УДК 621.951.7: 621.9.042: 621.923.6

Є.В. Скочко, к.т.н., проф.
Житомирський інженерно-технологічний інститут

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ РОБОТИ РОЗВЕРТОК ТА ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

Розглядаються причини і механізм розбивки отворів та створення огранки при їх обробці розвертками. Розроблені підходи та шляхи удосконалення як конструкцій розверток, так і головних складових технології їх чистової обробки.

Всі осьові різальні інструменти (ОРІ) для досягнення найбільшої точності та найсприятливіших умов роботи вимагають беззастережного співпадання: осей обертання та отвору шпинделя, осей хвостовика та калібруючої частини ОРІ, осей ріжучої частини та отвору заготовки протягом обробки всієї його довжини. Це має відношення до операцій розсвердлювання, зенкерування, розвертання, нарізання різі в отворах за допомогою мітчиків, різенарізних головок тощо.

У зв'язку з тим, що такі ОРІ, як зенкери, розвертки, свердла при розсвердлюванні отворів та мітчики не можуть керовано виправити положення осі отвору заготовки і працюють за принципом самовстановлення по ньому, треба вивчати дійсний механізм їх роботи, спотворення кінематичного руху та дію супроводжуючих реальні процеси обробки отворів фізичних явищ – деформацій, миттєвих поворотів тощо.

Механізм процесу подальшої обробки отвору з негативними явищами його розбиття та створення огранки можна вивчати на прикладі роботи розвертки – одного з можливих фінішних ОРІ.

У зв'язку з існуючими похибками форми поверхонь спряжених деталей, які входять в складну технологічну збірку "шпиндель верстата – допоміжний інструмент – ОРІ – заготовка", такими як некруглість, нециліндричність, непрямолінійність твірної, похибка величини кута конуса тощо, та биттям зубців робочої частини РІ, для проведення аналізу відносного положення зазначених осей в процесі обробки отворів деталей виникає потреба доцільного способу їх завдання. Вони можуть бути заданими як осі описаних поверхонь обертання навколо зовнішніх поверхонь тіл (хвостовиків ОРІ та допоміжних інструментів, калібруючих та ріжучих частин ОРІ тощо) та осі вписаних поверхонь обертання у внутрішні поверхні тіл (отвори шпинделя та допоміжного інструмента, а також отвір заготовки).

Відомо, що різновидами неспівпадання осей у збірках осьових деталей можуть бути відносні лінійні зміщення осей спряжених деталей та їх кутові перекоси. Загалом ця картина носить просторовий та імовірнісний характер. Як показує досвід, загальна сукупність довільно зміщених та перекошених осей збірки зі шпинделя, допоміжного інструмента та розвертки на їх загальній довжині може бути визначеною діаметром умовного описаного навколо осей циліндра, який дорівнює 0,02...0,2 мм, або описаного умовного циліндра навколо осі обертання з діаметром, рівним 0,1...0,8 мм. З урахуванням похибки встановлення осі отвору заготовки умовний описуючий навколо осі обертання циліндр на загальній довжині частини шпинделя, ОРІ, допоміжного інструмента та отвору може мати діаметр, рівний 0,4...2 мм і більше. Причинами таких значних похибок положень осей ОРІ відносно осі отвору заготовки можуть бути як похибки виготовлення складових деталей вказаної технологічної збірки, так і похибки їх спряження. Найбільші похибки виготовлення деталей виникають внаслідок зміни баз при обробці окремих поверхонь, коли виникають відносно незначні за величиною безпосередні зміщення та значні похідні зміщення, які створюються кутовими перекосами з величиною, рівною $\varphi \cdot L$, де L – довжина певної складової деталі, φ – кут перекосу в радіанах. Значними за величиною бувають також похідні зміщення, породжені похибками спряження, викликані некруглістю поверхонь деталей збірки, невідповідністю кута конусності тощо.

