

УДК 621.952.5

**В.М. Пестунов, проф., канд. техн. наук, В.В. Свяцький, канд. техн. наук,  
С.В. Придворова, магістрант**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Оптимізація процесу обробки глибоких отворів

Наведені теоретичні і експериментальні дослідження механізмів приводів верстатів для обробки глибоких отворів. Показано, що застосування пристроїв із змінною величиною вильоту інструмента, а також механізмів вібраційного свердлення підвищують ефективність обробки глибоких отворів.  
**глибоке свердлення, вібраційне різання, стійкість, жорсткість, інструмент, ефективність**

Свердлення глибоких отворів є трудомісткою технологічною операцією, особливо при обробці в'язких матеріалів. В системі верстат – пристрій – інструмент – деталь (ВПД) при глибокому свердлінні в найбільш важких умовах працює інструмент – свердло [1]. Замкнений об'єм обробки, різноманітні функції, виконання яких повинна забезпечувати конструкція інструменту, форсовані режими різання змушують працювати корпус свердла, його ріжучі і напрямні елементи з високими напруженнями.

Відомо, що в основі оптимізації процесу глибокого свердлення лежить функція стійкості інструменту від параметрів процесу різання. Математичний опис цього процесу визначається великим числом взаємозв'язаних чинників, які не подаються на сьогоднішній день узагальненню. Основним елементом системи ВПД, що обмежує вихідні параметри верстата при глибокому свердлінні, є інструмент. Оптимізація процесу глибокого свердлення при цьому зводиться, як правило, до зняття певних технічних обмежень по стійкості, міцності або жорсткості свердла.

Як цільова функція оцінки можливостей елементів технологічної системи може бути прийнята продуктивність процесу глибокого свердлення [2]:

$$Q = \frac{V \cdot S \cdot d \cdot T}{2 \cdot (T + t_{зм})},$$

де  $V, S, d$  – величини швидкості, подачі і діаметру свердлення, відповідно;

$T$  – стійкість свердла;

$t_{зм}$  – час зміни інструменту, мин.

Для підвищення продуктивності процесу свердлення необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі. У той же час максимальна допустима подача свердлення обмежується міцністю і подовжньою стійкістю інструменту.

Подача, припустима міцністю робочої частини свердла, може бути визначена по формулі [3]:

$$S = y_M \sqrt{\frac{0,02 \cdot d^{3-x_M} \cdot \sigma_B}{1,73 \cdot C_M \cdot HB}}, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр інструменту;  $\sigma_B$  – допустима напруга для матеріалу інструменту;

$C_M, y_M, x_M$  – постійні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей матеріалу, що оброблюють, і матеріалу ріжучої частини свердла;

$HB$  – твердість матеріалу, що оброблюють, по Брінеллю.

Із збільшенням глибини свердлення швидкість подачі обмежується подовжньою стійкістю стебла інструменту, оскільки осьова складова сил різання не повинна перевищувати критичну силу по Ейлеру, що визначається по формулі [3]:

$$P_{кр} = \frac{E \cdot \pi^3 \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} = \eta \frac{E \cdot I}{l^2}, \quad (2)$$

де  $P_{кр}$  – критична сила;

$E$  – модуль пружності;

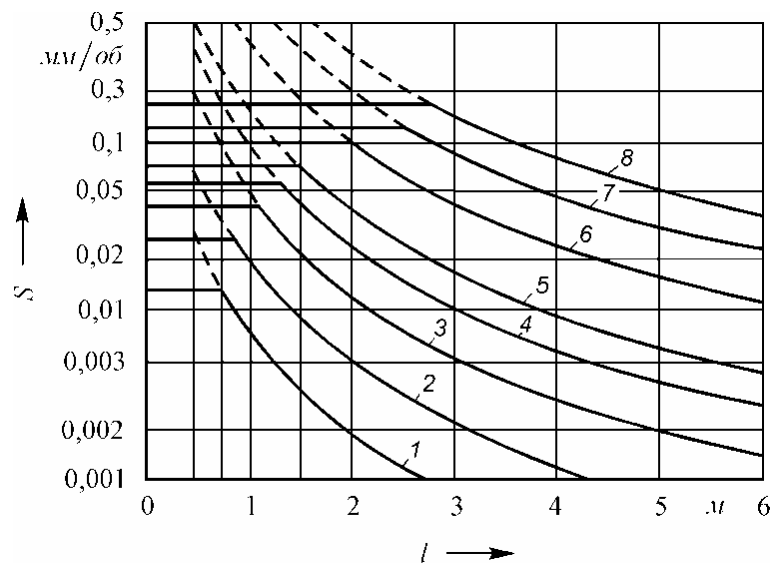
$l$  – довжина стебла свердла;

$I$  – момент інерції поперечного перетину інструменту;  $\mu$  – коефіцієнт приведеної довжини;

$\eta$  – коефіцієнт стійкості.

