

УДК 621.7.014.2

*О.Л. КОНДРАТЮК, О.Л. СКОРКІН***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОДАЧІ
МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ РІДИНИ ЧЕРЕЗ КЛИНОВІ НАПВВІДКРИТІ НАСАДКИ
ДО ТОРЦЯ КРУГА ПРИ КРУГЛОМУ НАРУЖНОМУ ШЛІФУВАННІ**

У роботі розглядаються питання впливу техніки подачі МОР на технологічну ефективність круглого зовнішнього шліфування та визначається мінімальна витрата МОР що підводиться в зону обробки.

Рациональний підбір і створення високоефективних МОР можливі тільки при глибокому вивченні механізму їх дії. Сьогодні стало очевидним, що для дослідження складних процесів, що протікають при обробці металевих заготовок в присутності МОР, слід використовувати методи фізичної хімії, теплофізики, металознавства, гідроаеродинаміки і ін. Необхідність обліку цих чинників перетворює розробку нових МОР і технології їх застосування в актуальну науково-технічну проблему, що вирішується на стику цілого ряду галузей сучасної науки вже не стільки на чисто емпіричному, скільки на теоретичному рівні.

Ключові слова: мастильно-охолоджувальна рідина (МОР), техніка подачі, раціональне застосування, абразивна обробка.

В статье рассматриваются вопросы влияния техники подачи СОЖ на технологическую эффективность круглого внешнего шлифования и определяется минимальная затрата СОЖ что привстает в зону обработки.

Рациональный подбор и создания высокоэффективных СОЖ возможные только при глубоком изучении механизма их действия. Сегодня стало очевидным, что для исследования сложных процессов, которые протекают при обработке металлических заготовок в присутствии МОР, нужно использовать методы физической химии, теплофизики, металловедения, гидроаеродинамики и др. Необходимость учета этих факторов превращает разработку новых СОЖ и технологии их применение в актуальную научно-техническую проблему, которая решается на стыке целого ряда областей современной науки уже не столько на чисто эмпирическом, сколько на теоретическом уровне.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), техника подачи, рациональное применение, абразивная обработка.

The article examines the impact of technology on the coolant technological efficiency and cylindrical grinding defined minimum flow rate of coolant supplied to the treatment zone.

Rational selection and creation of high performance cutting fluids are possible only in-depth study of their mechanism of action. Today, it has become apparent that in order to study the complex processes that occur in the processing of metal workpieces in the presence of ZOTR, use methods of physical chemistry, thermal physics, metallurgy, fluid dynamics, and others. The need to take account of these factors makes the development of new cutting fluids and their use of technology to date scientific and technical the problem is solved at the junction of a number of branches of modern science is not so much on the purely empirical, as in theory.

Keywords: cutting fluid (coolant), feeding equipment, rational use, abrasion.

Вступ. У процесі механічної обробки поверхневі шари заготовки і інструменту знаходяться в стані активної фізико-хімічної взаємодії з навколишнім повітряним або штучним середовищем, що вводиться в зону обробки у вигляді так званих змащувально-охолоджувальних технологічних рідин (МОР). При правильному обраному складі і способі використання МОР можна різко зменшити сили тертя в контактних зонах «інструмент-заготовка-стружка», зменшити тепловиділення і посилити відведення теплоти, а також забезпечити видалення стружки і відходів обробки із зони різання і з робочих поверхонь верстата. В результаті в істотному ступені зменшується знос, затуплення і засалювання інструменту, підвищується його працездатність і період стійкості. Все це дозволяє значно підвищити продуктивність обробки і поліпшити якість деталей. Тому вдосконалення складів і техніки подачі МОР є одним з основних напрямків розвитку сучасної технології машинобудування.

Важливість проблеми раціонального застосування МОР визначається не тільки економічними міркуваннями, хоча за оцінками фахівців і досвіду промисловості витрати на МОР часто значно (до 4 разів) перевищують витрати на різучі інструменти та досягають 17% собівартості виготовлення деталей машин. У той же час МОР є забруднювачами навколишнього середовища, а на їх виготовлення витрачають значну кількість дефіцитної сировини. Удосконалення техніки і технології застосування МОР буде сприяти пере-

ходу машинобудування на ресурсозберігаюче екологічно чисте виробництво.

Рациональний підбір і створення високоефективних МОР можливі тільки при глибокому вивченні механізму їх дії. Сьогодні стало очевидним, що для дослідження складних процесів, що протікають при обробці металевих заготовок в присутності МОР, слід використовувати методи фізичної хімії, теплофізики, металознавства, гідроаеродинаміки і ін. Необхідність обліку цих чинників перетворює розробку нових МОР і технології їх застосування в актуальну науково-технічну проблему, що вирішується на стику цілого ряду галузей сучасної науки вже не стільки на чисто емпіричному, скільки на теоретичному рівні.

Мета роботи: Оцінка можливостей підвищення продуктивності шліфування і якості оброблених деталей шляхом раціонального застосування МОР.

Основна частина. Основними функціональними діями МОР при шліфуванні є змащуюча, охолоджуюча, миюча, диспергуюча і демпфуюча [1].

