

Гожій С. П.
Мироненко В. А.

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ОРБІТАЛЬНОГО ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Наукові дослідження процесів і обладнання орбітального штампування обкочуванням проводяться на кафедрі технології виробництва літальних апаратів Науково-навчального механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» з 70 років минулого століття до теперішнього часу. За цей час накопчений достатній досвід створення енергоефективних технологій і обладнання для орбітального штампування обкочуванням. Всі наукові розробки створені на підставі якісних ефектів процесу та підкреслюють його унікальні можливості та перспективу застосування. Зважаючи на те, що сучасним інструментом дослідження процесів обробки металів тиском є комп'ютерні технології моделювання, які застосовують метод скінченних елементів, пріоритет залишається за експериментальними дослідженнями, завдяки яким і зафіксовано більшість якісних ефектів орбітального штампування, відображених в статті. Особлива увага приділялась ефективному позитивному застосуванню якісних ефектів штампування обкочуванням. Зокрема, такий ефект як виникнення зони дії напружень розтягування може енергоефективно використаний для утворення центральної порожнини. А ексцентричне прикладання зусилля деформування можливо ефективно урівноважити, що не тільки зменшить навантаження на обладнання, а і створить основу для низки оригінальних технологій. Відповідні технологічні і конструкторські рішення, що базуються на результатах наукових і експериментальних досліджень процесу, запроваджуються у виробництво і закладені в основу при написанні цієї статті.

Ключові слова: орбітальне штампування, штампування обкочуванням, модель пластичних деформацій, метод скінчених елементів, середні питомі зусилля, зусилля деформування, осередок деформації.

Розвиток процесів деформування інструментом, що локально деформує заготовку і сукупно призводить до об'ємної формозміни, постійно доповнює виробничу практику новими технологічними можливостями. Як правило характерні особливості штампування обкочуванням покладені в основу процесу базуються на особливостях процесу і вигідно відрізняються від традиційних методів обробки тиском з точки зору енергоефективності. Останнім часом запроваджені технологічні варіанти класичної схеми орбітального штампування як у напрямку розширення технологічних схеми деформування, так і спеціального обладнання [1, 2, 3, 4]. Відповідно, що ці особливості потребують наукового і технологічного узагальнення для широкого практичного застосування.

Мета статті – аналіз на конкретних прикладах технологічних переваг орбітального штампування; – виявлення фізичної сутності ефективності процесу одночасно з аналізом конструкторських рішень обладнання, що його реалізує; – виділення особливостей багатогранного протікання процесу та його застосування з точки зору енергоефективності.

Сутність методу орбітального штампування полягає в тому, що активний інструмент, який має конічну або більш складну формоутворюючу поверхню, шляхом багаторазової циклічної силової дії об'ємно формує заготовку. Деформування верхньої зони відбувається локально, але поступово охоплює поверхневий шар заготовки, товщина якого залежить від кінематичних характеристик процесу та геометрії деталі.

Спрощена схема процесу представлена на рис.1 на прикладі осаджування циліндричного зразка. Осаджування циліндричної заготовки 1 виконується між активним інструментом 2, що має конічну робочу поверхню, та опорним інструментом 3 з плоскою робочою поверхнею, але в разі виконання операції об'ємного штампування інструмент 3 має порожнину, що відповідає формі виробу і яка буде заповнюватись в результаті штампування. Активний інструмент 2 виконує орбітальний рух відносно вершини O . Найбільш простим в реалізації є круговий обертальний [1, 2] рух, при якому активний інструмент буде обкачуватися по заготовці 1. При цьому кут нахилу осі OZ_1 активного інструмента 2 відносно вертикальної осі OZ складає кут γ . Деформування заготовки проходить при осьовому зближенні інструментів 2 і 3 та орбітальному русі обкочування активного інструмента 2. Закон зміни кута γ та рух осі OZ_1

активного інструменту 2 можуть бути змінними, що забезпечить і різноманітний вид орбітального руху (від руху по колу до спірального або прямолінійного тощо). За таких умов контакт між активним інструментом 2 та заготовкою 1 відбувається по частині торцевої поверхні заготовки площею F , яка є плямою контакту (затемнена область на рис.1). Треба зауважити, вид орбітального руху задається відповідним механізмом обладнання [1, 2], який може бути доволі складним як в реалізації, так і в обслуговуванні. Багаторічний практичний досвід доводить, що найбільш затребуваним і простим в реалізації є механізм з постійним кутом γ та рухом по колу [3].