Для збереження подовжньої стійкості стебла інструмента у міру збільшення глибини обробки необхідно зменшувати осьову складову сили різання шляхом зниження швидкості подачі. Проте, зменшення швидкості подачі приводить до збільшення питомої сили різання, що, у свою чергу, якісно впливає на процес різання. Обробка глибоких отворів на малих подачах є малопродуктивною, а на граничних подачах – веде до зниження якості обробки отворів.

На рис. 1 наведені графіки допустимої швидкості подачі при обробці сталі 45 за умови міцності стебла свердла по крутильному моменту і умови збереження інструментом подовжньої стійкості відповідно до залежностей (1) і (2).

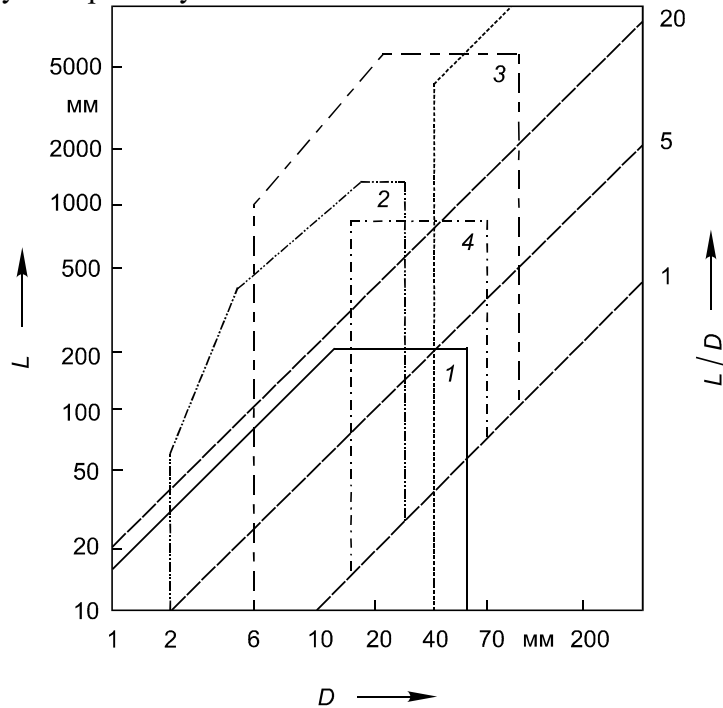


Діаметр свердла: 1 – 5 мм; 2 – 7,5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 12,5 мм;  
5 – 15 мм; 6 – 20 мм; 7 – 25 мм; 8 – 30 мм

Рисунок 1 – Допустимі подачі при обробці сталі 45 за умови міцності стебла свердла по крутильному моменту і умови збереження інструментом подовжньої стійкості

Аналіз приведених на рис. 1 графічних залежностей свідчить, що робоча область в системі координат „подача – глибина свердлення” визначається двома показниками: мінімальною для даного діаметру свердла величиною подачі, що визначається стійким характером стружкоутворення і мінімальною продуктивністю; і максимально допустимою величиною подачі відповідно з міцністю поперечного перерізу інструменту і подовжньої стійкості стебла свердла.

Наявність перерахованих обмежень по міцності, стійкості інструменту і мінімальному значенню допустимої подачі свердлення визначає область можливого вибору допустимих параметрів елементів технологічної системи. Теорія і практика глибокого свердлення дає деякі рекомендації економічної доцільності тих або інших способів глибокого свердлення (рис. 2). Зрозуміло, що ці рекомендації певною мірою є умовними, а їх межі розпливчаті і у кожному конкретному випадку обробки глибоких отворів можуть бути переглянутими.



- 1 – область можливої обробки спіральними свердлами; 2 – область обробки гарматними свердлами;  
3 – область обробки свердлами з внутрішнім відведенням стружки; 4 – інжекторне свердлення;  
5 – розсвердлювання

Рисунок 2 – Номограма для визначення економічної ефективності способів глибокого свердлення ( $L$  – глибина свердлення,  $D$  – діаметр свердлення)

В роботі [4] встановлена причина виникнення крутильних коливань свердлів і визначений їхній ступінь впливу на стійкість інструмента. Достатня відповідність в роботі [4] теоретичних досліджень результатам експерименту при обробці титанових сплавів дозволяють використати наведені дані для вибору оптимальних параметрів інструменту для глибокого свердлення. З наведених у роботі [5] графіків можна зробити висновок, що збільшення жорсткості інструмента в півтора-два рази приводить до зниження кута розкручування спіралі свердла у два-три рази.

Проте можливості підвищення жорсткості інструменту за рахунок зміни форми перерізу стеблини свердла на даний час досить повно вивчені і практично вичерпані. Тому автори [5], вказуючи на складність істотного підвищення жорсткості свердла за рахунок оптимізації його поперечного перерізу, звертають основну увагу на раціональну експлуатацію свердлів.

