для відрізки труб «ексцентричним закручуванням» з використанням аналітичного методу кінематичного й динамічного аналізу (рис. 3).

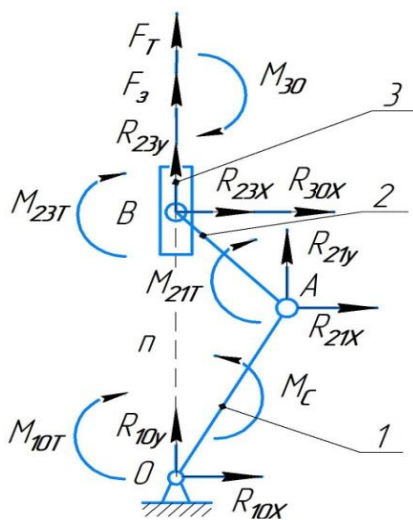


Рис. 3. Схема механізму з прикладеними силами й реакціями у кінематичних парах

Силами ваги й інерції деталей механізму зневажали. Силкові розрахунки починали з розгляду структурної групи 2 – 3. Нижче наведена система рівнянь рівноваги, що включає сили тертя в поступальній парі й моменти тертя в обертальній.

$$\left. \begin{aligned} \sum M_A(F_i)_2 = 0 : R_{23x} \cdot (y_A - y_B) - R_{23y} \cdot (x_A - x_B) + M_{21m} + M_{23m} = 0; \\ \sum M_B(F_i)_3 = 0 : M_{32m} + M_{30} = 0; \\ \sum (F_{ix})_3 = 0 : R_{30x} - R_{23x} = 0; \\ \sum (F_{iy})_3 = 0 : -R_{23y} + F_3 + F_m = 0; \\ \sum (F_{ix})_2 = 0 : R_{21x} + R_{23x} = 0; \\ \sum (F_{iy})_2 = 0 : R_{21y} + R_{23y} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $R_{21x}, R_{21y}, R_{23x}, R_{23y}$ – реакції у шарнірах;

R_{30x} – реакція у поступальній парі;

F_T – сила тертя у поступальній парі;

F_3 – сила, яка прикладена до повзушки;

$M_{21T}, M_{23T}, M_{32T}$ – моменти тертя в обертальній парі, які можуть бути представлені у вигляді наступних залежностей:

$$\left. \begin{aligned} M_{21T} &= -\sqrt{R_{21x}^2 + R_{21y}^2} \cdot f_A \cdot r_A \cdot \text{Sign}(\varphi'_2 - \varphi'_1); \\ M_{23T} &= -\sqrt{R_{23x}^2 + R_{23y}^2} \cdot f_B \cdot r_B \cdot \text{Sign}(\varphi'_2); \\ M_{32T} &= -M_{23T}; \\ M_{12T} &= -M_{21T}; \\ F_T &= -|R_{30x} \cdot f_n| \cdot \text{Sign}(x'_3), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де r_A, r_B – радіуси шарнірів;

f_A, f_B, f_n – коефіцієнти тертя;

φ'_1, φ'_2 – передатні функції першого порядку.

У результаті розв'язку системи рівнянь (1) з урахуванням (2) можуть бути визначені реакції в кінематичних парах, сили й моменти тертя. Для визначення знака сил тертя й мо-

ментів тертя необхідно знати передатні функції першого порядку всіх ланок. З метою їх визначення розроблена методика кінематичного аналізу механізму за допомогою розроблених процедур. Для розв'язку нелінійної системи рівнянь (1), (2) використаний метод Ньютона [12, 13].

Знаючи реакції R_{21x} й R_{21y} визначали момент опору з боку заготовки, з умови рівноваги ланки 1:

$$\left. \begin{aligned} \sum (F_{ix})_{\lambda} = 0 : -R_{21x} + R_{10x} &= 0; \\ \sum (F_{iy})_{\lambda} = 0 : -R_{21y} + R_{10y} &= 0; \\ \sum M_O (F_i)_{\lambda} = 0 : M_{10T} + M_C + M_{12T} + R_{21x} \cdot (y_O - y_A) - R_{21y} \cdot (x_O - x_A) &= 0. \end{aligned} \right\} (3)$$

де M_C – момент супротиву;

R_{10x} , R_{10y} – реакції у шарнірі;

M_{10T} – момент тертя в обертальній парі, який може бути описаний виразом:

$$M_{10T} = -\sqrt{R_{10x}^2 + R_{10y}^2} \cdot f_0 \cdot r_0 \cdot \text{Sign}(\varphi_1'), \quad (4)$$

де r_0 – радіус шарніра;

f_0 – коефіцієнт тертя.

Додатково для перевірки розробленої математичної моделі проведено моделювання технологічного процесу відрізки труб «ексцентричним закручуванням» з використанням програмного комплексу DEFORM.