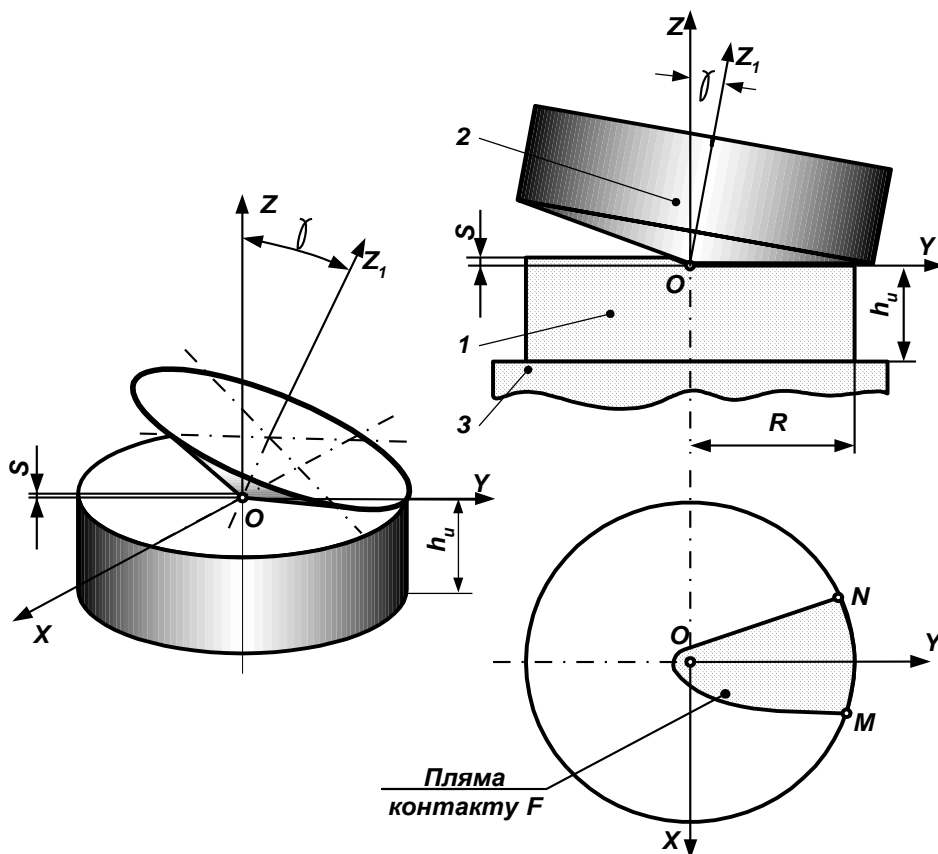


Рис. 1. Схема процесу осаджування обкочуванням циліндричного зразка:

(1 – заготовка; 2 – активний інструмент; 3 – опорний інструмент; h_u – поточна висота заготовки; R – поточний радіус заготовки; NM – дуга осередку контакту; інші позначення надані в тексті)

Для демонстрації наочності протікання процесу, застосовують коефіцієнт λ , який визначається співвідношенням площі плями контакту F до площі всього торця заготовки $F_T = \pi R^2$ та наглядно демонструє вигравш по зусиллю. Коефіцієнт λ залежить від групи геометричних та кінематичних параметрів [4, 5]:

$$\lambda = \frac{F}{F_T} = \sqrt{\frac{S}{\pi^2 R \cdot tg \gamma}}, \quad (1)$$

де v – швидкості вздовж осі заготовки;

n – частота обкочування;

S – узагальнений параметр – подача на оборот (рис. 1)

$$S = \frac{v}{n}. \quad (2)$$

Зона пластичної деформації при переміщенні плями контакту, зокрема по колу, охопить увесь верхній об'єм заготовки 1. Відповідно, що для проведення пластичного деформування, необхідно прикласти до інструментів 1 і 3 осьове зусилля P для їх зближення, та момент обкочування M до активного інструменту 2.

При цьому вісь активного інструменту нахилена на кут γ та виконує обертальний рух відносно осі заготовки з одночасним обертанням самого активного інструменту в протилежному напрямку. Швидкості обертання осі активного інструменту та самого інструменту, як правило, узгоджуються умовою мінімального тертя між активним інструментом і заготовкою на стільки, що виникає враження що інструмент обкочується по поверхні заготовки. Можлива ситуація, коли активний інструмент не має власного приводу, а обкочується лише завдяки контактним силам тертя. Така обробка має низку як позитивних, так і моментів, які, на перший погляд, зменшують ефективність протікання процесу, але можуть бути використані позитивно і впливати на енергоефективність процесу.

Однією з основних переваг штампування обкатуванням є 5...20-ти кратне зниження зусилля осьового навантаження, яке оцінюється коефіцієнтом λ , та впливом умов тертя на контактній поверхні.

В даному випадку під впливом умов тертя на контактній поверхні слід вважати вираховання енергетичних витрат на здолаття сил тертя при пластичній течії матеріалу в локалізованому осередку, що в кінцевому результаті визначає значення середніх питомих зусиль $p_{сер}$, та задає енергетичні переваги процесу. Необхідно зауважити, що енергетичний вигравш на здолаття сил тертя в локалізованому осередку робить процес орбітального штампування енергоефективним в порівнянні з традиційними.

Дійсно, за літературними даними значення середніх питомих зусиль $p_{сер}$ рекомендуються в широкому діапазоні значень [6, 7]. Не зважаючи на масове застосування комп'ютерних програм розрахунків параметрів процесів середні питомі зусилля залишаються серед основних характеристик, в тому числі, і при застосуванні цифрових технологій, і при виконання найпростіших технологічних розрахунків. Це стосується як аналітичних, так і експериментальних визначень. Така ж картина має місце і при конкретних моделюваннях напружено-деформованого стану. Окрім широкого діапазону підходів, спрощень, точності вимірювань, похибок тощо переважна більшість результатів достовірні, а відмінності в результатах пояснюються неповним врахуванням ефектів штампування обкочуванням. Зокрема, розбіг значень середніх питомих зусиль може пояснюється тим, що в кожному випадку діють відмінні схеми протікання пластичних деформацій та утворення напружено-деформованого стану [8].

В [9] запропоновано розглядати межі дії моделі пластичних течій при штампуванні обкочуванням в комплексній залежності від відносних розмірів заготовки, кінематичних параметрів, а головне, на підставі якісних ефектів. Умовно розглянуто два варіанти, які визначають приналежність до відповідної моделі, зокрема: - модель пластичних течій у «високому» зразку; - модель пластичних течій у «тонкому» зразку. При цьому визначення «високий» чи «тонкий» зразок залежить не від конкретних розмірів зразка і не від його відносних розмірів, а визначається зоною розповсюдження пластичних деформацій по висоті. Якщо пластична зона (h_b) не охоплює всю висоту зразка (h_u), то це «високий» зразок, якщо пластичні деформації по всій висоті – «тонкий». Надалі не будемо вживати лапки в цих назвах.

На рис. 2 представлено графічне відображення дії моделей пластичних течій в товстій (рис. 2, а) і тонкій (рис. 2, б) заготовках. Як зазначалось вище в основу будови моделі були покладені якісні моменти формоутворення, що спостерігались при обкатуванні.