Проведені теоретичні дослідження і узагальнення результатів експериментальних досліджень [1], створили основу для аналізу ефективності процесу свердлення зі змінним вильотом інструмента. По результатам експериментальних досліджень [6] визначено, що величина стійкості інструмента зі збільшенням глибини свердління нелінійно залежить від довжини вильоту. Це дозволяє записати залежність для визначення періоду стійкості свердла  $T$ , що використана в роботі [5], у вигляді:

$$\frac{T^m}{T_0^m} = \left(\frac{l_0}{l}\right)^n, \quad (3)$$

де  $l$  – робоча довжина вільоту;

$l_0$  – вихідна розрахункова довжина вільоту;

$n, m$  – показники, які враховують вплив вільоту на стійкість інструменту.

Залежно від способу виготовлення свердла, а також матеріалу, який оброблюють, показники степенів  $n$  і  $m$  за результатами досліджень [4, 5] приймають в межах від 0,1 до 0,5. Так, наприклад, для свердлів, які досліджувались у роботі [4] при обробці сплаву ВТ20, показник степеня  $n$  приблизно дорівнює 0,4, для фрезерованих свердлів відповідно з результатами, що наведені у роботі [5], показник степеня  $n$  становить приблизно 0,15.

Порівнюючи процеси глибокого свердлення отворів свердлами з постійним і змінним вільотом, необхідно відзначити, що величина вільоту буде однаковою тільки на граничній глибині обробки. Протягом усього процесу обробки при роботі зі змінним вільотом інструмента ця величина завжди буде меншою. Таким чином, за всіма рівними умовами відношення стійкості інструмента при обробці зі змінним і постійним вільотом може бути визначене по формулі:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{k - k^{\frac{n}{m}}}{k - 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{m}}, \quad (4)$$

де  $k$  – відношення вільоту наприкінці обробки до вихідного вільоту.

Відповідно до залежностей (3) і (4) побудовані графіки стійкості інструмента при свердлінні зі змінним вільотом від відношення вільотів наприкінці і початку обробки (рис. 3). Показник степеня  $m$ , що враховує вплив вільоту на стійкість, при цьому прийнятий рівним 0,25.

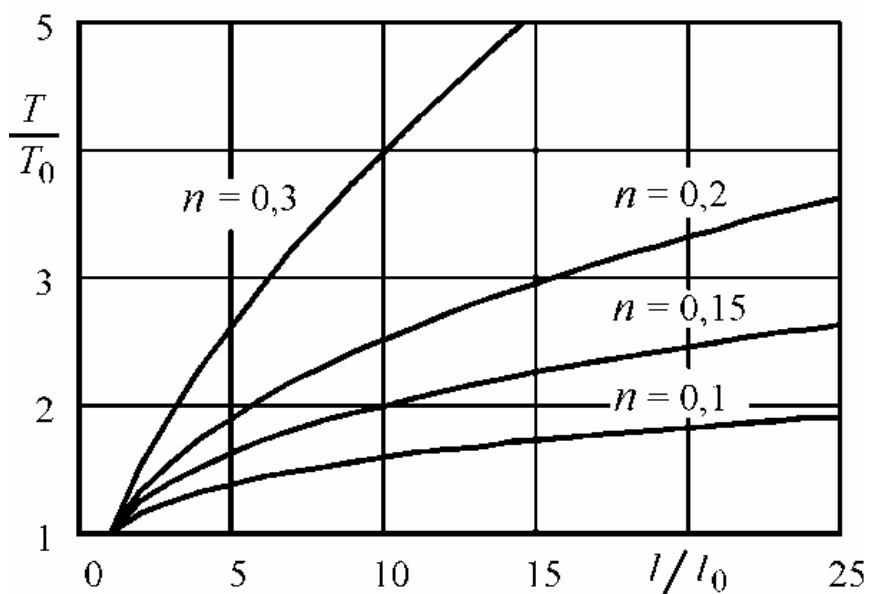
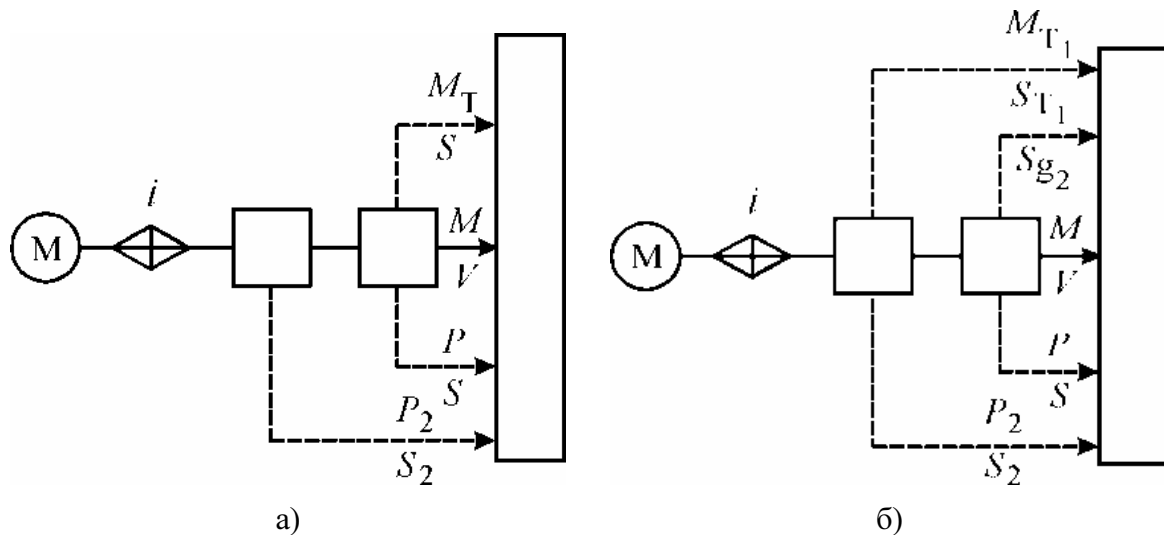