Мастильна дія МОР полягає в зменшенні роботи тертя абразивних зерен, зв'язки і відходів шліфування. Охолоджуюча дія полягає в відведенні теплоти від нагрітих ділянок зони шліфування і вільних поверхонь заготовки та круга за рахунок нагріву і пороутворення МОР. Миюча дія МОР полягає у видаленні частинок металу і продуктів зносу абразивного інструменту з поверхонь круга, деталей верстата і заго-

товки. Під диспергуючою дією МОР розуміється пластифікування і адгезійне зниження міцності матеріалу заготовки. Демпфуюча дія МОР сприяє зниженню рівня коливань елементів технологічної системи.

У всіх випадках реалізація функціональних властивостей МОР призводить до зниження теплосилової напруженості і енергоємності процесу шліфування і, як наслідок, збільшення періоду стійкості шліфувального круга і якості шліфованих деталей.

Позитивний вплив МОР на процес шліфування полягає також в зміні теплофізичних властивостей шліфувального круга. Аналіз цілого ряду робіт показує, що навіть при подачі МОР поливом шліфувальний круг, за рахунок сил капілярного напору, просочується рідиною, в результаті чого змінюються його ефективні теплофізичні властивості. Заміщення повітря в поровому просторі шліфувального круга рідиною істотно змінює ефективні теплофізичні характеристики шліфувального круга, що призводить до збільшення теплового потоку, що відводиться шліфувальним кругом, і відповідно до зниження теплового потоку, що надходить в заготовку.

Найбільшу об'ємну концентрацію рідини в порах забезпечує подача МОР крізь паровий простір кола. Відомо, що при шліфуванні слід використовувати рідини, що мають високу теплоємність, теплопровідність, приховану теплоту пороутворення, щільність, низькою кінематичною в'язкістю, хорошими мастильними властивостями, а також збільшувати витрати МОР через зону контакту.

Останнє реалізують шляхом вдосконалення техніки подачі МОР в зону обробки [1,2].

Графіки на рис. 1 свідчать про те, що зі збільшенням витрати МОР через задані ділянки зони контакту, зменшується контактна температура. Це дозволяє зробити висновок, що за рахунок перерозподілу витрат МОР між ділянками зони суміщеного і профільного шліфування, забезпечується вирівнювання теплової напруженості процесу шліфування. Збільшення витрати МОР через зону контакту (як в цілому, так і через задані її ділянки) забезпечує більш

повну реалізацію її функціональних властивостей (див. рис.1).

При подачі МОР за зовнішніми трактами збільшення її витрати через зону контакту шліфувального круга із заготовкою перешкоджають повітряні потоки, генеруються обертовим кругом і створюють в зоні контакту «повітряний клин», тиск повітря в якому може досягати 84 кПа. Характер розподілу швидкостей повітряних потоків, що генеруються одиночним шліфувальним кругом при його обертанні, істотно залежить від робочої швидкості кола, його діаметра, висоти і профілю [3].

При шліфуванні кола прямого профілю торцеві повітряні потоки створюють найбільш несприятливі умови для доступу МОР в зони, розташовані у торців шліфувального круга. З зіставленням швидкостей повітряних потоків близько обертового шліфувального круга (див. рис. 2), з ефективністю подачі МОР поливом (з кривою 1 на рис. 1) впливає, що найбільш теплонапружені ділянки зони контакту розташовані в зонах максимальних радіальних швидкостей повітряних потоків. При шліфуванні кругом прямого профілю, торцеві повітряні потоки створюють найбільш несприятливі умови для доступу МОР в зони, розташовані у торців шліфувального круга. З зіставленням швидкостей повітряних потоків близько обертового шліфувального круга (див. рис. 2), з ефективністю подачі МОР поливом (з кривою 1 на рис. 1) впливає, що найбільш теплонапружені ділянки зони контакту розташовані в зонах максимальних радіальних швидкостей повітряних потоків.

Особливі труднощі виникають на операціях швидкісного і високошвидкісного шліфування, виконуваних на швидкостях 50...80 м/с і більше.

Вибір способу подачі МОР при шліфуванні і вигляді енергетичного впливу, залежить від конкретних умов виконання технологічної операції. Перевагу має той спосіб, у якого більше число трактів, підведення МОР до контактної зони, і більш ефективний (в розглянутих умовах) енергетичний вплив на МОР.

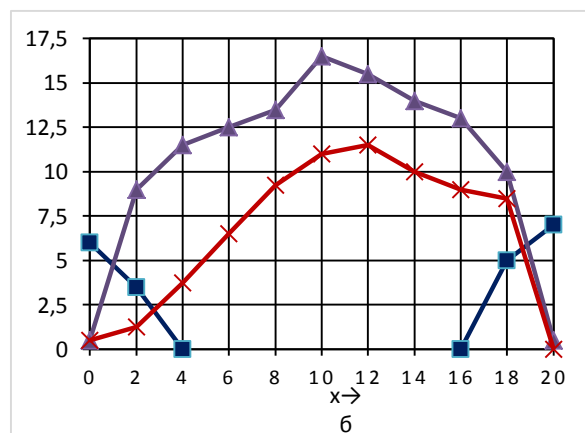
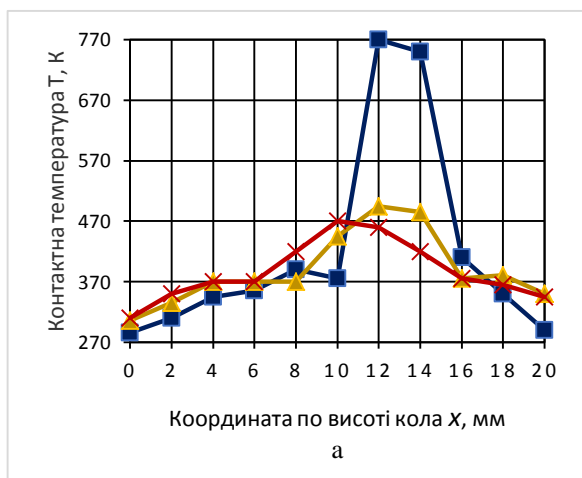