Найбільшим дефектом багатозубих ОРІ є биття лез, яке створюється при виготовленні централізовано, а в процесі перезагострення на підприємствах, які експлуатують їх, ще значно збільшується. Головними причинами створюваного биття лез слід назвати дуже низьку точність кутового базування розвертки за рахунок маложорсткої непевного контакту з передньою поверхнею кожного зубця одноточкової упорки, некруглість центрів і центрових отворів, велику чутливість за величиною поздовжньої подачі та невисоку прямолінійність руху осі центрових бабок стола загострювального верстата. Слід зауважити, що вимір величини биття стандартних розверток є принципово хибним, оскільки він виконується відносно уявної осі,

заданої її центровими отворами. Реальне ж биття ріжучих кромок відтворюється відносно конічної поверхні хвостовика ОРІ, яка теж має неспівпадання з умовною віссю центрів.

Взаємодія двох негативних, імовірнісного характеру явищ – зміщення та перекосів осей низки спряжених деталей технологічної збірки та незалежне биття ріжучих та калібруючих кромок зубців ОРІ – призводить до суттєвого ускладнення процесів та погіршення результатів фінішної обробки отворів.

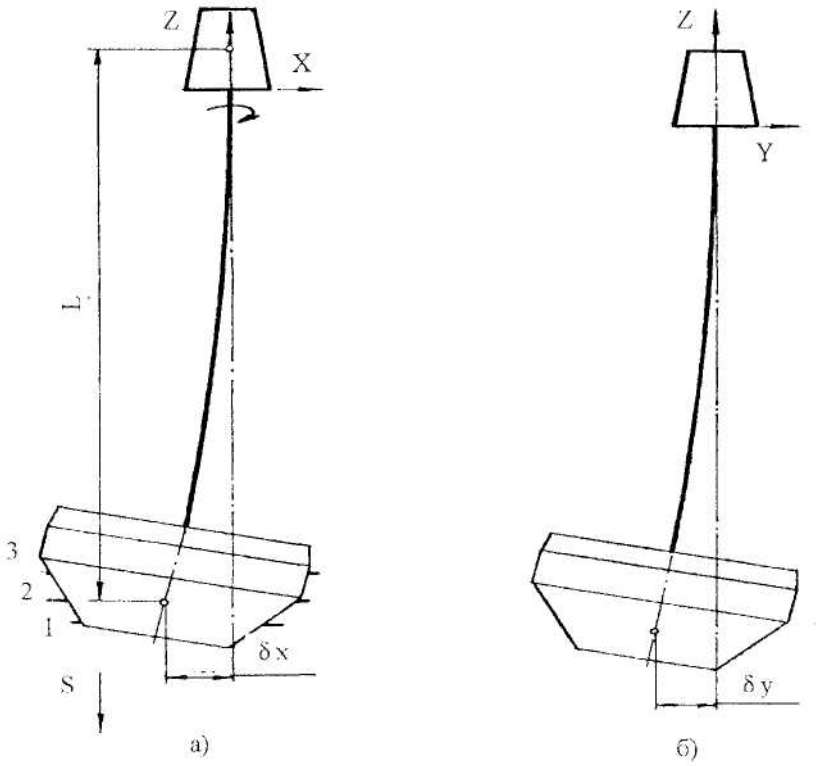

Рис. 1. Згини розвертки у двох взаємно ортогональних площинах

Розглянемо детальніше поведінку розвертки при різанні в реальних умовах неспівпадання осей (рис. 1, *а, б*), де умовно показані згини розвертки у двох взаємно ортогональних площинах – першого, в площині XOZ – безпосереднього, від зміщення дії радіальної сили, та другого, в площині YOZ – наступного похідного, від сумісної дії сили тертя та неврівноваженої сили від крутного моменту, прикладеної до центра перерізу розвертки, який відтворюється у вигляді миттєвого повороту в робочому напрямку обертання розвертки, але не навколо центра перерізу, а навколо полюса – точки *Оп* зачеплення першим зубцем.