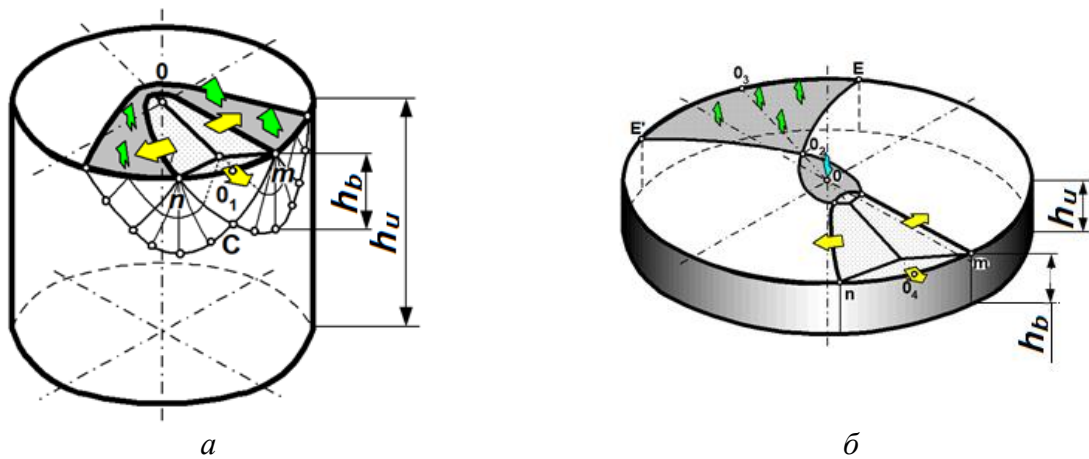


Рис. 2. Моделі пластичних течій в заготовках при осаджуванні обкочуванням циліндричного зразка (h_b – висота зони пластичних деформацій; h_u – висота зразка; nm – дуга пластичного осередку контакту):

a – для високої заготовки; b – для тонкої заготовки

Характерною ситуацією при обробці обкочуванням високої заготовки є набуття нею форми «гриба» (див. рис. 3, a) (стрижня із стовщенням), що є результатом пластичних деформацій в контактному осередку в тангенціальних і радіальному напрямках вздовж жовтих стрілок. І поза контактних деформацій (зелені стрілки) в осьовому напрямку. Шляхом утворення балансу робіт на здоляння зусиль перешкод в цій моделі знаходиться енергетичні витрати кожної складової та визначаються середні питомі контактні зусилля [9].

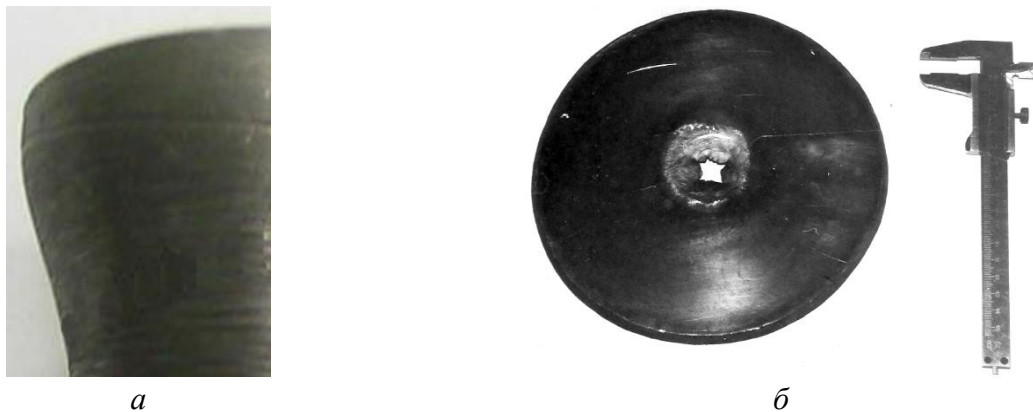


Рис. 3. Прояв характерних особливостей пластичних деформацій у вигляді радіального стовщення або стоншення і руйнування центральної частини заготовки при осаджуванні обкочуванням циліндричного зразка:

a – для високої заготовки; b – для тонкої заготовки

Характерною рисою при обкочуванні тонкої заготовки є утворення поза контактної порожнини та розривів центральної частини від дії напружень розтягу (це один з небагатьох випадків утворення схеми плоского розтягу при обробці металів тиском) (див. рис. 3, b). Така особливість пояснюється дією на поза контакту частину заготовки тангенціальної течії металу із контактного осередку. Поза контактна частина буде сприймати згинання відносно точки O_2 , відносно якої (як при згинанні) зовнішня половина тіла заготовки буде сприймати напруження стискування, а внутрішня – розтягування.

Зважаючи на характерні особливості проходження притаманних пластичних деформацій при штампуванні обкочуванням високої і тонкої заготовки можливо підвищити енергоефективність процесу шляхом закладання параметрів в ефективному інтервалі або застосуванні інших якісних ефектів. Зокрема, фланцева частина високої заготовці почне набувати грибоподібної форми ще до утворення контакту з формуючою порожниною штампу. Тому при

виготовлені фланцевого виробу треба застосовувати заготовку, яка спрямовано забезпечує параметри протікання процесу як для високої. На рис.4 представлені проміжні результати моделювання методом скінчених елементів осаджування (40% висотної деформації) циліндричної заготовки та розподіл напружень і деформацій. З формозміни видно, що циліндрична заготовка набуває фланцевої форми. Також треба виділити технічні рішення авторів [1] при розробці технологічного процесу виготовлення конічної шестерні.