Рисунок 3 – Стійкість інструмента при свердлінні зі змінним вільотом

Наведені графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення вільотів наприкінці і початку обробки, стійкість інструмента зростає. З погіршенням оброблюваності матеріалу (збільшення показника  $n$ ) ефект зростання стійкості

збільшується. Ці висновки співпадають з експериментальними дослідженнями, проведеними в роботі [7] на спеціальних свердлах (свердлильних спіралях без хвостовика) постійного перерізу по всій довжині інструмента, які показали, що крутильні коливання, які знижують стійкість свердлів, є пропорційними кубу довжини вильоту свердла. При цьому шляхом зменшення довжини вильоту свердла можна збільшити величину подачі в три-сім разів при одночасному збільшенні стійкості інструмента від трьох до семи разів.

Структурні схеми привода [8], отримані результати досліджень [9, 10] і узагальнення робіт [1 – 10] склали теоретичну основу створення ряду принципово нових конструкцій механізмів зі змінною структурою, що працюють за методом перехоплення стебла інструмента по його довжині (див. рис. 4). Ці механізми забезпечують передачу крутного моменту осьової сили свердлу при мінімальному вильоті і здійснюють дискретну подачу. Конструктивною особливістю цих механізмів є наявність в осьовому напрямку рухливих затискачів, які по черзі включають, і механізму керування затискачами. Механізм затискачами забезпечує по чергову фіксацію свердла в осьовому напрямку і дискретне його переміщення.



а) із одним механізмом дискретних переміщень; б) з двома механізмами дискретних переміщень

Рисунок 4 – Структурні схеми приводів верстатів для глибокого свердлення

На рис. 5, а показана схема установки свердла з однією проміжною опорою, що поділяє відстань  $l$  на ділянки  $a$  і  $b$ . Застосування даної схеми дозволяє підвищити поздовжню стійкість інструменту при глибокому свердленні. Проте, у міру заглиблення свердла в заготовку змінюється величина його вильоту  $i$ , відповідно, відношення  $a$  до  $b$ , яке для отримання максимальної жорсткості інструменту під час процесу свердлення бажано зберігати постійним. Сказане призводить до ускладнення конструкції механізму. Завдання не вирішується і на схемі (див. рис. 5, б), не дивлячись на те, що технологічні можливості по допустимій глибині свердлення поліпшуються.

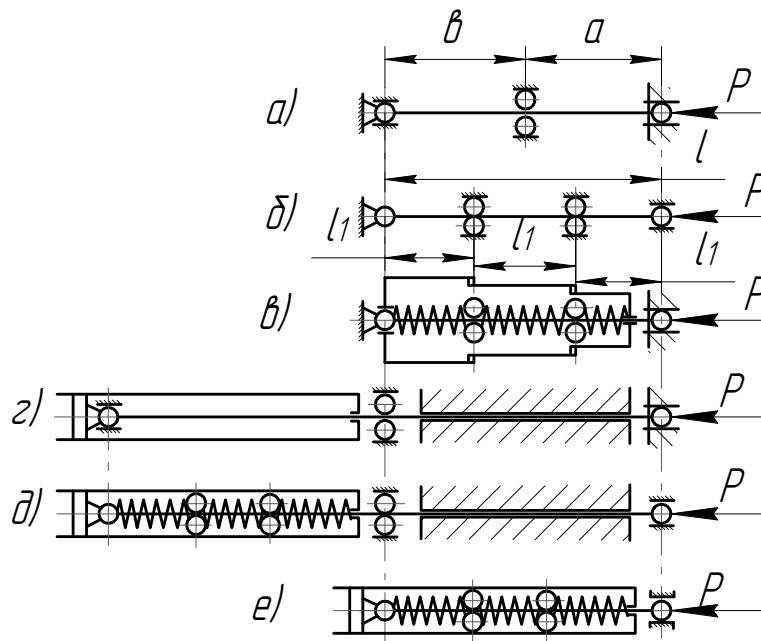


Рисунок 5 – Схеми вирішення задачі підвищення поздовжньої стійкості свердел при глибокому свердлінні [11]

Схема (рис. 5, в) забезпечує рівномірну зміну відстані між опорами у міру заглиблення свердла в заготовку, проте наявність пружин і проміжних опор збільшує загальний виліт свердла порівняно з глибиною свердління.