Рис. 1- Розподіл контактної температури (а) і тиску МОР (б) по довжині контакту при плоскому шліфуванні заготовки зі сталі 45 кругом 24A25CM1K7 з подачею 3%-вого розчину кальцинованої соди з витратою 2,5дм³/хв [3]:

▲-крива 1, ■-крива 2, ×-крива 3 - відповідно подача МОР поливом, на торці кола, одночасно поливом і на торці; $V_k = 28\text{м/с}$.

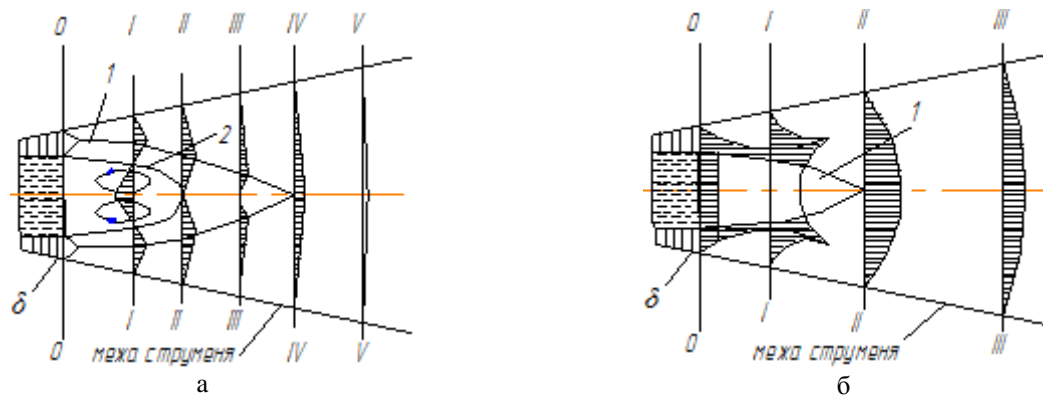


Рис. 2. - Епюра швидкостей турбулентного повітряного потоку близько шліфувального круга в радіальному (а) і окружному (б) напрямках [3]: 1 - поверхня максимальних швидкостей; 2 - замкнена область циркуляційного потоку

Основні способи подачі МОР і деякі з можливих комбінацій з оцінкою ефективності (на якісному рівні) наведені в табл. 1 [1].

Спосіб подачі МОР поливом (рис. 3, а, спосіб № 1) в клинову зону, утворену абразивним кругом яка шліфується поверхнею заготовки, відноситься до числа найбільш поширених, що пояснюється простотою його реалізації та універсальністю. Ефективність подачі МОР поливом багато в чому залежить від ступеня заповнення рідиною клинової зони між шліфувальним кругом і заготовкою.

Потужність рідинного потоку може бути підвищена за рахунок збільшення його швидкості внаслідок збільшення перепаду тиску в напірній магістралі до моменту формування гідравлічного клину в зоні обробки.

Подальше підвищення тиску МОР в системі її подачі підсилює міюча дію МОР по відношенню до круга, але в той же час погіршує санітарно-гігієнічні умови на робочому місці через розбризкування МОР. В даний час можна вважати виправданим спосіб подачі МОР поливом тільки при обробці заготовок з легкошліфувемих матеріалів в одиничному і дрібносерійному виробництвах. При круглому зовнішньому, внутрішньому і плоскому шліфуванні периферією круга витрата МОР повинна бути не менше 8...10 $\text{дм}^3/\text{хв}$. на кожні 10 мм довжини контакту круга із заготовкою, при безцентровому шліфуванні - 3...6 $\text{дм}^3/\text{хв}$, при плоскому шліфуванні торцем кола - 10...15 $\text{дм}^3/\text{хв}$ на кожні 10 мм ширини сегмента або кільця. Норми витрати МОР дані для шліфування з окружною швидкістю кола $V_k' = 35$ м/с. Зі збільшенням V_k' витрати МОР слід збільшувати приблизно прямо-пропорційно відношенню V_k'' і V_k' ($V_k'' > V_k'$).