Параметри заготовки: зовнішній діаметр – 16 мм, внутрішній діаметр – 12 мм, довжина – 64 мм.

Досліджували вплив величини ексцентриситету в діапазоні 0,5...3 мм на величину енергосилових параметрів процесу розділення.

Параметри процесу моделювання представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри процесу моделювання

Назва параметру	Значення параметру
1 Властивість матеріалу	пластичний
2 Температура	20°C
3 Кількість елементів розбиття	40000
4 Компенсація втрати об'єму, мм ³	5707,44
5 Параметри розрахунку:	аналіз Лагранжа
○ кількість кроків розрахунку	100
○ приріст кроків, с/крок	0,6
○ час завершення, с	60
6 Рух ломника	обертання
○ кутова швидкість, рад/с	0,10472

Розрахунки проводили для матеріалів трубчастої заготовки, які є представниками двох груп:

- група пластичних матеріалів – Ст. 08 (матеріал із бази DEFORM *AISI* – 1006);
- група пружнопластичних матеріалів – Сталь 45 (матеріал із бази DEFORM *AISI* – 1045).

Результати моделювання представлені на рис. 4 для зразків із сталі Сталь 45, відрізаних за схемою ексцентричного закручування з ексцентриситетом $e = 1,5$ мм. Максимальний момент відрізки склав $M = 257$ Н·м, сила відрізки – $F_y = 18,2$ кН при куті повороту рухомого ножа близько $\varphi \approx 90^\circ$.