Підвищення поздовжньої стійкості і жорсткості інструменту в процесі обробки отворів забезпечує схема (див. рис. 5, г). По цій схемі шток гідроприводу подачі безпосередньо з'єднаний із свердлом. А оскільки жорсткість штока завжди вище за жорсткість свердла при рівних діаметрах, то схема (див. рис. 5, г) забезпечує підвищення жорсткості інструмента і, відповідно, підвищує ефективність процесу глибокого свердління. Схема (див. рис. 5, д) забезпечує подальше підвищення жорсткості інструмента і ефективності свердління, а схема (див. рис. 5, е) до того ж скорочує приблизно удвічі осьові габарити приводу подачі.

Конструкція механізму приводу верстатів для глибокого свердління, розроблена за схемою (рис. 5, г), наведена на рис. 6. У корпусі 1 на підшипниках установлений шпindel 3, виконаний у вигляді гідроциліндра. У циліндрі встановлений поршень 2, шток 4 якого жорстко з'єднаний зі свердлом 5. Для зміни діаметра свердла шпindelна група головки виконана змінною.

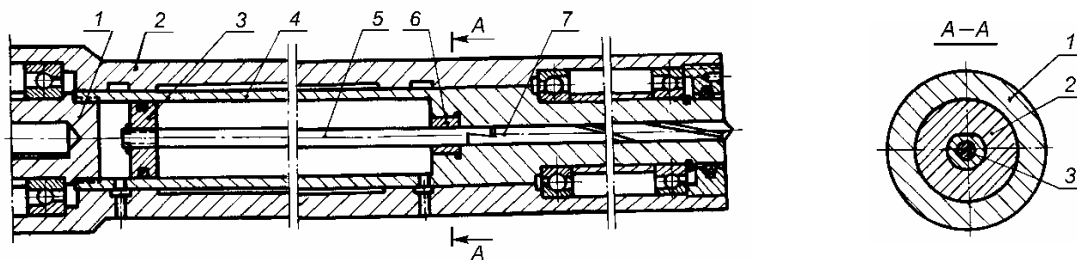


Рисунок 6 – Механізм приводу верстатів для глибокого свердління

Підвищення поздовжньої стійкості штока розглянутого механізму (див. рис. 6) забезпечується установкою проміжних опор (див. рис. 7). Проміжні опори 8

встановлені в циліндрі на штоку 4 по вільному садінні і мають отвори для проходження мастила. Між поршнем 2, опорами 8 і торцевою поверхнею циліндра встановлені спіральні пружини 7 рівної жорсткості. У процесі робочої подачі, що здійснює гідропривід, поршень 2 стискає послідовно встановлені пружини 7, які, в свою чергу, забезпечують рівномірне переміщення проміжних опор у напрямку подачі при рівномірному взаємному зближенні.

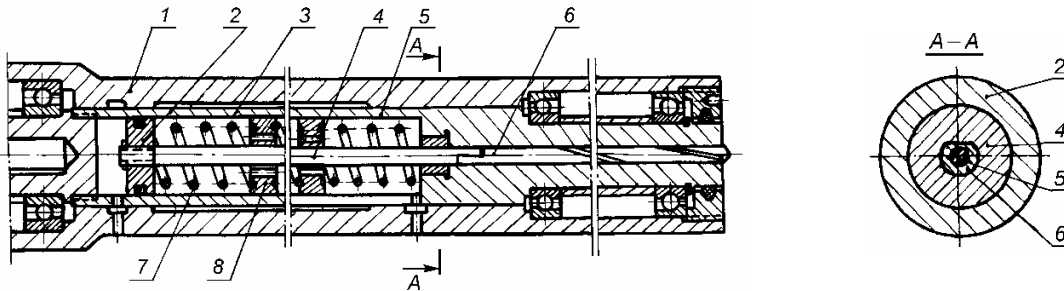


Рисунок 7 – Механізм привода верстатів для глибокого свердління з проміжними опорами

Повний цикл зворотно-поступальних рухів свердла надається гідравлічним механізмом подачі, що забезпечує відповідно до заданої програми подачу робочої рідини в праву або ліву порожнини обертового гідроциліндра. Керування циклом роботи гідроприводу і настроювання на задану програму поступальних переміщень здійснюється за допомогою шляхової автоматики (на схемі не показана).

Ефективність обробки глибоких отворів спіральними свердлами можна підвищити завдяки застосуванню вібраційного свердлення, що у порівнянні із традиційним свердленням забезпечує: зниження сил тертя по поверхні контакту інструмента із заготовкою, надійне дроблення і транспортування зливної стружки від зони різання, підвищення ефективності застосування мастильно-охолодного технічного засобу (МОТЗ) тощо.