Подача МОР струменем під тиском (рис. 3, а, спосіб № 2) в зону шліфування відрізняється від поливу тим, що МОР подають під більш високим тиском - 1,0...2,5 МПа і більше. Збільшення тиску призводить до збільшення швидкості потоку МОР і дозволяє долати опір повітряних потоків, що генеруються шліфувальним кругом, завдяки чому забезпечується транспортування рідини в зону шліфування і інтенсифікується відведення теплоти заготовки. Однак, подача МОР під підвищеним тиском призводить до посилення її розбризкування, що вимагає надійної герметизації робочої зони верстата.

Подачу МОР в розпиленому стані (рис. 3, а, спосіб № 3) застосовують при абразивній обробці, головним чином, на операціях заточки ріжучого інструменту, шліфування великогабаритних заготовок, правки шліфувальних кругів алмазними роликками, а також на операціях, які було виконано раніше без використання змащувальної рідини, так як енергія струменя і витрата рідини недостатні для надання істотного впливу на процес шліфування в інших умовах.

Струменем під тиском поза зоною - це спосіб подачі МОР (рис. 3, б, спосіб № 4) найбільш ефективний з усіх основних способів (див. табл. 1). Струмнь МОР, володіючи великою кінетичною енергією (тиск 2...10 МПа і більше), пробиває повітряні прикордонні шари, які генеруються швидкообертаємим шліфувальним кругом, і з досить великою силою впливає на його роботу поверхню вдалині від зони різання, очищаючи пори і абразивні зерна від відходів шліфування.

При цьому на поверхні кола утворюються мастильні плівки. МОР подають на робочу поверхню шліфувального круга поза зоною різання через одне або кілька сопел. При висоті шліфувального круга до 50 мм МОР подають через нерухомі багатоканальні сопла з діаметром отворів 0,5...0,8 мм. Для кругів більшої висоти застосовують рухливі сопла з одним або декількома вихідними отворами. В цьому випадку охолодження заготовки здійснюють додатково через звичайне сопло поливом. На практиці цей спосіб подачі використовують порівняно рідко через відсутність надійних насосів високого тиску для подачі МОР і необхідності ретельного очищення подачі рідини від механічних домішок.

При подачі МОР гідроаеродинамічним способом (рис. 3, в, спосіб № 5) енергія повітряних потоків, створюваних швидкообертаємим шліфувальним кругом, використовується для підвищення швидкості руху рідинного потоку щодо робочої поверхні круга та заготовки що шліфується. За допомогою спеціальних пристроїв активований потік МОР направляється на робочу поверхню круга, очищаючи її від наліпання і відходів шліфування, які потрапляють в зону контакту круга із заготовкою. Витрата МОР - 5...8 $\text{дм}^3/\text{хв}$ на 10 мм довжини контакту. Особливо ефективний цей спосіб при швидкісному шліфуванні. Останнім часом з'явилося багато різновидів гідроаеродинамічних способів.

Таблиця 1 - Способи подачі МОР при шліфуванні і їх ефективність

Номер способу	Спосіб подачі МОР	Число МОР, що подаються одночасно	Дія МОР				
			змащу-вальна	охоло-джую-ча	миюча по відношенню до		
		круга			заготовки	верстата	
Основні способи							
1	Поливом	1	Н	З	Н	Х	Х
2	Струменем під тиском	1	З	Х	З	В	Х
3	У розпорошеному стані	1	Н	З/Н	Н	Н	Н
4	Струменем під тиском поза зоною	1	Х	В	В	Х/В	Х
5	Гідроаеродинамічний	1	Х	В	Х/В	Х	Х
6	Через торцеві насадки	1	В/Х	Н	З	Н	Н
7	Через пори круга	1	В/Х	Н	З	Н	Н
8	Через канали у крузі	1	В/Х	З/Н	Н	З/Н	Н
9	У середовищі МОР	1	В	Х	З	З	З
10	Контактний	1	В/Х	Н	Н	З	Н
11	Поетапний	1*	С/В**	С/Н	С/Н	С/Н	С/Н
Комбіновані способи							
12	№1(№2) + №7(№8)	2; 1	О	З	З	Х	Х
13	№1(№2) + №4	1	Х	В	В	В	В
14	№1+№6	1	Х	З	Х	Х	Х
15	№1(№2) + №10	2	О/Х	З	О	Х	Х
16	№4 + №10	2	О	В	В	Х/В	Х
17	№1(№2) + №5 та ін.	1	Х	В	В/Х	В	В

* Послідовно використовуються дві МОР.
 ** У чисельнику - на початкових етапах циклу шліфування, в залежності від способу подачі МОР (С) приймає значення Н, З, Х, В; в знаменнику - при виході або на іншому завершальному етапі.