На рис. 2 (*а, б, в, г, д, е, є, ж*) показані послідовні фази роботи 3–8-зубих ОРІ та їх лез як ріжучої, так і калібруючої частин в процесі обертання і заглиблення інструмента в отвір заготовки у напрямку осьової подачі. Зрозуміло, що перший та наступні контакти зубців при обробці отвору будуть мати місце у випадку, коли на одній лінії розташовуються як точка *Оп* першого дотику виступаючого зубця до поверхні отвору та його центр *Оз* , так і точка *Оо* , осі обертання розвертки та її центр (точка *Ор*). Так, на рис. 2, *а* показано, що найбільший з виступаючих зубців, яким при обертанні навколо осі обертання створюється на забірній частині розвертки уявний описуючий конус, вступає в ненапружений дотик з краєм отвору. Точка дотику цього зубця в процесі першого повороту розвертки буде описувати коло з центром в точці *Оо*. Відстань l_1 визначає початковий загальний зсув осі *Ор* розвертки відносно осі *Оз* отвору заготовки, а відстань l_2 – початковий зсув осі *Оо* обертання відносно осі *Оз* отвору заготовки. Слід зауважити, що в ході подачі обидві відстані зменшуються внаслідок згинання стрижня інструмента (та оправки). При цьому центр *Ор* осі забірної частини розвертки спочатку наближається до точки *Оо* осі обертання, а потім, переходячи її, наближається до точки *Оз* осі отвору заготовки. На рис. 2, *б, в, г* показано друге у напрямку подачі положення розвертки відносно торця отвору заготовки, коли внаслідок пружного деформування розвертки

виникає радіальна сила, яка може бути розрахованою за відомими формулами опору матеріалів для випадку консольного закріплення стрижня

$$P = \frac{3EI \cdot (l_1 - l_2)}{L^3},$$

де E – модуль пружності матеріалу розвертки першого роду (модуль Юнга);

I – момент інерції поперечного перерізу стрижня розвертки;

$(l_1 - l_2)$ – прогин кінця розвертки (без урахування деформацій в конічному спряженні хвостовика зі шпинделем);

L – довжина розвертки.