Відомий цілий ряд пристроїв для вібраційного свердління із завданням змушених осьових коливань інструменту за допомогою електродинамічних, електрогідравлічних і інших вібраторів [12, 13]. Поряд з перевагою – плавністю регулювання амплітуди коливань, вони досить складні в технічному виконанні і мають високу вартість. Останнім часом знаходять застосування різні вібраційні патрони, зокрема, кулькові вібратори, що дозволяють використовувати наявне на підприємствах обладнання і здійснювати надійне подрібнення стружки при порівняно малих габаритах, простоті конструкції і невисокій вартості виготовлення цих механізмів [14, 15]. Доцільність застосування різних віброствердильних пристроїв визначається параметрами отворів, які оброблюють.

Для свердління отворів у діапазоні діаметрів від 3 до 9 мм зі співвідношенням  $L/D \geq 3$  розроблена конструкція кулькового вібратора [16], описана нижче. Схема вібратора наведена на рис. 8. У шпинделі верстата кріпиться хвостовик 7, у якому за допомогою шпонки 6 фіксується інструментальний шпиндель 8, що підтискається в

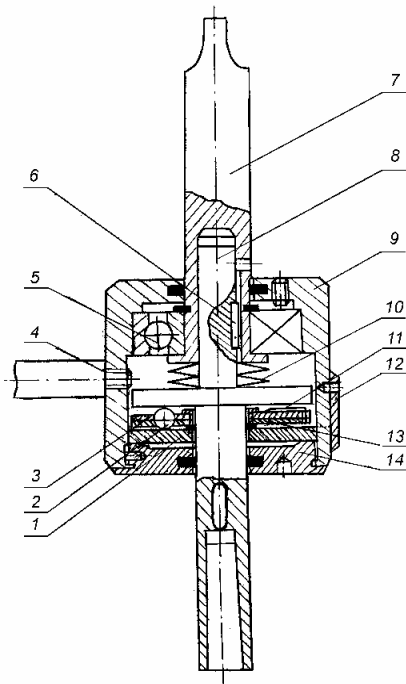


Рисунок 8 – Кульковий вібратор

напрямку подачі пружиною 10. По похилих поверхнях профільного кільця 1, які утворюють рівносторонню піраміду, перекочуються кульки 2, розміщені в сепараторі, що складається із кілець 3 і 13 із виконаними під кутом один до одного пазами.

Механізм зміни амплітуди коливань виконано у вигляді пружного елемента 11, який з'єднано з кільцем 3 і який взаємодіє з пазами, що розташовані на периферії кільця 13. Профільне кільце 1 піджає в осьовому напрямку кришкою 14, яка є спряженою з корпусом 9. Корпус 9 має вікно для регулювання відносного зміщення кілець сепаратора. Вікно закривається кришкою 12. Корпус 9 фіксується від провороту шпилькою 14 і планкою, яка закріплена на верстаті (на схемі не показана). Кульковий підшипник 5 спряжений з хвостовиком 7.

Вібраційний патрон працює таким чином. При задані хвостовику 7 обертового руху, кульки 2 перекочуються по доріжках кочення опорного кільця 1 і профільного кільця 13, поверхні яких утворені похилими площинами, що визиває коливання інструментального шпинделя 8, який підтискає в напрямку подачі пружина 10, сила стиснення якої більше осьової складової сили різання. Під доріжкою кочення приймається кругова траєкторія руху кульок 2 по поверхні профільного кільця 1, радіус якої можна змінювати, змінюючи відносно положення кілець 3 і 13 сепаратора.

Частота осьових коливань інструменту визначається швидкістю обертання хвостовика 7, числом кульок 2 і відносним положенням кілець 1 і 13. Амплітуда коливань інструменту залежить від кута нахилу площин профільного кільця 1, а також радіуса доріжки кочення кульок, який можна регулювати шляхом відносного зміщення кілець 3 і 13 сепаратора. Для зміни величини амплітуди коливань необхідно, не розбираючи патрон зняти кришку 12, повернути інструментальний шпиндель 8 таким чином, щоб механізм фіксації розташувався напроти вікна корпуса. Пружний елемент 11 виводиться із пазу кільця 1, кільце 13 зміщується відносно кільця 3 на потрібний кут, після чого положення кілець фіксується пружним елементом 11.

Для вібраційного свердління за допомогою наведеного пристрою використовують стандартні спіральні свердла зі збільшеним заднім ходом.

На рис. 9 показана модульна система приводу для глибокого вібраційного свердління, що дозволяє в широкому діапазоні змінювати параметри обробки [1]. Верстат містить привід головного руху, що включає електродвигун 1, коробку швидкостей 2, шпиндель 3, що встановлені на напрямні 4 станини 5. На станині встановлений також вібратор 6, в шпинделі якого закріплений інструмент 7. На коробці швидкостей 2 встановлений гідравлічний циліндр 8 з поршнем 9, шток якого з'єднаний зі станиною 5. Порожнини гідравлічного циліндра з'єднані каналом, в якому встановлений зворотний клапан 10.