Примітка. Позначення ефективності МОР: Н - незначна; З - задовільна; Х - хороша; В - висока; О - особливо висока

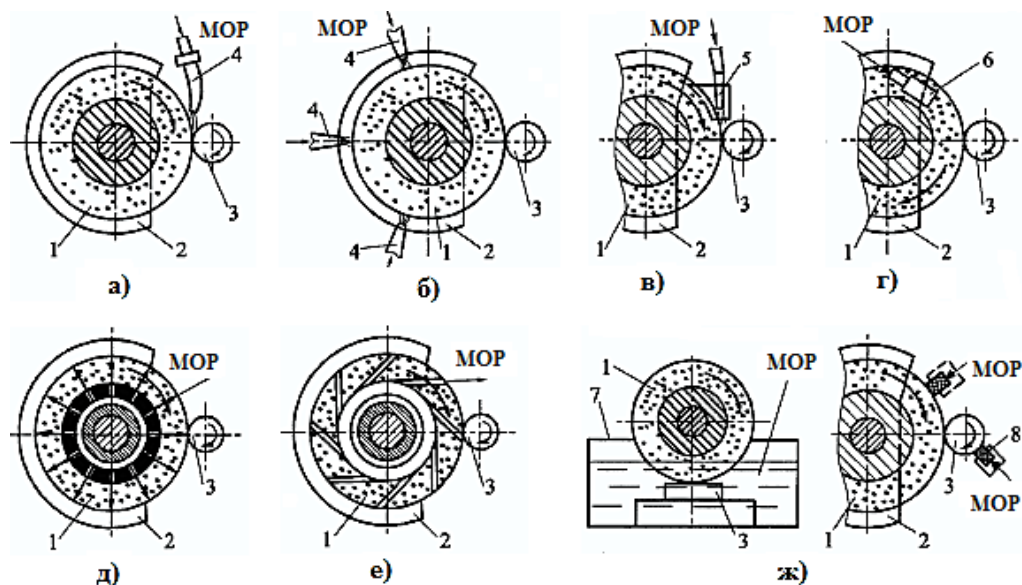


Рис. 3 - Схеми основних способів подачі МОР при шліфуванні: 1 - шліфувальний круг; 2 - кожух; 3 - шліфувана заготовка; 4 - сопло; 5 - насадка; 6 - торцева насадка; 7 - ємкість з МОР; 8 - м'який пористий матеріал, просочений мастилом

Подача МОР через торцеві насадки за способом № 6 (див. Рис. 3, г) виявляється досить ефективною в багатьох випадках. МОР подається в зазор між торцевими поверхнями насадка для подачі МОР і шліфувального круга. Певні труднощі виникають у зв'язку з необхідністю витримувати в жорстких межах зазор між торцем насадка і торцевої поверхнею круга.

Сутність подачі МОР через пори кола (рис. 3, д, спосіб №7) і через канали в колі (рис. 3, е, спосіб № 8) однакова: МОР підводиться у внутрішню порожнину абразивного круга і при його обертанні під дією від-

центрової сили і невеликого тиску, необхідного для запобігання фільтраційного закупорювання пір (при подачі МОР крізь пори кола на керамічній зв'язці), проходить через пори або канали на робочу поверхню круга. При цьому пори кола безперервно промиваються, і відходи обробки добре видаляються з його робочої поверхні. Виключається шкідливий вплив повітряних потоків, створюються умови для освіти міцних мастильних плівок.

При шліфуванні заготовок з загартованих вуглецевих сталей через пори кола подають масляну МОР з

витратою приблизно 3...5 г/хв на кожні 10 мм довжини робочої поверхні шліфувального круга. Через канали в круг подають водні МОР з витратою ~ 2...4 $\text{дм}^3/\text{хв}$ на 10 мм довжини контакту.

Спосіб подачі МОР через пори кола (№ 7) має і ряд недоліків: необхідна досить висока ступінь очищення МОР; спосіб непридатний для шліфування кругами на вулканітових і бакелітових зв'язках, які не мають сполучених пор, для виключення витікання МОР через торцеві поверхні кола до зони шліфування доводиться зафарбовувати, заклеювати чи заливати торці кола. Через небезпеку виникнення структурного дисбалансу області застосування способів № 7 і № 8 обмежуються шліфувальними кругами діаметром до 200...250 мм (внутрішнє і плоске шліфування, заточування різального інструменту).

Шліфування в середовищі МОР (рис. 3, ж, спосіб № 9) застосовується поки порівняно рідко, головним чином при глибинному шліфуванні на операціях вишліфовці стружкових канавок свердел, зенкерів, мітчиків діаметром до 25 мм, а також при стрічковому і плоскому шліфуванні і розрізуванні (відрізанні) заготовок абразивними відрізними кругами.

Подача МОР контактним способом (рис. 3, з, спосіб № 10) дозволяє безперервно наносити на шліфувальну поверхню заготовки найтонший шар активного мастильного матеріалу (наприклад, емульсолів або концентрату синтетичної або напівсинтетичної водної МОР) шляхом підтиску до неї м'якого пористого матеріалу, який насичений мастилом. Цим способом переважно наносять високоефективні (але відносно дорогі) масляні МОР, тверді і пластичні МОР (так як немає розбризкування та інших втрат при загальній витраті МОР близько 10...30 г/год). Однак, охолоджуючу дію МОР при підводі її контактним способом до зони шліфування невелика, тому спосіб № 10 використовують в комбінації з іншими способами подачі водних рідин, сумісних за складом з активним мастильним матеріалом.