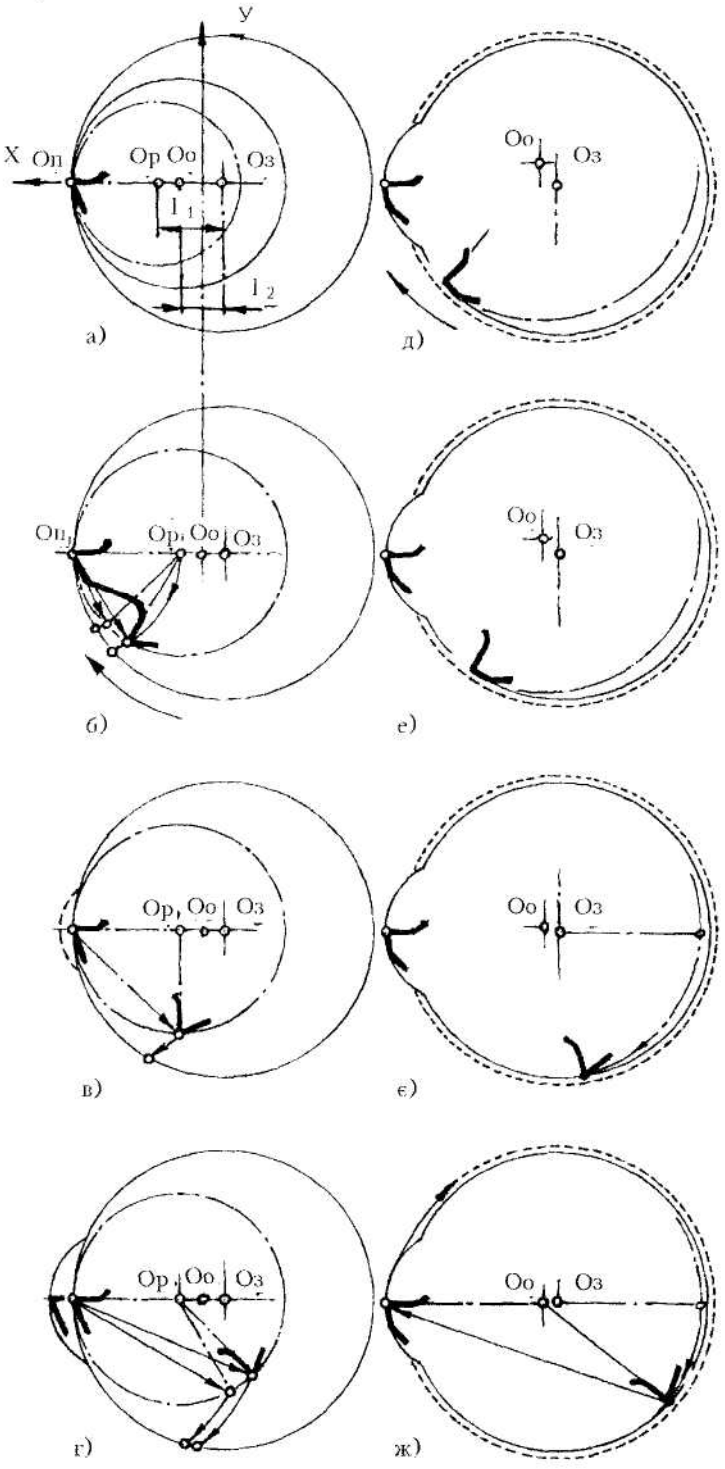

Рис. 2. Послідовні фази роботи 3–8-зубих розверток

Слід зауважити, що остання деформація в залежності від круглості та кутової відповідності спряжених елементів може бути зміннною при обертанні розвертки.

Розрахована радіальна сила буде притискати "зачеплений" зубець до краю отвору. Від її дії при обертанні розвертки буде створюватись тангенціальна сила тертя, величина якої може бути визначеною як добуток визначеної сили на коефіцієнт тертя, що викличе згин розвертки в площині YOZ (див. рис. 1, *б*).

Подальша поведінка розвертки буде визначатись величиною центрального кута від даного "зачепленого" зубця до наступного виступаючого зубця з урахуванням згину розвертки. Так, у випадку значення цього кута, рівного 45° (восьмизуба розвертка), або у випадку кута, рівного 60° (шестизуба розвертка), інструмент буде мати подальше миттєве обертання не навколо точки *Oo* осі обертання, а навколо миттєвого полюса зачеплення – точки *On* початкового контакту (рис. 2, *б*). Миттєвий поворот розвертки буде продовжуватись до упору наступних виступаючих зубців в обох вказаних випадках. З наступом нового контакту виступаючого зубця контактне напруження в ньому буде збільшуватись, а в старому контакті – зменшуватись. Наслідком розвантаження цього першого "зачепленого" зубця буде подолання сил тертя силами обертання розвертки з урахуванням допоміжної опори на другий зубець та порушення контакту першого зубця з отвором заготовки. Подальше обертання буде мати місце спочатку навколо осі розвертки. А потім, після порушення контакту з другим зубцем, – навколо осі обертання. У випадку величини центрального кута від першого "зачепленого" до другого опірного виступаючого зубця, рівній 90° (чотири- або восьмизубі розвертки), проковзування попереднього зачепленого зубця при великому значенні радіальної сили та/або малій міцності матеріалу заготовки може супроводжуватись зрізанням частки краю матеріалу отвору заготовки (рис. 2, *в*). І, нарешті, у випадках великих значень центральних кутів, рівних 120° (шестизуба розвертка) та 135° (восьмизуба розвертка), при будь-яких умовах після миттєвого повороту навколо полюса зачеплення (точка *On*) та виникнення упору наступним виступаючим зубцем завдяки збільшенню сили від їх складання у двох контактах перший зачеплений зубець завжди буде зрізати край отвору заготовки у вигляді лунки (рис. 2, *г*).

Найбільш складною і, водночас, відповідальною фазою 3 (рис. 1, *а*) заглиблення PI в отвір заготовки буде входження початку калібруючої частини, коли частина зубців зігнутої розвертки вже має контакт смужок з отвором, а протилежні зубці ще мають дотик ріжучої частини (рис. 2, *є, ж*). Цей ідеалізований процес суттєво ускладнюється завжди існуючим биттям зубців. Якщо перший з виступаючих зубців своєю смужкою на початку калібруючої частини входить в щойно створену лунку, то при кутах розташування виступаючих зубців, рівних 45° (восьмизуба розвертка) та 60° (шестизуба розвертка), в процесі обертання згинно напружена розвертка спочатку виконує миттєвий поворот навколо полюса зачеплення (лунки) до наступу контакту з отвором близько розташованого наступного виступаючого зубця, коли створюється перерозподіл навантаження між зубцями і зменшення радіального навантаження на перший з зубців та накопичення дотичного навантаження, і тоді наслідком цієї послідовності рухів стає швидкий вихід першого зубця з лунки (рис. 2, *е, є*).