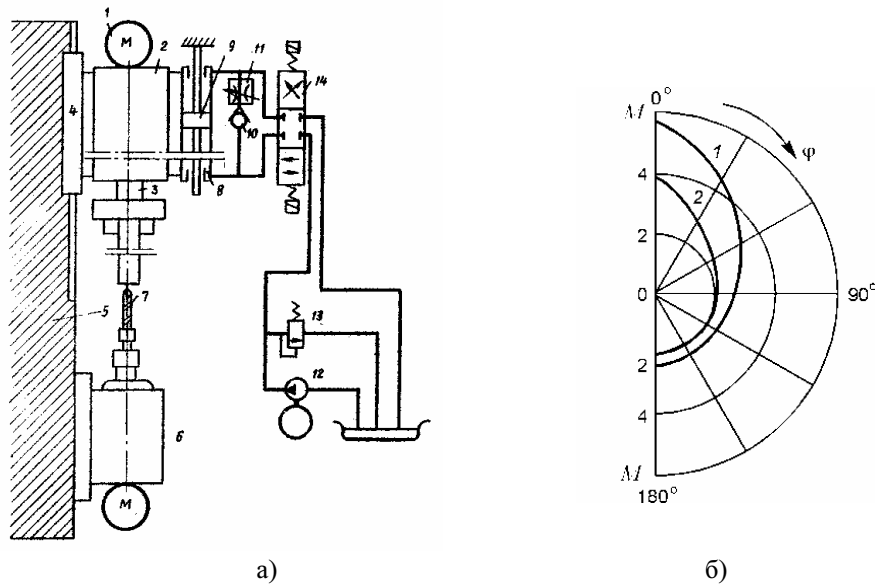


Рисунок 9 – Модульна система приводу для глибокого вібраційного свердлення (а) і залежність крутильного моменту від кута повороту планшайби (б)

В процесі свердлення деталь, закріплена в патроні шпинделя 3, одержує обертання із швидкістю головного руху. Під дією сили ваги рухомих вузлів і деталей приводу головного руху 1–3 переміщується у напрямку свердла. Встановлений послідовно дросель 11 обмежує максимально допустиму швидкість цього руху. Для здійснення неробочого і установного переміщень приводу головного руху верстат забезпечений окремим гідроклапаном, що містить насос 12, клапан 13 і розподільник 14. При подачі мастила під тиском в одну із порожнин гідроциліндра 8 забезпечується швидке установне переміщення приводу вгору або вниз по напрямних 4 станини 5.

Підвищити ефективність процесу глибокого свердлення можна зміною положення ріжучого інструменту в просторі [17]. Проведені дослідження процесу свердлення показали (див. рис. 9, б), що поворот планшайби від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  (перехід від свердлення зверху до свердлення знизу) забезпечує зниження моменту крутильного навантаження на інструмент в три рази при обробці сталі (див. рис. 9, б, крива 1) і в два рази при обробці чавуну (див. рис. 9, б, крива 2) за однакових умов різання.

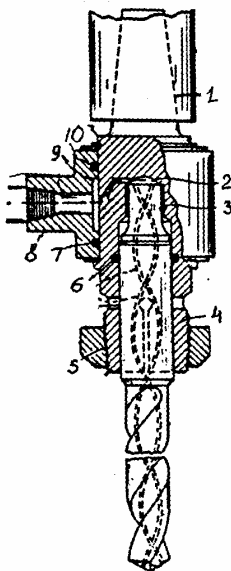


Рисунок 10 – Конструкція патрону для подачі МОТЗ під тиском в зону свердлення

При переході від свердлення зверху до свердлення знизу спіральними свердлами виникає проблема підведення МОТЗ в зону обробки. Цю проблему вирішує конструкція [1], показана на рис. 10. На корпусі 1, закріпленому в шпинделі верстата встановлена муфта 8, яка зв'язана з системою подачі МОТЗ під тиском. Отвір муфти 8 пов'язано з порожниною 2, закритою ущільнювачами 6-7-10. Порожнина 2 через спіральні клапани свердла 3 сполучена з ріжучою частиною свердла. Свердло 3 за допомогою цангового затиску 4-5 закріплено в корпусі 1. В процесі обробки система підведення МОТЗ забезпечує охолодження ріжучої частини свердла при будь-якому розташуванні інструмента в просторі, зменшуючи тим самим дію сил тертя і вимиваючи стружку з отвору, що оброблюється.

Таким чином, проведені теоретичні і експериментальні дослідження показують, що застосування механізмів приводів верстатів для глибокого свердління, що мають проміжні опори, приводить до збільшення періоду стійкості інструмента. Крім ефекту підвищення стійкості з'являється можливість здійснення безкондукторного свердлення глибоких отворів. Використання вібраційного свердлення підвищує ефективність обробки глибоких отворів спіральними свердлами завдяки надійному дробленню і транспортуванню зливної стружки від зони різання. Застосування даних механізмів фактично знімає обмеження процесу обробки глибоких отворів спіральними свердлами за критерієм поздовжньої стійкості інструмента.