Поетапний метод (метод № 11) в принципі відрізняється від всіх інших способів подачі МОР, забезпечуючи можливість повністю реалізувати на одній операції шліфування технологічний потенціал двох різних за складом МОР: на перших етапах циклу шліфування, коли знімається основна частина припуску і велике теплоутворення, в зону обробки поливом або будь-яким іншим способом подають водну МОР. На завершальному етапі шліфування (наприклад, при виходжуванні), коли кількість знятого металу незначна, формуються показники якості шліфованої деталі,

подачу водної МОР припиняють, а на поверхню заготовки що шліфується наносять розпиленням або контактним способом найтонший шар олійної МОР (з витратою - 10...15 г/год на 10 мм довжини поверхні). Поетапний спосіб забезпечує таку ж продуктивність шліфування і якість шліфованих поверхонь деталей, як подача олійною МОР поливом протягом усього циклу шліфування; при цьому витрата олійною МОР незначна, що знімає перешкоди санітарно гігієнічного та економічного плану, які виникають у випадках шліфування з подачею масляних МОР поливом.

У разі високої напруженості процесу шліфування і високих вимог до якості оброблених деталей застосовують комбіновані способи (див. табл. 1).

Істотно інтенсифікувати просочення порового простору шліфувального круга і збільшити витрату МОР через зону контакту дозволяє техніка подачі МОР (рис. 4). Численними дослідженнями показана висока ефективність комбінованих способів, при яких додатково до подачі поливом МОР подають безпосередньо в зону обробки через пори шліфувального круга з використанням УЗ техніки. В цьому випадку стікають по торцях шліфувального круга рідинні прикордонні шари які заміщають повітряні потоки, нейтралізуючи їх негативний вплив, а витрата МОР через ділянки контакту вирівнюється (див. рис. 1).

У пристроях для подачі МОР з накладенням УЗК МОР подають в порожнину клинної насадки 3 (див. рис. 4), що звужується в напрямку подачі рідини та збігається з напрямком обертання шліфувального круга 2, що забезпечує в зазорі між насадкою і кругом режим гідродинамічного змащення і сприяє заміні інтенсивних торцевих повітряних потоків, що генеруються обертовим шліфувальним кругом, рідинними.

Останнє полегшує транспортування МОР в контактні зони при подачі її поливом. Інша частина МОР проникає в поровий простір шліфувального круга, потім під дією відцентрових сил викидається на його робочу поверхню і надходить безпосередньо в зону шліфування заготовки 7. УЗК, накладаються на насадку за допомогою перетворювача 4, сприяють інтенсифікації просочення порового простору шліфувального круга рідиною.

Застосування УЗ техніки подачі МОР дозволяє істотно збільшити витрату рідини через зону шліфування, причому більшою мірою збільшується витрата через найбільш теплонапружені ділянки робочої поверхні кола поблизу його торців, що особливо важливо при суміщеному торцекруглому і профільному шліфуванні.

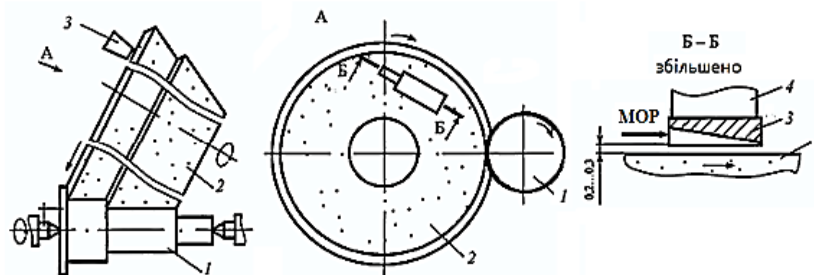


Рис. 4 - Схема УЗ техніки подачі МОР при суміщеному торці круглого шліфування: 1 - заготовка; 2 - шліфувальний круг; 3 - насадка для подачі МОР; 4 - перетворювач УЗК

Основною причиною, яка перешкоджає збільшенню витрати МОР через поровий простір шліфувального круга, є закупорювання його пор бульбашками повітря. Накладення УЗК на фільтр рідини дозволяє істотно послабити негативний вплив цього процесу, що пов'язують з кавітацією, в результаті якої бульбашки повітря послідовно проходять фази розтягування, стиснення і закривання з утворенням сферичної ударної хвилі, «проштовхувати» МОР крізь поровий простір шліфувального круга.

Застосування УЗ техніки подачі МОР забезпечує багаторазове збільшення витрат рідини що фільтрується.

Змінюючи параметри УЗ сигналу іконструктивні параметри напіввідчиненого клинового насадка, можна забезпечити повну просочення примикає до периферії порового простору для кіл, висотою до 120 мм. Знайдено оптимальні конструктивні і режимні параметри УЗ насадок для подачі МОР і координати їх розміщення щодо зони контакту. Встановлено, що найбільший ефект досягається при надмірному тиску подається МОР 0,05...0,07 МПа, при частоті УЗК 18...20 кГц, амплітудою 1,5...10 мкм і зазорі між насадкою і поверхнею шліфувального круга 0,07...0,2 мм.