При кутах відносного розташування виступаючих зубців, рівних 90° (чотири- та восьмизуба розвертки), 120° (шестизуба розвертка), або 135° (восьмизуба розвертка) – (рис. 2, *є*), та 180° (чотири-, шести- або восьмизубі розвертки) – (рис. 2, *ж*) також створюється миттєвий поворот навколо полюса зачеплення – першого зубця, який знаходиться в лунці, до досягнення дотику з краєм отвору наступним виступаючим зубцем. Але в цих випадках, внаслідок протилежного розташування зубців, збільшується радіальне навантаження на кожен з них. У зв'язку з тим, що другий зубець зігнутої розвертки ще не ввійшов своєю смужкою калібруючої частини в отвір заготовки, (рис. 1, *а*), то маємо краще зачеплення його гострої ріжучої кромки з краєм отвору. При постійній дії зовнішнього привода обертання наступне миттєве обертання розвертки протікає навколо нового полюса зачеплення – контакту наступного зубця. В цих умовах перший зубець, що знаходиться в лунці, починає рухатись, зрізаючи край лунки. Підвищення ймовірності зрізання та зростання ширини лунки збільшуються при більших кутах відносного розташування активних виступаючих зубців.

Таким чином, при обробці отворів реальними розвертками та іншими OPI вісь інструмента не співпадає з віссю обертання та віссю отвору заготовки. За умови загальної тенденції зменшення обертової траєкторії, яка описується точками осі розвертки під час входу її забірної частини в отвір заготовки, все ж спостерігається нерівномірне її обертання з почерговим миттєвим поворотом навколо деяких з виступаючих ріжучих кромок. Калібруюча частина

зубців своїми смужками в цих випадках послідовно спирається на вже пошкоджені лунками поверхні отвору заготовки, що не забезпечує розвертку точним самобазуванням та навантаженням її "чистим" крутним моментом, а моментом вкупі з поперечною силою, яка спонтанно зрушує інструмент з осі. В результаті різко змінюються величини площ дотику передніми та задніми поверхнями лез зубців, миттєві величини передніх та задніх кутів, миттєві величини швидкості різання та товщин і ширин зрізу, величин кутів зсуву та усадки стружки тощо. Результатом існування вказаних супроводжуючих процесів буває незадовільна робота більшості зубців ОРІ, наприклад, розверток. Робота зубців може бути визначеною за допомогою співставлення реальної товщини зрізу відносно величини радіуса заокруглення ріжучої кромки, звичайно рівного $\rho = 0{,}008...0{,}012$ мм, значення якого збільшується при зношуванні ОРІ. При співставних величинах товщини зрізу маємо тонкоріжучі кромки, при товщинах зрізу $a = (1{,}5...4)\rho$ – кромки звичайного різання, при більших товщинах зрізу – перевантажені кромки, з меншою потенціальною товщиною ($a < \rho$) – неріжучі кромки, тобто вони тільки труться об поверхню різання, та кромки, які не дістають до поверхні різання. Цей штучний поділ ріжучих кромок в процесі роботи ОРІ є дуже нестабільним і визначається всією сукупністю геометричних, кінематичних та динамічних чинників. З точки зору вкладу в загальні процеси зрізання припуску та формоутворення поверхні отвору найбільш несталими є тонкоріжучі зубці, а найбільш шкідливими є ті зубці, які тільки труться: вони використовують енергію, нагрівають весь ОРІ, інтенсифікують процес зношування задньої поверхні зубців та наклепують поверхню різання. Останнє призводить до підвищення напруження в поверхневому шарі поверхні різання, зростання міцності та зносостійкості цієї поверхні, що ускладнює роботу інших зубців. Наслідком цієї низки шкідливих процесів є розбивка (збільшення діаметра) та огранка отвору, погіршення його форми не тільки в поперечному, але й в поздовжньому напрямках, підвищення хвилястості та шорсткості обробленої поверхні отвору.