## Список літератури

1. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Решение проблем глубокого сверления в металлообработке // Вестник НТУУ „КПИ”. Машиностроение. – К.: НТУУ „КПИ”, 2006. – №49. – С. 173 – 178.
2. Корытин А.М., Шапарев Н.К. Оптимизация управления металлорежущими станками. – М.: Машиностроение, 1974. – 160 с.
3. Лишинский Л.Ю. Оптимизация операций глубокого сверления // Станки и инструмент. – 1971. – №10. – С. 18 – 24.
4. Бурмистров Е.В., Мурашкин Е.М., Таратов А.В. Крутильные колебания и их влияние на стойкость сверл малых диаметров при обработке жаропрочных и титановых сплавов // Материалы симпозиума „Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация”. – Вильнюс: ЛитНИИТИ, 1974. – С. 13.
5. Жилис В.И., Казакайтис В.Ф., Вайкунас П.С. Исследование износа быстрорежущих спиральных сверл // Материалы симпозиума „Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация”. – Вильнюс: ЛитНИИТИ, 1974. – С. 34.
6. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Элементы системы СПИД, ограничивающие выходные характеристики процесса глубокого сверления // Materiały IV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Naukowym progress na rubieży tysiącleci – 2008”. – Przemysł: Nauka i studia, 2008. – Тум 14. Techniczne nauki. – Str. 53 – 55.
7. Wendelhoven J. Kurzuendelbohrer. Ratonalisierung im Betriebsdurch Arbeiten mit Kurswendelbohrern // Maschinen Merkt, 1970. – № 13. – Н. 76. – S. 239 – 241.
8. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Управление циклом процесса глубокого сверления // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції „Дни науки – 2006”. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – Том 10. Технічні науки. – С. 8 – 11.
9. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Элементы системы СПИД, ограничивающие выходные характеристики процесса глубокого сверления // Materiały IV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Naukowym progress na rubieży tysiącleci – 2008”. – Przemysł: Nauka i studia, 2008. – Тум 14. Techniczne nauki. – Str. 53 – 55.
10. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Процес глибокого свердління з управлінням потоками потужності в кінематичних ланцюгах формоутворення // Materiály IV mezinárodní vědecko-praktická konference „Nastolení moderní vědi – 2008”. – Praha: Publishing House „Education and science” s.r.o., 2008. – Dil. 9. Technické vědy. Tělovýchova a sport. – S. 31 – 33.
11. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Увеличение производительности процесса глубокого сверления повышением жесткости установки сверла // Materiały IV międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Perspektywiczne opracowania nauki i techniki – 2008”. – Przemysł: Nauka i studia, 2008. – Тум 13. Techniczne nauki. – Str. 89 – 91.
12. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. – 351 с.
13. Д. Кумабэ. Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
14. Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Вибрационное сверление глубоких отверстий // Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції „Динаміка наукових досліджень”. Том 53. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 10 – 12.
15. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Підвищення продуктивності процесу глибокого свердління при накладанні на інструмент осьових коливань // Materiály V międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Naukowa myśl informacyjnego wieku – 2009”. – Przemysł: Nauka i studia, 2009. – Volume 15. Techniczne nauki. Budownictwo i architektura. – Str. 33 – 35.
16. В.М. Пестунов, В.В. Свяцкий, Л.П. Свяцкая. Використання методів вібраційного свердлення в сільськогосподарському машинобудуванні // Конструювання, виробництво і експлуатація

- сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – Вип. 40. Част. 2. – С. 185 – 189.
17. Пестунов В.М., Свяцкий В.В., Свяцкая Л.П. Увеличение производительности процесса глубокого сверления изменением пространственного положения инструмента // *Materiály V mezinárodní vědecko-praktická konference „Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2009”*. – Praha: Publishing House „Education and science” s.r.o., 2009. – Díl. 15. Technické vědy. Výstavba a architektura. – S. 14 – 16.

*В. Пестунов, В. Свяцкий, С. Придворова*

#### **Оптимизация процесса обработки глубоких отверстий**

Приведены теоретические и экспериментальные исследования механизмов приводов станков для обработки глубоких отверстий. Показано, что применение устройств с переменной величиной вылета инструмента, а также механизмов вибрационного сверления повышают эффективность обработки глубоких отверстий.

*V. Pestunov, V. Svyatsky, S. Pridvorova*

#### **Optimization of treatment process of the deep bore**

In the article the theoretical and experimental researches of mechanisms of machine tools drives for the deep drilling are considered. The application of devices with a variable quantity of tool extension, and also mechanisms of vibration drilling raise effectiveness of deep-hole machining are demonstrated.

Одержано 12.03.12

### **УДК 621.735.3**

**В.П. Пукалов, В.В. Пукалов, доценти, кандидати технічних наук,  
Ф.И.Златопольский, проф., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет*

## **Расчет напряжений при осадке полых осесимметричных тел**

В последние годы участились случаи аварии на нефти и газопроводах при её добычи и транспортировке. Поэтому задача усовершенствования расчёта на прочность труб большого диаметра является весьма актуальной.

**осесимметричное тело, напряжения, усилие деформации**

Для определения напряжений и усилий в пластически деформируемом полом цилиндра (трубе большого диаметра) имеем два дифференциальных уравнения равновесия и уравнение пластичности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (2)$$