Тим часом, резервом вдосконалення УЗ пристроїв для подачі МОР залишається оптимізація форми використовуваного в них УЗ сигналу. Так, за даними Л. Н. Зарембо і В. А. Красільнікова [4], мінімальний розмір R_{0min} бульбашки, здатного квітувати при заданій амплітуді звукового тиску, може бути визначений з умови розриву рідини:

$$P - P_0 > \frac{2}{3} \sqrt{\frac{8\sigma_{ж}^3}{3R_{0min}(P_0 + 2\sigma_{ж} / R_{0min})}} \quad (1)$$

де P_0 - гідростатичний тиск рідини, Па; P - амплітуда звукового тиску, Па; $\sigma_{ж}$ - поверхневий натяг рідини, Н/м. R_{0max} визначається з умови резонансу:

$$\rho_{ж} (\omega R_{0min})^2 = 3\gamma(P_0 + 2\sigma_{ж} / R_{0min}) \quad (2)$$

де γ - постійна величина, що характеризує властивості середовища (для газів $\gamma = C_p / C_v$ - відношення теплоємності при постійному тиску і об'ємі); ω - резонансна частота бульбашки, Гц:

$$\omega = R_0^{-1} \sqrt{3\gamma(P_0 + 2\sigma_{ж} / R_0) \rho_{ж}^{-1}} \quad (3)$$

де R_0 - початковий радіус бульбашки, м.

Таким чином, в кавітацію залучаються бульбашки, розміри яких задовольняють умові

$$R_{0min} < R < R_{0max} \quad (4)$$

де R_{0min} визначається амплітудою звукового тиску, а R_{0max} - частотою коливаний.

Щоб забезпечити кавітацію бульбашок, що мають різні початкові розміри R_0 , слід розширити як спектр частот коливаний насадки, так і діапазон амплітуд звукового тиску. На практиці це можна здійснити, накладаючи на насадку модульовані по частоті, амплітуді або фазові коливання.

Модульовані коливання - це коливання з відносно-повільною зміною амплітуди, частоти або фази, таким, щоб за період коливаний модульований параметр змінювався незначно. При модуляції амплітуди синусоїдальним сигналом рівняння, що описує модульоване коливання, має вигляд

$$X = A_0(1 + m \sin \Omega \tau) \cdot \sin(\omega \tau + \varphi), \quad (5)$$

де A_0 - амплітуда вихідного коливання параметрам; $\omega = 2\pi f$, де f - циклічна частота, Гц; φ - початкова фаза вихідного коливання, радий; Ω - частота модулюючих коливаний, рад/с; m - глибина модуляції, що характеризує ступінь зміни амплітуди:

$$m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad (6)$$

де A_{max} і A_{min} - максимальне і мінімальне значення амплітуди, м.

Амплітудно-модульоване коливання з синусоїдальною модуляцією являє собою суму трьох гармонійних коливаний з частотами ω , $(\omega + \Omega)$ і $(\omega - \Omega)$. Коливання частотою ω називається несучим; його амплітуда дорівнює амплітуді A_0 вихідного коливання. Дві інші частоти називаються бічними, амплітуда кожного з цих коливаний дорівнює $mA_0/2$.

Присутність в спектрі амплітудно-модульованого сигналу гармонійних коливаний з частотою $(\omega - \Omega)$ сприяє залученню в процес кавітації більших бульбашок, ніж в разі використання моделюваній сигналу частотою ω .

При частотній модуляції модулюючий сигнал викликає зміни миттєвих значень частоти, не впливаючи на амплітуду коливаний. При модуляції синусоїдальним сигналом частота коливаний змінюється за законом

$$\omega = \omega_H + \Delta\omega \cos(\Omega \tau), \quad (7)$$

де ω_H - несуча частота, рад/с; $\cos(\Omega \tau)$, - визначає форму модулюючого сигналу; $\Delta\omega$ - девіація частоти, що представляє собою амплітуду відхилення частоти від несучої частоти.

Смуга частот частотно-модульованого коливаний залежить від величини $\beta = \Delta\omega/\Omega$, яка називається індексом частотної модуляції. При $\beta \ll 1$ справедливо наближене співвідношення

$$X = A_0[\sin(\omega \tau) + \beta \sin(\Omega \tau) \cdot \cos(\omega \tau)] \quad (8)$$

Повну ширину смуги частот, яку займає частотно-модульоване коливання з девіацією $\Delta\omega$ і частотною модуляцією Ω , можна вважати рівною $(2\Delta\omega + 2\Omega)$. Ця смуга ширша, ніж при амплітудній модуляції коливаний.

Широкий спектр частот, яку він обіймає частотно-модульованим коливанням, очевидно, може сприяти і значно розширювати діапазони розмірів бульбашок, здатних квітувати. Так, присутність в цьому спектрі коливаний з мінімальною частотою, як було показано вище, може викликати кавітацію бульбашок, що мають досить великі розміри. У той же час звуковий тиск про-

порційний швидкості коливань частинок, а та, в свою чергу, - частоті коливань і амплітудою коливального зміщення частинок.

Тому наявність в спектрі коливань з максимальною частотою має сприяти залученню в процес кавітації бульбашок, що мають вельми малі розміри.

Висновки. Таким чином, застосування модульованих коливань може призвести до значного збільшення діапазону розмірів бульбашок, здатних кавітувати, а отже, і до збільшення витрат МОР, що проходить крізь паровий простір абразивного круга в контактну зону при шліфуванні.

Збільшення витрати МОР, що проходить через зону контакту круга із заготовкою, призводить до зменшення теплосилової напруженості процесу шліфування, що, в свою чергу, сприяє підвищенню якості поверхневого шару шліфованих деталей: зменшується ймовірність виникнення пропалів, розтягування залишкових напружень, мікротріщин. Одночасно з'являється можливість збільшення продуктивності обробки або за рахунок інтенсифікації елементів режиму і скорочення основного часу t_0 в штучному $T_{шт}$ без побоювання зниження заданого рівня якості шліфованих деталей, або за рахунок збільшення періоду стійкості інструменту і скорочення допоміжного часу t_d , що витрачається на правку круга, при одночасному підвищенні якості поверхневого шару шліфованих заготовок.

Список літератури

1. Худобин Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Под общ. ред. Л. В. Худобина — М.: Машиностроение, 2006. — 544 с.
2. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учебное пособие / Е. С. Киселев. — Ульяновск: УлГТУ, 2003. — 186 с.

3. Ефимов В. В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании / В. В. Ефимов — Саратов: СГУ, 1985. — 140 с.
4. Зарембо Л. Н. Введение в нелинейную акустику / Л. Н. Зарембо, В. А. Красильников. — М.: Наука, 1966. — 519 с.
5. Киселев Е. С. Научные основы и технология шлифования заготовок: сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. — Ульяновск: УлГТУ, 2006. — 52 с.
6. Ардашев Д. В. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д. В. Ардашев, Д. Е. Анельчик, Г. И. Буторин [и др.]. — Челябинск: Изд-во АТОСКО, 2007. — 384 с.

References (transliterated)

1. Khudobyn L. V. *Smazochno-ohlazhdajushhie tehnologicheskie sredstva i ih primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technological tools and their application in the machining process]. reference book, Moscow, Mashynostroenye Publ, 2006. 544 p.
2. Kyselev E. S. *Intensifikacija processov mehanicheskoy obrabotki ispol'zovaniem jenerгии ul'trazvukovogo polja* [Intensification of machining processes using ultrasonic energy field]. teaching aid, Ul'yanovsk, UIHTU, 2003. 86 p.
3. Efymov V. V. *Nauchnye osnovy tehniki podachi SOZh pri shlifovanii* [Scientific bases of technology coolant during grinding]. Saratov, SHU, 1985. 140 p.
4. Zarembo L. N., Krasyl'nykov V. A. *Vvedeniye v nelinejnuju akustiku* [Introduction to nonlinear acoustics]. Moscow, Nauka Publ, 1966. 519 p.
5. Kyselev E. S., Koval'nohov V. N. *Nauchnye osnovy i tehnologija shlifovaniya zagotovok* [Scientific basis and technology of grinding pieces]. a collection of research laboratory operations, Ul'yanovsk: UIHTU, 2006. 52 p.
6. Ardashev D. V., Anel'chik D. E., Butoryn H. Y. *Rezhimy rezaniya na raboty, vypolnjaemye na shlifoval'nyh i dovodochnyh stankah s ruchnym upravleniem i poluavtomatah* [Cutting Conditions on the work carried on the grinding and finishing machine tools with manually operated and semi-automatic machines]. reference book, Chelyabinsk, ATOSKO Publ, 2007. 384 p.

Поступила (received) 29.03.2015

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження технологічної ефективності пристроїв для подачі мастильно-охолоджувальної рідини через клинові напіввідкриті насадки до торця круга при круглому зовнішньому шліфуванні / О.Л. Кондратюк, А.О. Скоркін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. — Х.: НТУ «ХПІ», 2016. — № 5 (1177). С. 34-40. — Бібліогр.: 6 назв. — ISSN 2079-004X.

Исследование технологической эффективности устройств для подачи смазочно-охлаждающих жидкостей через клиновые полукрытые насадки к торцу круга при круглом наружном шлифовании / О.Л. Кондратюк, А.О. Скоркин // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Технологии в машиностроении. - Х.: НТУ «ХПІ», 2016. - № 5 (1177). С. 34-40. - Библиогр.: 6 названий. - ISSN 2079-004X.

Research of technological efficiency of devices for supplying through a half open nozzle cooling lubricants to the edge the circle with a circular external grinding / O. L. Kondratiuk, A. O. Skorkyn // Bulletin NTU «KhPI». Series: Technologies in mechanical engineering. — Kharkiv. : NTU «KhPI», 2016. - № 5 (1177). — P. 34-40. — Bibliogr.: 6. — ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кондратюк Олег Леонідович — канд. техн. наук, доц. УІПА, м. Харків, тел.: (057)-733-78-26;

Кондратюк Олег Леонідович — канд. техн. наук, доц. УІПА, г. Харьков, тел.: (057)-733-78-26;

Kondratiuk Oleg Leonidovich — Candidate of Technical Sciences, Docent of Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, tel.: (057)-733-78-26, e-mail: Kondratuk_uipa@I.ua;

Скоркін Антон Олегович — канд. техн. наук, доц. УІПА, м. Харків, тел.: (057)-733-78-26;

Скоркін Антон Олегович — канд. техн. наук, доц. УІПА, г. Харьков, тел.: (057)-733-78-26;

Skorkyn Anton Olegovich — Candidate of Technical Sciences, Docent of Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, tel.: (057)-733-78-26