Удосконалення процесів розвертання для поліпшення отриманих форми і розмірів отворів та якості їх поверхонь можуть бути досягнутими, окрім підвищення точності настройки технологічних систем, також і за рахунок як нових конструктивних розробок розверток, так і удосконалення технологій та оснащення для їх виготовлення та перезагострення.

Серед конструктивних шляхів удосконалення машинних розверток слід назвати:

1. Зменшення биття лез ріжучої частини машинних розверток до величин $(5...10)\cdot 10^{-4}\cdot d$, а калібруючої частини зі смужками – до $(2...5)\cdot 10^{-5}\cdot d$, де d – діаметр розвертки.

2. Заміна циліндричної калібруючої частини на короткий малий зворотний конус зі смужками довжиною $(0{,}2...0{,}4)\cdot d$ зі зворотною конусністю 0,001...0,004 мм на її довжині.

3. Скорочення загальної довжини зворотного конуса до $(0{,}1...0{,}2)\cdot d$ та зменшення величини основного зворотного конуса до величини (0,03...0,05) мм на 100 мм довжини. Виконання на лезах зубців на зворотному конусі смужок шириною 0,2...0,5 мм.

4. Зменшення кількості зубців розвертки до 3, 4 або 6 при умові зменшення величин головних кутів у плані до значень $\varphi = 1...5°$, зменшення глибини різання до 0,1...0,5 мм, збільшення подачі до значень $S = (0{,}04...0{,}2)\cdot d$.

5. Підвищення точності виконання хвостовиків розверток з конусами Морзе до АТ5 або АТ6, а отворів шпинделів верстатів – до АТ3 або АТ4.

6. Збільшення загальної довжини машинних розверток за рахунок подовження стрижня до величин $L = (15...40)\cdot d$, що призведе до пом'якшення перетворення величин неузгодженого зміщення осей на величини кутових перекосів, шкідливих для роботи розвертки.

7. Для зменшення радіальної жорсткості машинної розвертки потрібне виконання на її шийці поблизу хвостовика пружного шарніру у вигляді двох пар протилежних взаємно ортогональних циліндричних лунок глибиною 10...18 % від діаметра або короткої проточки зменшеного на 12...20 % діаметра.

8. Для підвищення крутильної жорсткості, яка значною мірою визначає створення огранки, необхідно максимально збільшити діаметр шийки (стрижня) розвертки, залишивши зазор з обробленим отвором не більше 0,2...0,5 мм.

Однією з головних задач удосконалення розвертки можна вважати якщо не повну ліквідацію явища розбивки отвору при обробці, то хоча б суттєве його зниження. Радикальне підвищення точності форми та розмірів обробленого отвору, а також якості його поверхні може бути досягнутим лише при використанні як верстатів, так і різальних та допоміжних

інструментів високих класів точності. Дуже суттєвою є також і точність положення осі заготовки відносно осі обертання шпинделя верстата.

При виготовленні та перезагостреннях якісних розверток суттєву роль треба відводити питанням підвищення стабілізації положення осі розвертки при шліфуванні смужок калібруючої частини та конуса хвостовика розвертки. Крім стабільності положення осі на точність розташування ріжучих лез при їх загостренні впливає точність колового базування розвертки, яка звичайно реалізується за рахунок стандартної одноточкової пружної упорки, на яку почергово спираються зубці і котра не витримує ніякої критики. На різальні властивості лез та якість обробленої поверхні також суттєво впливають "завали" передньої та задньої поверхонь зубців розвертки, виникнення яких пояснюється різким входом та виходом з контакту з абразивними кругами, визначальною характеристикою обробки яких є великі значення радіальних складових сили різання. Другою причиною виникнення "завалів" є пружна віддача розвертки як в радіальному, так і коловому напрямках, яка створюється внаслідок малої жорсткості (особливо з'єднань деталей) при порушенні контакту зубців з кругом.