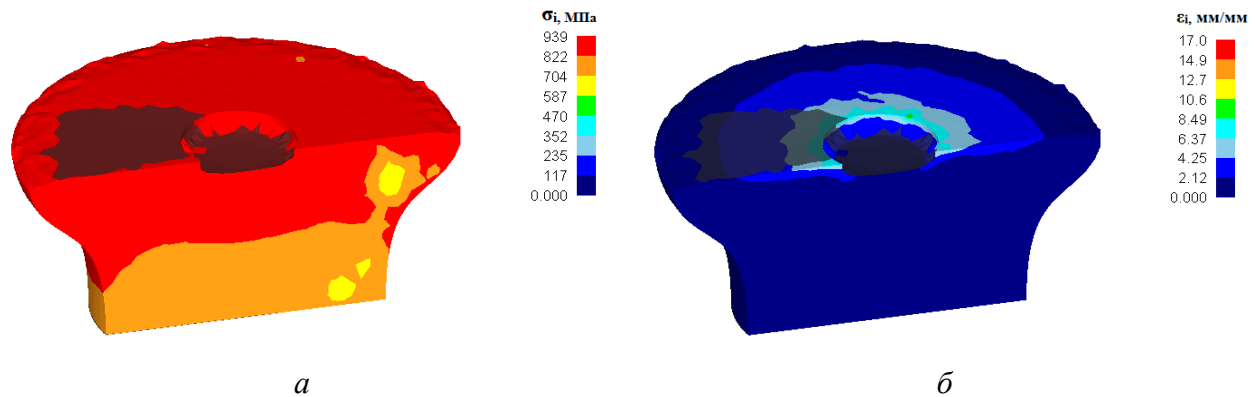


Рис. 4. Результати моделювання методом скінчених елементів осаджування високої заготовки на 40% висотної деформації:
 а – розподіл інтенсивності напружень; б – розподіл інтенсивності деформацій вздовж вертикальної площини по лінії $\theta-\theta_I$ (див. рис. 2, а)

Моделювання підтверджує наступні якісні ефекти осаджування обкочуванням:

- постійність радіальних напружень вздовж осередку деформацій в залежності від величини контактного осередку;
- наявність поза контактної зони деформацій у вигляді шарніру пластичності, що протилежить контактній, та наявність в ній напружень розтягування;
- відповідність зовнішньої формозміни осаджування обкочуванням, що отримана експериментальним шляхом, в перше чергу це стосується початкової відсутності деформування нижньої частини заготовки та утворення специфічної грибоподібної форми.

Застосування другого якісного моменту, який характерний при осаджуванні тонкої заготовки, спрямовує на корисне використання цієї ситуації в якості варіанту формоутворення центральної порожнини або отвору. Для утворення порожнини потрібні зменшені зусилля і енергетичні витрати оскільки пуансон, що буде утворювати порожнину буде занурюватись в осередок, де діють напруження розтягування.

Лідером на ринку обладнання для обладнання для орбітального штампування є преси моделей T200, T400, T630 "SCHMID. Heinrich Schmid Maschinen-und Werkzeugbau AG. FEINTOOL GROUP", які мають універсальне призначення та широкі технологічні можливості. Відмінною особливістю є оснащення преса додатковим приводним пуансоном, розташованим в корпусі активного рухомого інструменту. З одного боку, це надає нові технологічні можливості по формоутворенню центральної порожнини, при вилученні деталі з штампу або при прошиванні центрального отвору. З іншої сторони, перелічені операції виконуються в положенні, коли рухомий активний інструмент займає суто вертикальне положення. Забезпечити одночасне штампування обкочуванням з нахилом осі на кут γ та центральне занурення пуансону на цьому обладнанні конструкційно неможливо.

Запропоновано оригінальний механізм обкочування [10]. Механізм (рис. 5, а) складається з корпусу 1, в якому встановлений на опорному 2 і радіальних підшипниках 3 пресувач 4. Пресувач 4 обертається від приводу (на рис. 5 не показаний). Пресувач 4 має внутрішню порожнину з нахиленої, щодо зовнішніх поверхонь, віссю. У внутрішній порожнині пресувача 4 на опорному 5 і радіальному 6 підшипниках встановлений з можливістю обертання рухомий

активний інструмент 7, що має центральний наскрізний отвір. У корпусі 1 вздовж осі встановлений привод прошивного пуансону 8 (в даному випадку у вигляді гідравлічного циліндра) з можливістю забезпечення руху пуансону 9 вздовж осі механізму. Пуансон 9 проходить через центральний отвір активного інструменту 7, причому в неробочому стані, коли штампування не відбувається, пуансон 9 виступає за крайню робочу кромку рухомого інструменту 7 на величину m . Для забезпечення роботи пуансона 9 протягом періоду штампування величина його переміщення k вздовж осі повинна бути більшою ніж сумарна величина виступу пуансону за крайню робочу кромку рухомого пуансона m і робочого ходу інструменту 7 вздовж осі нерухомого штампу 10 за період висотної обробки заготовки 11.

Перед тим як рухомий інструмент 7 утворить контакт з заготовкою, пуансон 9, який виступає за робочу поверхню рухомого інструменту 7 на величину m , спочатку фіксує заготовку 11. Після притискування заготовки 11 проходить процес пластичного деформування до кінцевих розмірів деталі 12 як із сторони рухомого інструменту 7, так і пуансону 9.