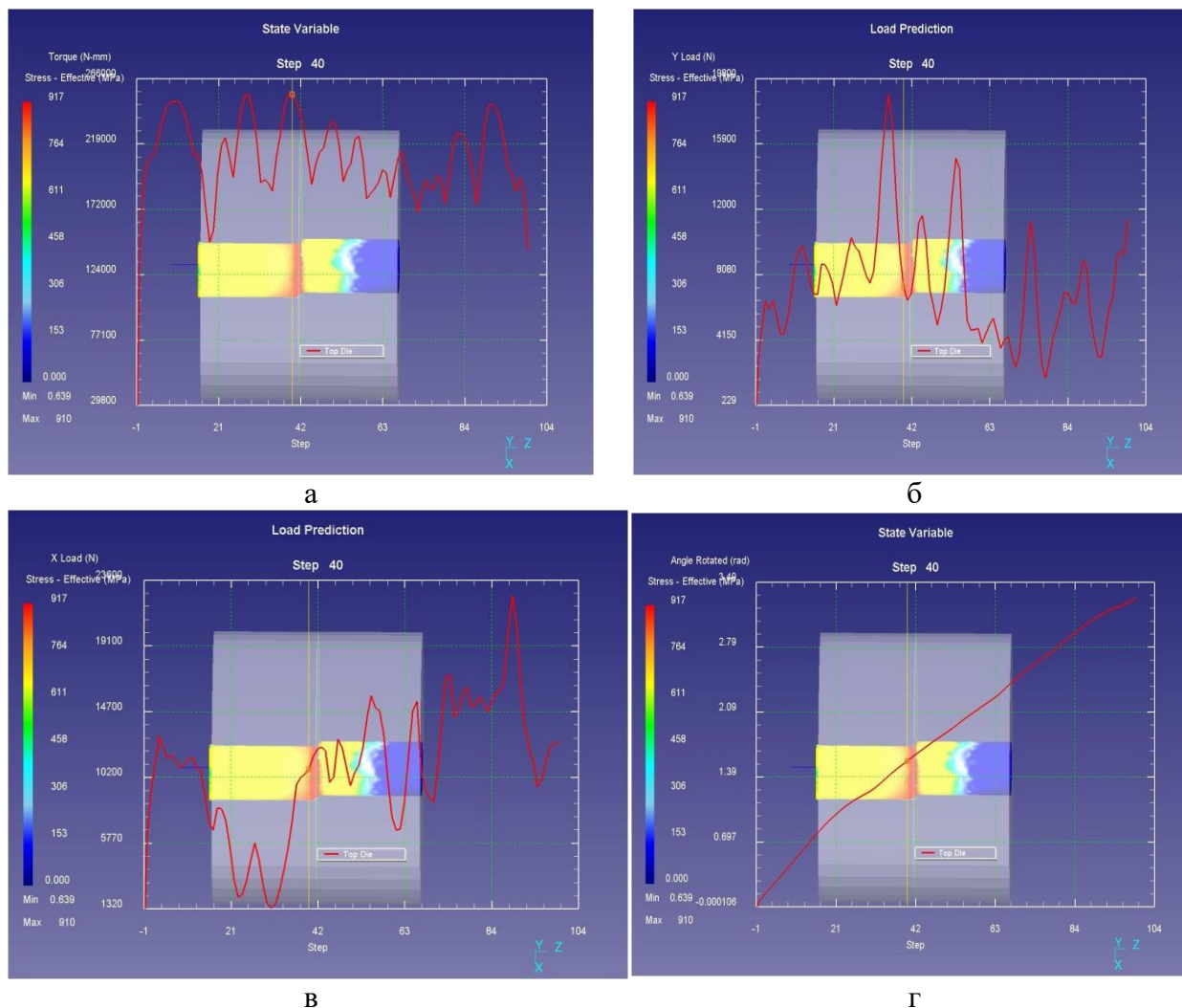


Рис. 4. Залежність $M_c = f(step)$, $F_y = f(step)$, $F_x = f(step)$, $\varphi = f(step)$ трубчастого прокату із сталі AISI – 1045 ($e = 1,5$ мм) від кроків розрахунку

Результати розрахунків представлені на рис. 5, 6. На рис. 5 представлена залежність сили відрізки від величини ексцентриситету – $F = f(e)$ (а) і моменту відрізки від величини ексцентриситету – $M_c = f(e)$ (б) розрахованих для трубчастих зразків із сталей: Ст. 8, Сталь 45. На рис. 6 представлені залежності величини сили і моменту відрізки від кута повороту рухливого ножа (а) та від величини коефіцієнту тертя (б) для трубчастого прокату із сталі AISI – 1006 при $e = 0,5 \dots 3,0$ мм.

Аналіз отриманих результатів показує, що на величину енергосилових параметрів процесу розділення трубного прокату і геометричну точність отриманих заготовок значний вплив має величина ексцентриситету e . Зі збільшенням величини ексцентриситету до величини $e \approx 2$ мм сила відрізки зменшується, а потім, при $e > 2$ мм, величина сили збільшується (див. рис. 5, а). Зі збільшенням величини ексцентриситету момент відрізки трубчастих заготовок збільшується (див. рис. 5, б). Коефіцієнт тертя не суттєво впливає на величину моменту і сили відрізки (див. рис. 6, б).

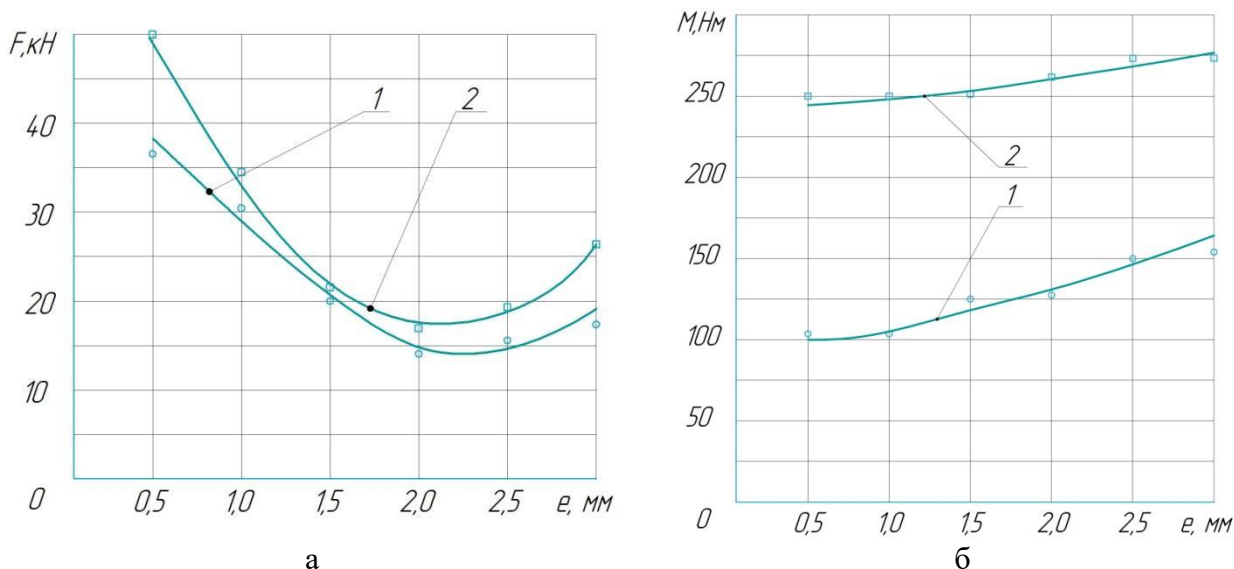


Рис. 5. Залежності $F = f(e)$ (а), $M_c = f(e)$ (б) для трубчастого прокату із сталі: AISI – 1006, AISI – 1045