Причинами нестабільного положення осі розвертки в процесі шліфування можуть бути:

1. Не чистомоментний привод обертання розвертки від стандартного одноточкового хомутика, який поряд з крутним моментом створює і поперечну силу, яка обертається разом з ним. Взаємодія цієї рухомої сили зі стабільною силою різання викликає зміну величини деформації технологічної системи і створює похибку круглості розвертки у вигляді "сердечка".
2. Некруглість центрів та центрових отворів.
3. Переривчастість процесу різання при обробці смужок на зубцях калібруючої частини (розвертки з гвинтовими зубцями мають перевагу).
4. Значні величини радіальних складових сили різання при шліфуванні та загостренні ОРІ.

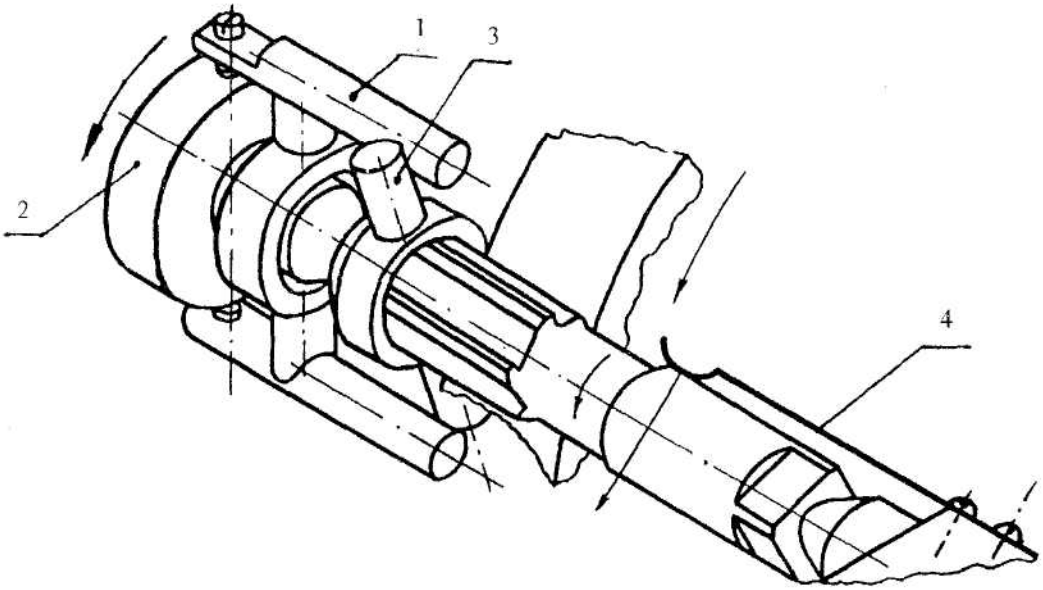

Рис. 3. Чистомоментний диференціальний привод обертання розвертки

Чистомоментний привод обертання при шліфуванні смужок на калібруючій частині розвертки та конічної поверхні її хвостовика повинен мати диференціальну двоточкову самовстановлювану структуру (рис. 3), за допомогою якої виконується поділ колової сили привода порівну на два боки двоточкового хомутика, закріпленого на розвертці. Двоточкова рама 1 привода встановлена на центрах в отворах планшайби 2 з можливістю вільного похитування навколо її радіальної осі. Кінці рами 1 передають обертовий момент на обидва кінці двостороннього хомутика 3, закріпленого на розвертці. У випадку відсутності початкового контакту одного з кінців рами 1 з хомутиком 3 при постійному обертанні планшайби 2 відбувається доворот рами навколо її осі центрів до наступу двостороннього контакту з хомутиком. Попереднє напруження з'єднань кінців рами 1 з двома боками хомутика 3, виконане за допомогою пружних кілець на них (на рис. 3 не показані), може підвищити початкову колову жорсткість привода, зменшити колову віддачу та стабілізувати швидкість обертання розвертки при її обробці.

Зменшення негативного впливу сили різання на точність обробки може бути досягнутим завдяки обробці як безперервних, так і переривчастих поверхонь ОРІ циліндричним абразивним кругом обмеженого контакту. Так, обробка смужок на зубцях та поверхні конуса хвостовика розвертки може бути виконаною за допомогою багатониткового різеобробного круга, у якого гребінці різі заправлені по циліндру. Зменшення пружної радіальної віддачі розвертки при переривчастому шліфуванні смужок на зубцях може бути досягнутим за рахунок попереднього напруження центрових з'єднань, створюваного напруженою плоскою пружиною 4 (рис. 3).