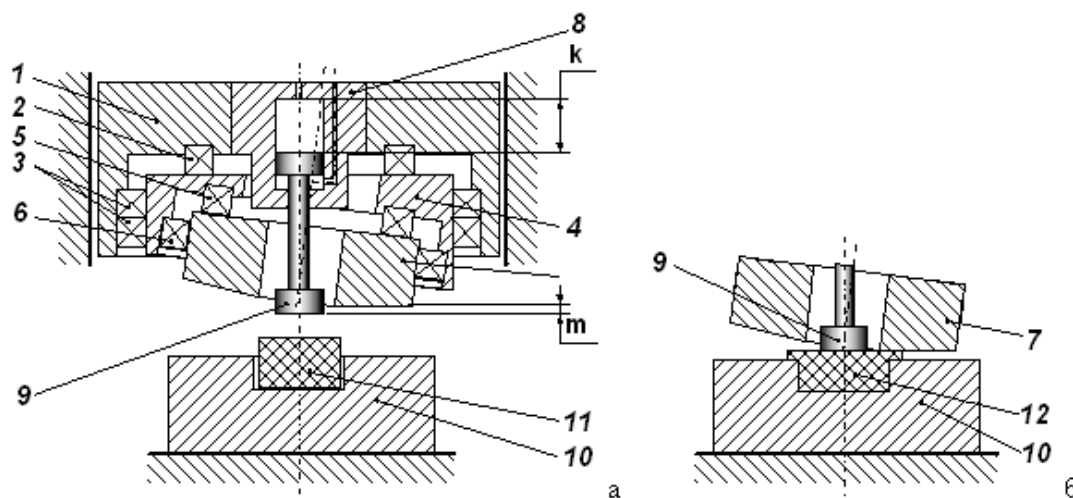


Рис. 5. Конструкція механізму обточування з пристроєм для центральної фіксації та прошивання заготовки (1 – корпус; 2, 5 – опорний підшипник; 3, 6 – радіальний підшипник; 4 – пресувач; 7 – активний інструмент; 8 – гідравлічний циліндр; 9 – пуансон; 10 – нерухомий штамп; 11 – заготовка з початковими розмірами; 12 – виріб з кінцевими розмірами; m – регульована величина виступу пуансону):

a – початкова стадія обробки; *б* – кінцева стадія

Робота пристрою, що показано на рис.5 і сам технологічний процес змодельовані на прикладі об'ємного штампування обточуванням деталі «шестерня насоса», яка показана на рис. 6. Схема процесу при моделюванні показана на рис. 7, *a*. Деталь має розвинуту фланцеву частину та крізний центральний отвір, матеріал 0,35 % вуглецю та 1 % хрому, використовується відокремлена від прутка циліндрична заготовка. За запропонованою технологією (див. рис. 7, *a*) отвір в заготовці 1 з розмірами D_0 та H_0 розташований на опорному інструменті 4 суміщено прошивається центральним приводним пуансоном 3 діаметром d на глибину 2 мм. На цей момент заготовка 1 надійно зафіксувала від зміщень відносно вертикальної осі в момент дотику активним інструментом 2. Далі занурення центрального пуансону 3 проводиться одночасно із штампуванням обточуванням фланцевої частини під впливом активного інструменту 2.

Протікання формоутворення за схемою на рис. 7, *a* має характерні ознаки, що притаманні штампуванню обточуванням, про що свідчать графіки розподілу зусиль деформування по ходу переміщення на прошивному пуансоні 3 та активному інструменті 2. Графіки зусилля-переміщення представлені на рис. 8. Для з'ясування закономірностей залежності енерго-сило-вих параметрів процесу від відносних розмірів циліндричної заготовки проводилась група

моделювань для різних співвідношень розмірів заготовки. В представлених результатах моделювання проводилось для випадку $H_0/D_0 = 0,5$; $d/D_0 = 0,4$. При таких конкретних співвідношеннях заготовки має місце неповне заповнення порожнини опорного інструменту (виділено червоною лінією на рис. 7, б), що вказує на інтенсивні радіальні деформації з під прошивного пуансону, але при інших співвідношеннях H_0/D_0 та d/D_0 спостерігається вже повне заповнення порожнини. З іншої сторони інтенсивні радіальні напрями течії матеріалу в майбутньому доречно використати для формоутворення зубців колеса.

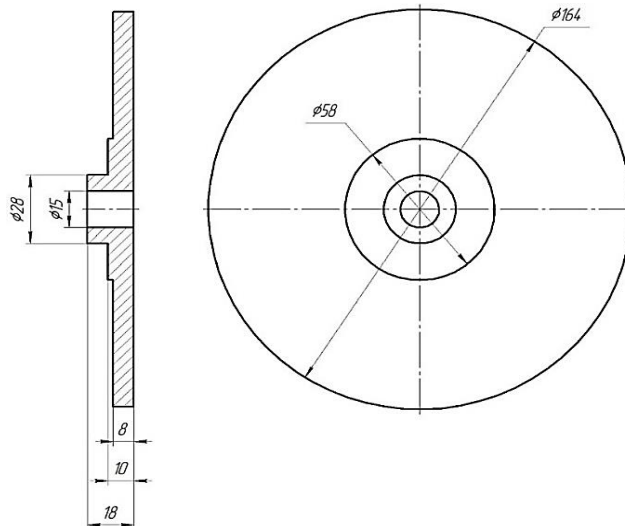


Рис. 6. Креслення деталі «шестерня насосу»

На графіку (рис.8) можна виділити п'ять характерних зон: 1 – початковий момент прошивання, коли зусилля на пуансоні стрімко зростає; 2 – стала фаза прошивання, при якій зусилля прошивання приблизно постійне; 3 – початковий момент формоутворення фланця штампуванням обкочуванням, коли зусилля на активному інструменті зростає; 4 – стала фаза штампування обкочуванням з одночасним прошиванням; 5 – кінцева стадія процесів штампування обкочуванням та прошивання, коли зменшуються товщини заготовки та зростає робота по подоланню сил тертя.

Практично всі графічні залежності відповідають класичним закономірностям обробки металів тиском, але, на перший погляд, дивним здається падіння зусилля на пуансоні починаючи з зони 3 (лінія синього кольору на графіку). Цьому є фізичне пояснення, яке базується на врахуванні дії якісних моментів моделі пластичних течій в тонкій заготовці (див. рис. 2, б). Річ в тім, що коли починається процес штампування обкочуванням (зона 3) в центральній частині заготовки утворюється осередок дій напружень розтягування, що і викликає зменшення зусилля прошивання.