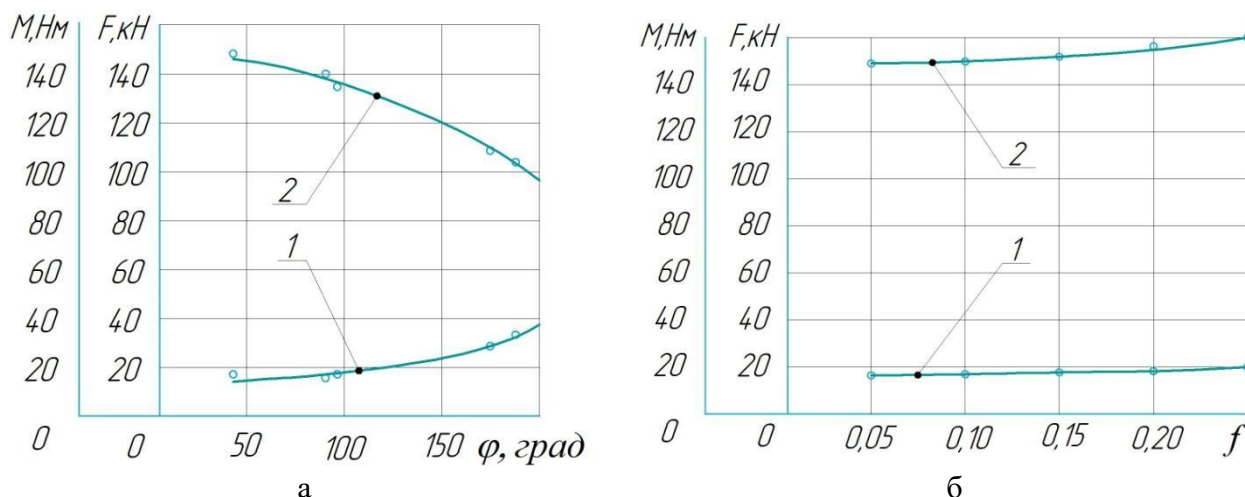


Рис. 6. Залежності величини сили і моменту відрізки від кута повороту рухливого ножа (а) та від величини коефіцієнту тертя (б) для трубчастого прокату із сталі AISI – 1006 при $e = 0,5 \dots 3,0$ мм

Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження розділення трубчастих заготовок за схемою «ексцентричного закручування».

Експериментальна установка (рис. 7) створена на базі одноступінчастого циліндричного редуктора з косозубою передачею і порожнім вихідним валом. Установка складається із корпусу 4, в якому закріплено нерухливий ніж 2, а рухливий ніж 3 у свою чергу закріплений на вихідному валу 5. Трубчастий зразок 1 розміщується в отворі ножів 2, 3. Вал 5 обертається в підшипниках 6. При цьому вісь обертання вала 5 зміщена щодо осей обертання ножів 2, 3 на величину ексцентриситету e .

Установка працює в такий спосіб. Трубчастий зразок 1 подається в отвір ножів 2, 3 до упору. Нерухливий ніж 2 закріплено на корпусі штампа 4, а рухливий ніж 3 закріплено на валу 5. Вал обертається в підшипниках 6. При цьому вісь обертання вала 5 зміщена щодо осей обертання ножів 2, 3 на величину ексцентриситету e . На робочому ході рухливий ніж 3 робить обертовий рух навколо своєї осі з одночасним пластичним вдавненням ріжучих крайок ножів 2, 3 і крученням відрізаємої заготовки в площині розділення до руйнування.

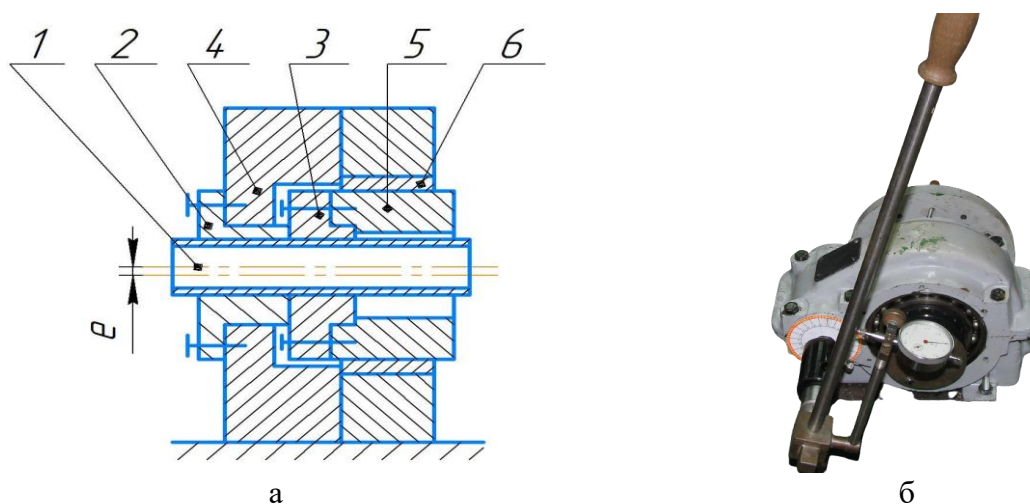


Рис. 7. Конструкція (а) й фотографія (б) експериментальної установки для розділення труб ексцентричним закручуванням

Передаточне число редуктора $U = 4,3$. В експерименті використовувалися трубчасті зразки з розмірами: зовнішній діаметр 16 мм, внутрішній – 12 мм і довжина – 200 мм. Матеріал зразків: Ст 08; Сталь 45.