Найбільш складною задачею є пошук шляхів радикального зменшення биття кромок ріжучої частини розвертки, головним "винуватцем" якого є стандартна маложорстка пружна одноточкова упорка з нестабільним положенням контакту та величини напруження з різними зубцями. Значно підвищити точність загострювання зубців розвертки можна за допомогою спеціального самовстановлюваного механізму пружних упорок, які при загострюванні розвертки створюють майже стабільне попереднє контактне напруження, яке перевищує напруження від сил різання (рис. 4).

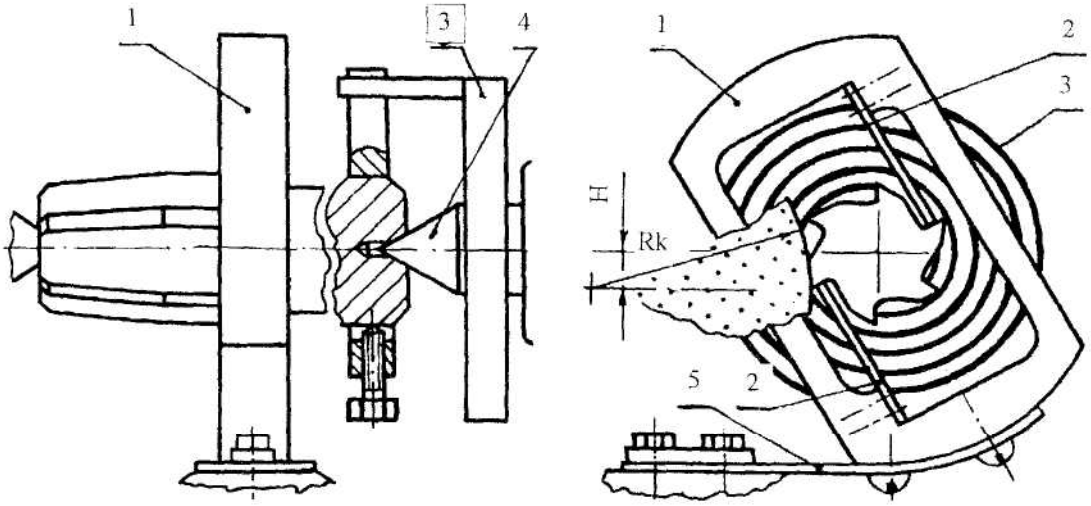

Рис. 4. Базуючий механізм самовстановлюваних упорок

Цей механізм складається з жорсткої кільцевої рамки 1, в якій встановлені дві або три (для тризубих розверток) пружні пластинчасті упорки 2, що притискаються до передніх поверхонь зубців за допомогою попередньо напруженої пружини кручення 3 маложорсткої характеристики (тобто багатовиткової), яка, в свою чергу, закріплюється на центрі 4. М'яка характеристика пружини кручення 3 дає можливість при поділі на наступний зубець, що загострюється, отримати майже постійні умови притискання упорок до передніх поверхонь зубців. Підвищенню рівномірності притискання упорок до зубців та точності самовстановлення розвертки сприяє зв'язок рамки зі столом за допомогою маложорсткої тонкої плоскої пружини 5. Установка потрібної величини заднього кута на зубцях виконується за рахунок регулювання довжини цієї плоскої пружини 5.

Означені конструкторські удосконалення розверток та технологічного оснащення, а також технологічні заходи дадуть змогу виконувати фінішну обробку отворів підвищеної круглості, з ліквідованими розбивкою, огранкою та хвилястістю, з гарантованим шостим квалітетом точності (в деяких умовах можливий навіть п'ятий квалітет точності) та шорсткістю обробленої поверхні $R_a = 0,32...0,08$ мкм.

СКОЧКО Євген Вікторович – кандидат технічних наук, в.о. професора кафедри ТМ і КТС Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- металорізальні інструменти;
- теорія та практика різання.

Подано 22.01.2003