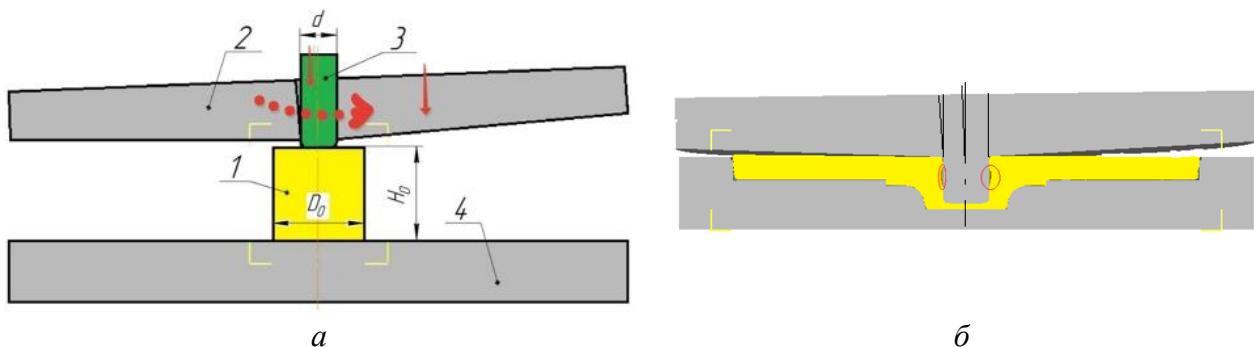


Рис. 7. Схема процесу та результати формоутворення деталі «шестерня насосу»: а – схема процесу моделювання; б – результати формоутворення деталі «шестерня насосу»

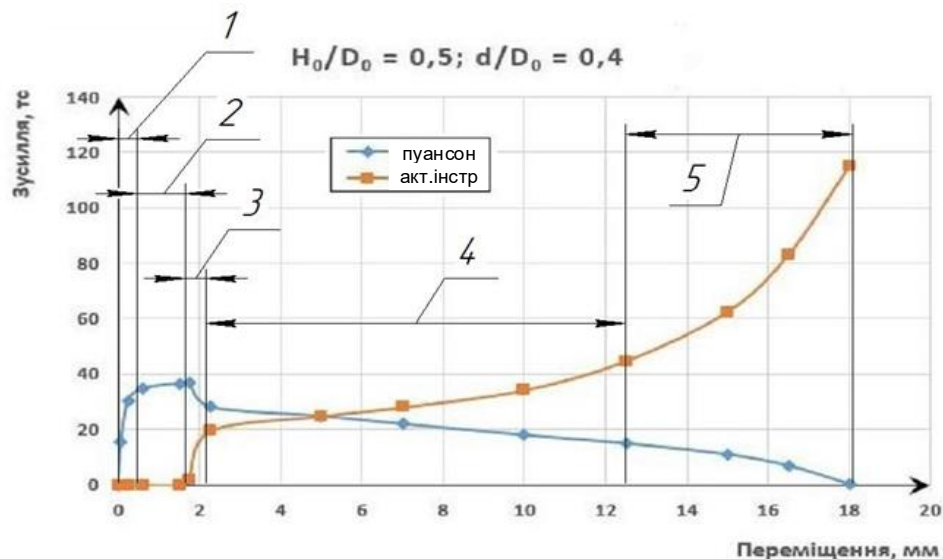


Рис. 8. Графіки зусилля-переміщення на пуансоні при прошиванні заготовки та на активному інструменті при штампуванні обкочуванням за результатами моделювання процесу

Таким чином спрямоване утворення в центральній частині заготовки напружень розтягування при штампуванні обкочуванням, що в деяких випадках може привести до браку та навіть до руйнувань центру деталі, можливо корисно використати з метою утворення порожнини. Енергетичні витрати формування порожнини в зоні утворення напружень розтягування є меншими.

Одним з недоліком орбітального штампування є ексцентричне прикладання зусилля, що накладає додаткові умови на закладання міцності при проєктуванні і виготовлення спеціалізованого обладнання, що, не зважаючи, на зменшення зусилля деформування впливає на зростання його матеріалоемності. Це питання вирішується використанням при штампуванні обкочуванням симетричних схем навантаження із задіянням декількох активних інструментів [11, 12]. Наприклад, в [12] розглянутий механізм обкочування, який має два приводних активних інструменти (рис. 9, а). Активні інструменти мають діаметрально протилежне розташування і при виконанні орбітальних рухів утворюють дві плями контакту з поверхнею заготовки, яка розміщується на опорному інструменті. Результатом такої подвійної дії є взаємне урівноваження технологічних зусиль відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній плямі контакту. Серед особливостей такої конструкції слід відзначити, що кут нахилу осі обкочування $\gamma \approx 45^\circ$, що може бути недостатнім для виконання деяких операції штампування обкочуванням та створенням випадків аналогічних до прокатування від дії недостатніх сил тертя.

Другий механізм має всі атрибути механізму обкочування класичної конструкції та рекомендовані значення кута γ . Заготовка 1 розміщується на опорному інструменті 2 та обкочується одночасно як активним внутрішнім інструментом 3, так і зовнішнім активним інструментом 4. На радіальних підшипниках 5, 6 встановлений з можливістю обертання ротор 9, який має дві діаметрально протилежні ексцентрикові розточки, в яких закріплені два сферичні підшипники 7, 8. Від дії обертального руху ротора 9 на активні інструменти 3, 4 утворюється їх орбітальний рух обкочування. Механізм подвійного обкочування змонтований в корпусі 10, який є опорою для активних інструментів 3, 4, що спитаються один на одного. Таким чином утворюються два деформуючі зусилля 11, 12 від дії кожного з активних інструментів. Внутрішнє зусилля 11 від активного інструменту 3 з утворенням плями контакту 13 та периферійне зусилля 12 від активного інструменту 2 з утворенням плями контакту 14. Як видно зусилля 11, 12 взаємно урівноважують одне одного відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній

плямі контакту 13, 14. Серед особливостей такого технологічного процесу є можливість формування на межі дії активних інструментів 2, 3 висотного виступу на торцевій поверхні деталі 1, що значно розширює технологічні можливості пристрою.