Досліджували вплив величини ексцентриситету e на енергосилові параметри процесу розділення трубчастого прокату. Величина ексцентриситету e , мм: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0.

Силові параметри процесу розділення вимірювали за допомогою одноручного динамометра з індикаторною голівкою, який попередньо тарували. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 8.

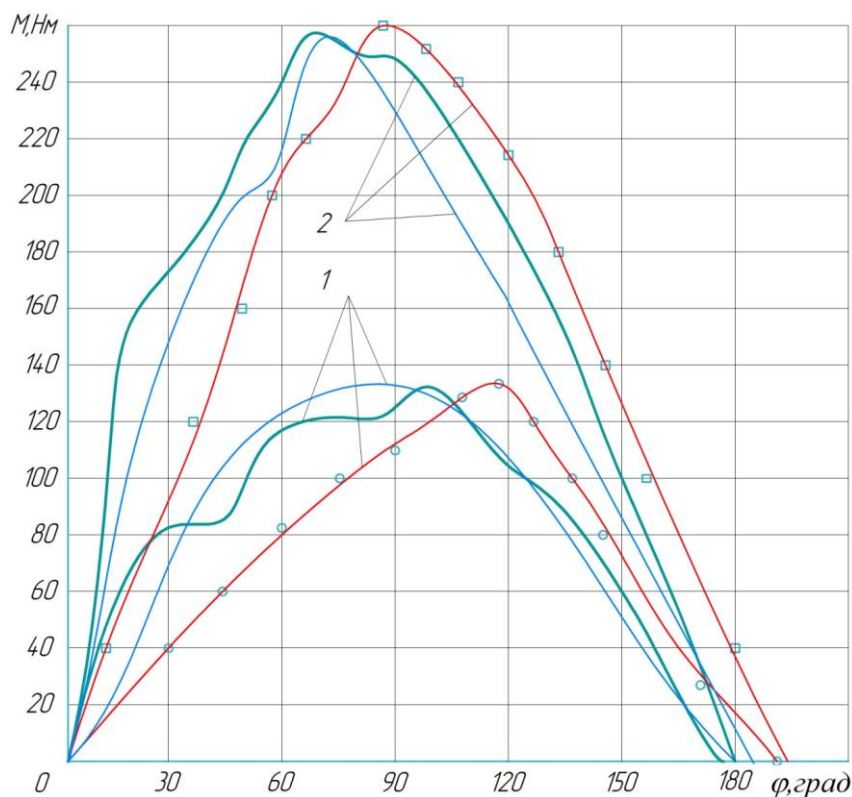
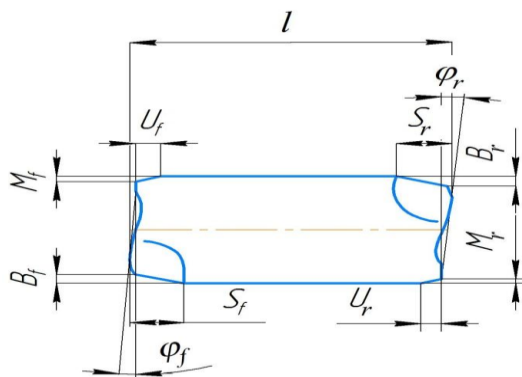


Рис. 8. Залежності моменту відрізки від кута повороту рухомого ножа для трубчастого прокату із сталі:

1 – Ст. 08, 2 – Сталь 45 при $e = 1,5$ мм і $f = 0,12$; — розрахунок DEFORM; — розрахунок за математичною моделлю; — експериментальні дані

Розбіжність максимальних значень моменту, отриманих теоретично й експериментально, не перевищує 6 % (див. рис. 8). Максимальні значення величини моменту відрізки, побудовані за результатами експерименту, зміщені по осі кута повороту рухливого ножа вправо. Це пояснюється вибіркою зазорів і пружною деформацією деталей конструкції.

Вимір геометричних параметрів, що характеризують геометричну точність відрізаних заготовок, проводили методом прямого виміру з використанням універсального вимірювального інструмента за відомою схемою вимірювання (рис. 9, а). Відрізані трубчасті заготовки мають задовільні показники геометричної точності. Фотографія відрізаної заготовки представлена на рис. 9, б.



а

б

Рис. 9. Схема вимірювань відносних середніх величин викривлень геометричної форми трубчастих заготовок (а) і фотографія відрізаної заготовки зі Ст. 08 при $e = 1,5$ мм: φ – кут скосу торця; M, U – поперечний і повздовжній розміри утяжини; B, S – поперечний і повздовжній розміри вм'ятини від ножа; f, r – індекси для позначення переднього і заднього торців

Результати проведених вимірювань відносних середніх величин викривлень геометричної форми трубчастих заготовок, отриманих відрізкою «ексцентричним закручуванням», представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Показники геометричної точності трубчастих заготовок

Матеріал	Величина викривлень									
	φ , град		$u = U/d$		$s = S/d$		$m = M/d$		$b = B/d$	
	$\varphi_{\text{п}}$	$\varphi_{\text{з}}$	$u_{\text{п}}$	$u_{\text{з}}$	$s_{\text{п}}$	$s_{\text{з}}$	$m_{\text{п}}$	$m_{\text{з}}$	$b_{\text{п}}$	$b_{\text{з}}$
Ст 08	2,00	1,00	0,02	0,01	0,05	0,03	0,01	0,01	0,06	0,04
Сталь 45	1,50	1,00	0,02	0,01	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05	0,04

Для промислового впровадження результатів дослідження запропонована конструкція установки (рис. 10), у якій в якості головного виконавчого механізму застосовано клиношарнірний механізм з увігнутим клином [11, 14]. Установка складається з корпусу, що містить плиту: верхню 2, нижню 3, передню 4, задню 5, поперечну ліву 6 і поперечну праву 7, скріплених за допомогою болтів і штифтів. Приводом обладнання служить клиношарнірний механізм із увігнутим клином, що містить клин 1 з увігнутим профілем, установлений з можливістю зворотно-поступального руху, шарнір 8, який, з одного боку, контактує по криволінійній поверхні радіуса R із клином 1, а, з іншого боку – по криволінійній поверхні радіуса r з рамним повзуном 9, який також установлений з можливістю зворотно-поступального руху. Шарнір 8 установлений з можливістю коливального руху в повзуні 9 відносно осі штифта 10. У повзуні 9 концентрично розміщується шайба 11. У шайбі 11 у підшипниках ковзання встановлений рухливий втулковий ніж 12 з можливістю обертового руху. Поруч із ним до задньої плити 5

закріплений нерухливий ніж 13. При цьому осі обертання ножів 12, 13 зміщені друг відносно друга на величину ексцентриситету e . Повзун 9 підпружинений за допомогою буфера 14, виконаного з поліуретану. Сила попереднього стискання буфера регулюється за рахунок гайки 15. Клин 1, шарнір 8, повзун 9 установлені в напрямних.

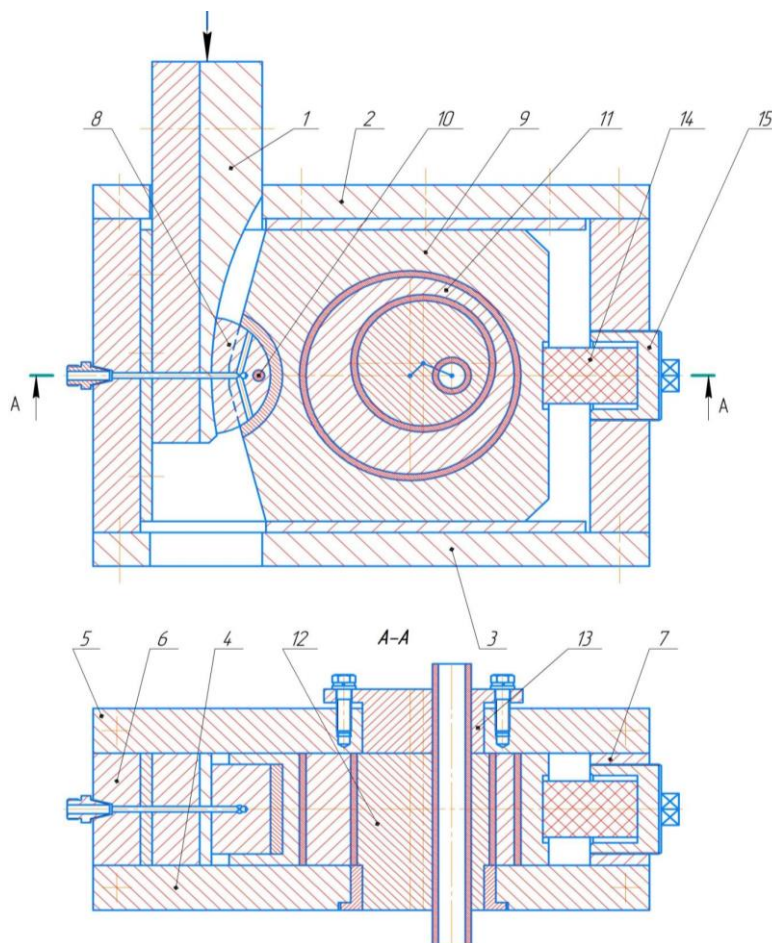


Рис. 10. Установка для відрізки трубчастих заготовок

У клиношарнірному механізмі із увігнутим клином рух починається з положення увігнутого клина при куті повороту шарніра 0° , коли сила на повзуні максимальна. Тобто клиношарнірний механізм з увігнутим клином за графіком зміни сили деформування максимально наближається до типового графіка сил, характерного для процесів розділення сортового і трубного прокату.

При цьому клиношарнірний механізм із увігнутим клином має збільшені опорні поверхні, невелику висоту ланок за напрямком дії робочої сили. Тому застосування в машинах клиношарнірного механізму з увігнутим клином забезпечує меншу пружну деформацію й динаміку преса, підвищення коефіцієнта використання преса.

У запропонованій конструкції установки використаний компактний кривошипно-шатунний механізм у комбінації з рамним повзуном. Розвинена площа опори шатуна в повзуні механізму знижує питомі сили в цій опорі й сприяє гасінню коливань, що в комбінації з малою деформаційною зоною приводить до високої динамічної стійкості й відсутності розгойдування на фундаменті.

ВИСНОВКИ

Запропонована перспективна схема відрізки трубчастих заготовок – «ексцентричним закручуванням» з використанням «кривошипно-кругового» механізму. Розроблена математична модель обладнання з «кривошипно-круговим» механізмом для відрізки труб «ексцентричним закручуванням». Проведене моделювання технологічного процесу відрізки труб «ексцентричним закручуванням» з використанням програмного комплексу DEFORM. Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження розділення трубчастих заготовок на установці оригінальної конструкції. Відрізані трубчасті заготовки мають задовільні показники геометричної точності.

Отримані результати експериментальних досліджень щодо відрізки трубчастих заготовок за схемою ексцентричного закручування задовільно узгоджуються з теоретичними даними, які розраховані, як за допомогою запропонованої математичної моделі, так і спеціалізованої програми DEFORM. Розбіжність максимальних значень моменту, отриманих теоретично й експериментально, не перевищує 6% (див. рис. 8). Максимальні значення величини моменту відрізки, побудовані за результатами експерименту, зміщені по осі кута повороту рухливого ножа вправо. Це пояснюється вибіркою зазорів і пружною деформацією деталей конструкції.

Аналіз отриманих результатів показує, що на величину енергосилових параметрів процесу розділення трубного прокату і геометричну точність отриманих заготовок значний вплив має величина ексцентриситету e . Зі збільшенням величини ексцентриситету до величини $e \approx 2$ мм сила відрізки зменшується, а потім, при $e > 2$ мм, величина сили збільшується (див. рис. 5, а). Зі збільшенням величини ексцентриситету момент відрізки трубчастих заготовок збільшується. Для забезпечення геометричної точності отриманих заготовок величину ексцентриситету рекомендується приймати в діапазоні $0,5 \cdot \delta \leq e \leq 1,5 \cdot \delta$. Коефіцієнт тертя не суттєво впливає на величину моменту і сили відрізки.

Для промислового впровадження результатів досліджень запропонована конструкція установки із клиношарнірним приводом з увігнутих клином у комбінації з «кривошипно-круговим» механізмом для розділення труб за схемою «ексцентричного закручування». Обладнання має високі техніко-економічні показники за рахунок того, що клиношарнірний механізм з увігнутих клином за графіком зміни сили деформування максимально наближається до типового графіка сил, характерного для процесів розділення сортового і трубного прокату. А розвинена площа опори шатуна в повзуні механізму знижує питомі сили в цій опорі й сприяє гасінню коливань, що в комбінації з малою деформаційною зоною приводить до високої динамічної стійкості й відсутності розгойдування на фундаменті. Результати проведених досліджень рекомендовано до застосування у заготівельних виробництвах підприємств України широкого промислового профілю.

REFERENCES

1. Wang J., Ibaraki S., Matsubara A. A cutting sequence optimization algorithm to reduce the workpiece deformation in thin-wall machining. *Precision Engineering*. 2017. 50, pp. 506–514. DOI:10.1016/j.precisioneng.2017.07.006.
2. Gang Wang, Shifan Qiao, Guang Wang, Huan Jiang. Cutting depth of pile materials subjected to the abrasive waterjet and its prediction model. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. 124, pp. 104–473. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104473 .
3. An H. P., Li L., Wang L. Research on designing project of transmission system about machine for cutting metal cannulation. *Coal Technology*. 2009. 12, pp. 17–19.
4. Jiang Y., Pi J., Xiao J., Zhang Y., Jiang T., Yang G., Shen Z. A novel method for effecting flexible guided wave propagation in elliptical vibration cutting. *Precision Engineering*. 2012. 72, pp. 437–447. DOI:10.1016/j.precisioneng.2021.06.006.
5. Karnaukh S.G. Improvement of equipment for separating long products into dimensional blanks. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk : DSEA. 2017. 2(45), pp. 154–160 (in Russian).
6. Shigematsu S., Tanigawa H., Aburadani A., Takeda N., Kakudate S., Mori S., Merola M. Verification test results of a cutting technique for the ITER blanket cooling pipes. *Fusion Engineering and Design*. 2012. 87(7-8), pp. 1218–1223. DOI:10.1016/j.fusengdes.2012.02.108.
7. Qian Y. P., Huang X., Zhou X. Z. Development of a tube cutting head for thin-walled stainless steel. *Machine tool and hydraulics*. 2014. 16, pp. 18–19.

8. Zhe Zhang, Dong Liu, Zhenfei Li, Yangyang Zhang, Runqiang Zhang, Yanhui Yang, Yuhua Pang, Jianguo Wang. Study on the shear-torsion deformation of rotary tube piercing process for nickel base superalloy. *Journal of materials processing technology*. 2021. 295, pp. 117–153. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117153.
9. Yi J., Qian Y., Shang Z., Yan Z., Jiao Y. Design of cutting head for efficient cutting machine of thin-walled stainless steel pipe. *Procedia engineering*. 2017. 174, pp. 1276–1282, DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.302 .
10. Yi J., Qian Y., Shang Z., Yan Z., Jiao Y. Structure analysis of planetary pipe cutting machine based on ansys. *Procedia Engineering*. 2017. 174, pp. 1283–1288. DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.272 .
11. Pat. 51501 Ukraine, B23D 31/00, B23D 23/00. Device for separating long rolled products into standard work-pieces using the method of eccentric twisting. Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. u200911584; declared 11/13/2009; published 07/26/2010. Bull. No. 14 (in Russian).
12. Kasuga Y., Machida T., Kato N. Effect of cutting conditions on press cutting of a square pipe. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. 143, pp. 716–722. DOI:10.1016/s0924-0136(03)00367-4.
13. Vladimirov E. A., Sholeninov V. E. Complex calculation of the actuating mechanism of a press with Assur groups of arbitrary structure. *Improvement of processes and mastery of vice processing in metallurgy and mechanical engineering : Thematic collection of works*. Kramatorsk: DSEA. 2007, pp. 316–321 (in Russian).
14. Roganov L. L., Chosta N. V. Promising design schemes of machines for separating rolled products with a wedge-hinged mechanism. *Improvement of processes and processing with a vice in mechanical engineering and metallurgy : Collection of scientific works*. Kramatorsk – Slovyansk : DSEA. 2000, pp. 437–439 (in Russian).

Karnaukh S. Theoretical and experimental investigation on the process of separating rolled pipes using an eccentric torsion scheme

The work presents the results of theoretical and experimental studies of the energy-power parameters of the separation process, the geometric accuracy of pipe-part blanks using the «eccentric twisting» method. A mathematical model of a device with a «crank-circular» mechanism for cutting pipes by «eccentric twisting» has been developed. The technological process of cutting pipes by «eccentric twisting» was simulated using the DEFORM software package. To verify the results of theoretical calculations, experimental studies of pipe separation were conducted on an original design installation. The cut tubular work-piece have satisfactory geometric accuracy. The obtained results of experimental studies are in good agreement with the theoretical data calculated using the proposed mathematical model and the specialized program DEFORM. The maximum differences between the cutting torque values obtained theoretically and experimentally do not exceed 6%. The theoretical results were slightly underestimated due to the need for more accurate frictional accounting in rotating pairs, as well as some discrepancy in the mechanical properties of the material of experimental samples with the material from the base steels of the DEFORM program. For the industrial implementation of research results, a design of an installation with a wedge-hinged drive with a concave wedge in combination with a «crank-circular» mechanism for separating pipes by the «eccentric torsion» scheme is proposed. The wedge-hinged mechanism with a concave wedge has large support surfaces, a small height of the links in the direction of the working force, which provides less elastic deformation and machine dynamics and increases the utilization coefficient of forging and pressing equipment. At the same time, the developed support area of the connecting rod in the slider of the «crank-circular» mechanism reduces the specific forces in this support and contributes to the damping of vibrations, which, combined with a small deformation zone, leads to high dynamic stability and absence of rocking on the foundation.

Key words: separation, eccentricity, torsion, pipe, moment, quality.

Карнаух Сергій Григорович – канд. техн. наук, доцент ДДМА
Karnaukh Sergii – Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor DSEA
E-mail: karnaukh.sergii@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2878-4065>.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

Стаття надійшла до редакції 12.07.24 р.