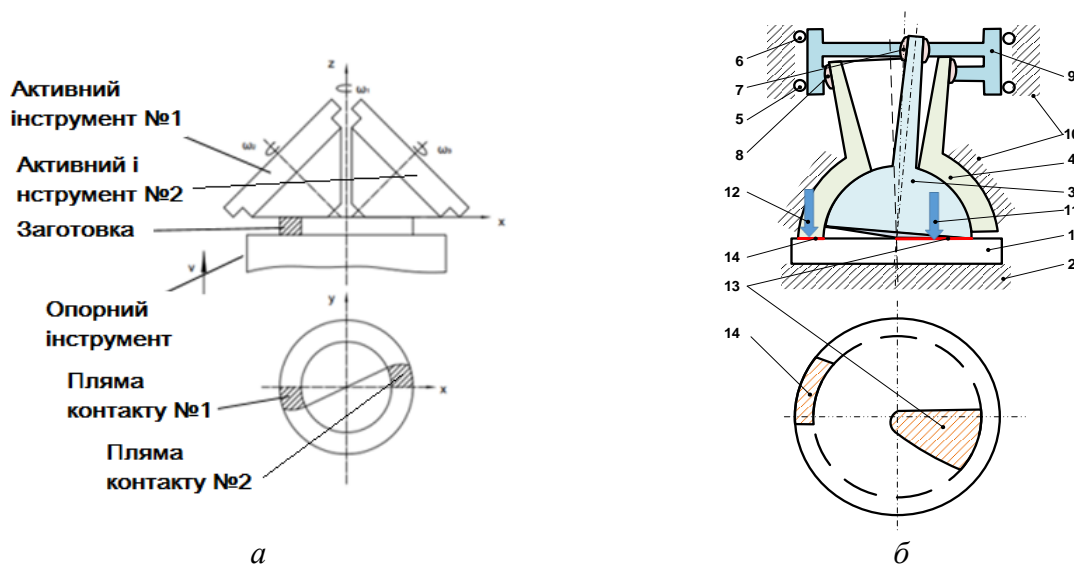


Рис. 9. Механізми обкочування, які мають два приводних активних інструменти, що створюють врівноважені деформуючі зусилля (1 – заготовка; 2 – опорний інструмент; 3 – внутрішній активний інструмент; 4 – зовнішній активний інструмент; 5, 6 – підшипники; 7, 8 – сферичні підшипники; 9 – ротор; 10 – корпус; 11, 12 – деформуючі зусилля; 13, 14 – плями контакту):

a – за [12]; *б* – авторська розробка

Другий механізм має всі елементи механізму обкочування класичної конструкції та рекомендовані значення кута γ . Заготовка 1 розміщується на опорному інструменті 2 та обкочується одночасно як зовнішнім активним інструментом 3, так і внутрішнім активним інструментом 4. На радіальних підшипниках 5, 6 встановлений з можливістю обертання ротор 9, який має дві діаметрально протилежні ексцентрикові розточки, в яких закріплені два сферичні підшипники 7, 8. Від дії обертального руху ротора 9 на активні інструменти 3, 4 утворюється їх орбітальний рух обкочування. Механізм подвійного обкочування змонтований в корпусі 10, який є опорою для активних інструментів 3, 4, що спитаються один на одного. Таким чином утворюються два деформуючі зусилля 11, 12 від дії кожного з активних інструментів. Внутрішнє зусилля 11 від активного інструменту 3 з утворенням плями контакту 13 та периферійне зусилля 12 від активного інструменту 2 з утворенням плями контакту 14. Як видно зусилля 11, 12 взаємно урівноважують одне одного відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній плямі контакту 13, 14. Серед особливостей такого технологічного процесу є можливість формування на межі дії активних інструментів 2, 3 висотного виступу на торцевій поверхні деталі 1, що значно розширює технологічні можливості пристрою.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті в статті варіанти застосування технологій і обладнання операцій орбітального штампування обкочуванням запроваджені чи можуть бути використані на виробництві з метою подальшого підвищення його енергоефективності.

2. Такий ефект як утворення зони дії напружень розтягування може енергоефективно використаний для утворення центральної порожнини, при цьому операція прошивання центрального отвору протікають суміщено і при зусиллях в 1,5...2 менших ніж при традиційному процесі.

3. Ексцентричне прикладання зусилля деформування, що притаманне штампуванню обкочуванням, можливо ефективно урівноважити безпосередньо конструкцією обладнання,

що не тільки зменшить навантаження на станину, а і створить основу для низки оригінальних технологій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. Samołyk. Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 1692–1702. journal home page: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. 1+1. ASM Handbook, Volume 14A: Rotary Forging Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, pp. 179–182. DOI: 10.1361/asmhba0003990.
2. Chou A.C.P., Chou P.C., Rogers H.C., Rotary forging, forming and forging, Vol 14, ASM Handbook formerly Metals Handbook, 9th ed., ASM International. 1988, pp. 176–179. www.asminternational.org.
3. Гожій С. П., Ландар Р.М., Носенко А.І. Класифікація обладнання для штампування обкочуванням. *Обробка металів тиском*. 2011. 1 (26). С. 209–214.
4. Yu, Z.; Chen, M.; Ma, C.; Luo, S.; Zhu, C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals*. 2021. 11, p. 1767. <https://doi.org/10.3390/met11111767>.
5. Гожій С.П. Геометричні параметри штампування обкочуванням. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь. 2006. Том 33. С. 117–123.
6. Тітов В., Гожій С., Мироненко, В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології*. 2022. 6 (1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002>.
7. Han X., Hua L. Effect of size of the cylindrical workpiece on the cold rotary-forging process. *Materials and Design. Elsevier*. 2009. 30, pp. 2802 – 2812.
8. Гожій С.П. Модель деформацій при осаджуванні обкочуванням високого циліндричного зразка. *Машинознавство*. 2009. 7 (145). С. 34-37.
9. Гожій С.П., Кліско А.В. Визначення роботи контактних сил тертя при штампуванні обкочуванням з врахуванням розподілу контактних напружень та зони приставання. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2010. 59. С. 83–87.
10. Пат. 15245, Україна, МПК В21D 37/00. Спосіб виготовлення деталей. Кривда Л.Т., Гожій С.П. № u20512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006.
11. Wang Qi, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Ma Rong-fei. Research on plastic deformation law and forming technology of rotary forging with multi-cone rolls. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. 13(4), pp. 1–15.
12. Shi Lei, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Zhang Yi. Optimum design of the double roll rotary forging machine frame. *Mech. Sci.* 2020.11, pp. 101–114, <https://doi.org/10.5194/ms-11-101-2020>.

REFERENCES

1. G. Samołyk. Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 1692–1702. journal home page: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. 1+1. ASM Handbook, Volume 14A: Rotary Forging Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, pp. 179–182. DOI: 10.1361/asmhba0003990.
2. Chou A.C.P., Chou P.C., Rogers H.C., Rotary forging, forming and forging, Vol 14, ASM Handbook formerly Metals Handbook, 9th ed., ASM International. 1988, pp. 176–179. www.asminternational.org.
3. Gozhii S.P., Landar R.M., Nosenko A.I. Classification of rolling stamping equipment. *Processing of Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2011. 1 (26), pp. 209–211. (in Ukrainian).
4. Yu, Z.; Chen, M.; Ma, C.; Luo, S.; Zhu, C. Numerical Model Simulation of the Double-Roll Rotary Forging of Large Diameter Thin-Walled Disk. *Metals* 2021, 11, 1767. <https://doi.org/10.3390/met11111767>.
5. Gozhii S.P. Geometric parameters of rolling stamping. *Proceedings of the Tauri State Agricultural Technical Academy. Issue 4. Applied geometry and engineering graphics*. Melitopol. 2006. 33, pp. 117–123. (in Ukrainian).
6. Titov, V., Gozhii, S., Myronenko, V. Universal experimental installation for pressing pipe blanks. *Mechanics and New Technologies*. 2022. 6 (1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002>. (in Ukrainian)
7. Han X., Hua L. Effect of Size of the Cylindrical Workpiece on the Cold Rotary-Forging Process. *Materials and Design. Elsevier*. 2009. 30, pp. 2802 - 2812.
8. Gozhii S.P. Model of deformations during rolling deposition of a tall cylindrical sample. *Mechanical engineering*, 2009. 7 (145), pp. 34-37. (in Ukrainian).
9. Gozhii S.P., Klisko A.V. Determination of the operation of frictional contact forces during stamping by rolling, taking into account the distribution of contact stresses and the sticking zone. *Journal of Mechanical Engineering. NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2010. 59, pp. 83-87. (in Ukrainian).
10. Pat. 15245. Ukraine. B21D 37/00. The method of manufacturing parts. Kryvda L.T., Gozhii S.P. Bull. 6, 15.06.2006.
11. Wang Qi, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Ma Rong-fei. Research on plastic deformation law and forming technology of rotary forging with multi-cone rolls. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. 13(4), pp. 1–15.
12. Shi Lei, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Zhang Yi. Optimum design of the double roll rotary forging machine frame. *Mech. Sci.* 2020.11, pp. 101–114, <https://doi.org/10.5194/ms-11-101-2020>.

Gozhii S., Myronenko V. Prerequisites for the creation of energy-efficient technologies and equipment for orbital stamping by rolling.

Scientific studies of the processes and equipment of orbital rolling stamping are conducted at the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanics and Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" from the 70s of the last century to the present. During this time, sufficient experience has been accumulated in the creation of energy-efficient technologies and equipment for orbital stamping by rolling. All scientific developments are created on the basis of qualitative effects of the process and emphasize its unique possibilities and perspective of application. Given the fact that the modern tool for researching metal pressure processing processes is computer modeling technology that uses the finite element method, the priority remains experimental research, thanks to which most of the qualitative effects of orbital stamping reflected in the article were recorded. Special attention was paid to the effective positive application of the qualitative effects of rolling stamping. In particular, such an effect as the formation of a zone of action of tensile stresses can be energy-efficiently used for the formation of a central cavity. And the eccentric application of the deformation force can be effectively balanced, which will not only reduce the load on the equipment, but also create the basis for a number of original technologies. Appropriate technological and design solutions, based on the results of scientific and experimental research of the process, are introduced into production and laid as a basis for writing this article.

Keywords: orbital stamping, rolling stamping, plastic deformation model, finite element method, average specific forces, deformation forces, deformation center.

Гожий С. П., Мироненко В. А. Предпосылки создания энергоэффективных технологий и оборудования орбитальной штамповки обкатыванием.

Научные исследования процессов и оборудования орбитальной штамповки обкатыванием проводятся на кафедре технологии производства летательных аппаратов Научно-учебного механико-машиностроительного института Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» с 70-х годов прошлого века до настоящего времени. За это время накоплен достаточный опыт создания энергоэффективных технологий и оборудования для орбитальной штамповки обкатыванием. Все научные разработки созданы на основе качественных эффектов процесса и подчеркивают его уникальные возможности и перспективу применения. Учитывая, что современным инструментом исследования процессов обработки металлов давлением являются компьютерные технологии моделирования, применяющие метод конечных элементов, приоритет остается за экспериментальными исследованиями, благодаря которым и зафиксировано большинство качественных эффектов орбитальной штамповки, отраженных в статье. Особое внимание уделялось эффективному положительному применению качественных эффектов штамповки обкатыванием. В частности, такой эффект, как образование зоны действия напряжений растяжения, может энергоэффективно использоваться для образования центральной полости. А эксцентричное приложение усилия деформирования возможно эффективно уравновесить, что не только снизит нагрузку на оборудование, но и создаст основу для ряда оригинальных технологий. Соответствующие технологические и конструкторские решения, основанные на результатах научных и экспериментальных исследований процесса, вводятся в производство и заложены в основу при написании настоящей статьи.

Ключевые слова: орбитальная штамповка, штамповка обкатыванием, модель пластических деформаций, метод конечных элементов, средние удельные усилия, усилия деформирования, область деформации.

Гожий Сергій Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Gozhii Serhii – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Гожий Сергей Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: s.godzyi@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2276-1225>

Мироненко Віталій Анатолійович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Myronenko Vitalii – Praduate student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Мироненко Віталій Анатольевич – аспірант, НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»

E-mail: il671563@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6624-3564>

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина