

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕРТЯ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО І ОБРОБЛЮЄМОГО МАТЕРІАЛІВ

1. Постановка проблеми

Дослідження процесу перетворення поверхневого шару заготовки в стружку, або так званого – процесу різання, під дією прикладеної до ріжучого інструменту зовнішньої сили, пов'язано насамперед, з розумінням сутності закономірностей взаємодії фізичних явищ між собою. Для представлення загальної картини процесу різання і створення фізичної моделі, яка опише всі взаємодії даного процесу, необхідне дослідження його невід'ємних складових – виникнення, протікання і взаємодії між собою ряду фізичних явищ, які супроводжують процес різання.

Одним з фізичних явищ є процес дії сили тертя, який супроводжує зріз стружки і її транспортування по передній поверхні ріжучого інструменту із зони різання і зони обробки.

До середини минулого століття все стороннє дослідження процесу дії сили тертя стримувала багатофакторність впливу сили тертя на процес різання. Це служило виправданням неможливості точного визначення природи і труднощів формального опису взаємодії процесу дії сили тертя з іншими фізичними явищами, що протікають одночасно з ним. Але разом з тим кожен чинник окремо, тобто складові процесу різання – механічні, фізичні, хімічні, електромагнітні і інші явища – всі порізно підкоряються варіаційним принципам термодинаміки незворотних процесів. Очевидно, що комплексна течія фізичних явищ не може не підкорятися тим же принципам, заснованим на понятті ентропії або інформації.

Отже, подальше дослідження процесу тертя можливе тільки на основі проникнення на атомно-молекулярний (структурний) рівень, тобто розтин

фізичного і хімічного коріння процесів тертя і зношування, що може дати нове просування вперед на шляху вирішення не тільки теоретичних, але і прикладних проблем. Дійсно, не знаючи фізичної і хімічної суті явища, не можна намагатися осмислено управляти ними. Цей підхід був реалізований в подальших дослідженнях, проте це привело до іншої крайності – появи спрощених моделей процесу дії сили тертя із-за складності взаємодії численних чинників, що описують даний процес.

В даний час, з проблеми тертя і зношування в процесі різання різноманітних матеріалів, зібраний і узагальнений великий експериментальний матеріал, на основі якого зроблені важливі теоретичні висновки і пропозиції. Досить звернутися до праць відомих вітчизняних і зарубіжних вчених, які досліджували дану проблему, зокрема до робіт Крагельського І.В., Ахматова А.С., Боудена Ф.П. і Тейбора Д. і послідовників їх теорій. В основі цих робіт лежать дослідження двох питань процесу тертя, механіки і статистики контактних взаємодій. Дані питання є головними в дослідженні еволюції форм поверхонь, що труться, і мікро механізму, дисипативних процесів, що протікають в них.

Проте всі питання, як наголошувалося раніше, пов'язані з проблемами процесу тертя, розглядалися тільки з дуже вузького боку. Фактично вивчався сам процес тертя в спеціально створених або штучних умовах при впровадженні індуктора в досліджуваний матеріал. Отже, при фактичних дослідженнях враховувалися або взаємодії в одній точці контакту, або на невеликій ділянці з мастилом, або без нього. У розрахунки не приймалися багатогранність протікання процесу тертя в сукупності з впливом на даний процес інших фізичних явищ, супроводжуючих даний процес різання. Дані спрощення можливі при дослідженні самого процесу тертя, але при створенні фізичної моделі процесу різання різноманітних матеріалів цих даних недостатньо. Це пов'язано з тим, що природний процес дії сили тертя при механічній обробці матеріалів істотно відрізняється від даного «штучного» процесу. Так зокрема, в зоні різання процес тертя протікає двох видів: по задній

поверхні інструменту переважає сухе тертя по ювенальним поверхнях; по передній поверхні переважає рідинне тертя, оскільки при великих температурах і тиску при контактний шар стружки стає рідко текучим.

У зоні обробки навпаки переважає дія сили тертя з мастилом, хоча можливий прояв сухого тертя, або напів сухого тертя на обмежених ділянках. Отже, дія сили тертя, супроводжуючий процес зрізання поверхневого шару і транспортування стружки із зони різання і зони обробки, необхідно досліджувати принаймні в умовах трьох видів тертя: сухого з взаємодією ювенальних поверхонь в умовах високих контактних навантаженнях без доступу кисню; рідинного в приконтактном шарі; з мастилом, або без нього, в умовах наявності кисню і інших хімічних речовин.

Звідси витікає, що при дослідженні закономірностей процесів тертя і процесу стирання, необхідних для створення загальної фізичної моделі процесу різання різноманітних матеріалів, необхідно враховувати не спрощені форми прояву даного процесу дії сили тертя, а узагальнену фізичну модель прояву різних закономірностей впливу процесу тертя. В даний час фізична модель, яка враховує всі особливості взаємодії процесу тертя, на інші фізичні явища відсутній, хоча передумови до її створення вже існують.

2. Аналіз досліджень

В даний час існують декілька підходів до дослідження процесу дії сили тертя і процесу стирання (зносу) поверхонь ріжучого інструменту, це пов'язано з багатофакторністю даного процесу, зокрема: макроскопічні і мікро статичні закономірності руйнування тіл; поверхневе руйнування контактних поверхонь, що труться (зношування); теорія суцільних середовищ і так далі. Отже, враховуючи різні напрями дослідження процесу дії сили тертя і зношування, розглянемо тільки деякі з них, стосовно обраних різних умов обробки різноманітних матеріалів.

Робота Цеснека Л.С. [1] присвячена механічним і статичним (мікроскопічним) аспектам проблеми стирання поверхонь твердих тіл стосовно

дослідження проблеми абразивного стирання. У ній приведені основні аспекти даної проблеми і шляхом управління даним процесом. Отже, в даній роботі розглядався процес абразивного зносу твердих тіл з урахуванням взаємодії ювенальних поверхонь, в умовах їх безпосереднього фізичного контакту. Проте при дослідженні природи абразивного зносу не враховувалося адгезійне зношування, що характерно для ювенальних поверхонь.

Тоді як в роботі Семенова А.П. і ін. [2], присвяченій природі адгезійної взаємодії при високих температурах, приведена методика дослідження даного процесу.

У роботі Шульца В.В. [3] приведені результати взаємозв'язку природного зносу деталей машин і ріжучих інструментів в процесі їх експлуатації залежно від їх форми, в світлі підвищення їх стійкості до стирання. Приведені методики розрахунку основних взаємозв'язків, загальні принципи і аналогії в теорії зношування незворотних процесів.

Звідси витікає, що необхідно об'єднати дані цих робіт при урахуванні впливу процесу дії сили тертя на знос ріжучого інструменту залежно від його форми, умов механічної і адгезійної взаємодії.

У роботі Літвінова В.Н. і ін. [4], приведені результати комплексних досліджень поверхонь тертя і змащувального середовища в умовах граничного тертя. Оцінений вплив фізико-хімічних і механіко-хімічних процесів на руйнування поверхонь при граничному терті. Продовження цієї теми приведене в роботі Шпенькова Г.П. [5], в якій узагальнені результати дослідження ряду поверхневих явищ, спостережуваних при механічній обробці. Зокрема, розглянута природа взаємодії металів при терті в режимах виборчого перенесення і водневого зношування. Отже, в цих роботах з одного боку досліджувалася природа аномально низьких коефіцієнтів тертя і зносу, з іншої – катастрофічний характер руйнування поверхневих шарів. Проте в світлі створення математичної моделі процесу обробки металів різанням, знання фізики і хімії даних процесів недостатньо, оскільки розглянуті явища є одними з багатьох, що протікають в зоні різання і обробки.

За даними робіт А.Я. Котлярова і ін. [6], І.В. Крагельського і ін. [7] відоме, що адгезійна взаємодія на контактних поверхнях інструменту приводить до циклічності навантажень (вібрації), дестабілізує силу різання і коефіцієнт тертя в зоні контакту, сприяє виникненню втомних руйнувань і відриву мікро- і макрочасток інструментального матеріалу. Отже, сили адгезії ініціюють виникнення таких фізичних явищ: як освіта і зростання наростів, знос контактних майданчиків інструменту і оброблюваних деталей, пакетування стружки і ін.

Виходячи з того, що нарости виникають в результаті сумісної дії високих температур і великої контактної напруги, часто по інтенсивності їх освіти судять про адгезійну взаємодію інструментального і оброблюваного матеріалів. Але це може привести до помилкових висновків по частці адгезійної взаємодії в силі різання, оскільки нарости виникають в результаті не тільки адгезійної, але і механічної взаємодії (при заклинюванні невеликих об'ємів приконтного шару металу в мікро нерівностях поверхні інструменту). При цьому поверхневі шари оброблюваного матеріалу, у зв'язку з високою швидкістю деформації, сильно зміцнюються, і руйнування стружки при терті відбуватиметься в шарах, що пролягають нижче, а частинки металу, що упровадилися, залишаться на поверхні А навіть при невеликій адгезійній взаємодії. Це явище спостерігається у вигляді білого нальоту на робочій частині свердла навіть після його нетривалої експлуатації, причому збільшення інтенсивності спостерігається у напрямку до вершини інструменту, що і підтверджує дане припущення.

Встановити циклічність утворення наростів на контактних поверхнях (передня і задня) інструменту можна лише на основі кількісної оцінки адгезійної і механічної сили тертя, що становить. Це дозволить встановити природу сил тертя і тангенціальну міцність адгезійного зв'язку, а також виявити і пояснити закономірності зносу ріжучого інструменту і пакетування стружки в стружкових канавках на основі дії складових сили тертя.

Закономірності зміни тангенціальній міцності адгезійного зв'язку залежать від нормальної контактної напруги і величини температури, як в зоні

різання, так і в зоні обробки, тобто для кожного вибраного набору параметрів значення буде постійним, як для передньої, так і задньої поверхні. Тоді як закономірності зміни величин адгезійної і механічної взаємодії зазнають, залежно від зони дії, великі зміни, тобто можуть переходити з одного агрегатного стану в інше. Отже, необхідно розділити завдання по дослідженню механічної і адгезійної сили тертя, що становить, розділити на дві частини: дослідивши вплив складових сили тертя, як по передній поверхні ріжучого інструменту, так і по задній.

При рішенні цієї задачі визначали окремо по передній і задніх поверхнях зміна закономірностей тангенціальній міцності адгезійного зв'язку від нормальної напруги і температури.

Необхідні відомості про природу утворення пакетів стружки в стружкових канавках спіральних свердел, і кількісна оцінка величини сили тертя при взаємодії пар алюміній – швидкорізальна сталь, алюміній - нітрид і карбід титану в даний час приведені в роботі [8]. Інших даних з цього питання у вітчизняній і зарубіжній літературі немає, окрім загальних відомостей про коефіцієнти адгезії різних пар матеріалів, тобто в них є уривчасті дані про взаємодію різних матеріалів стосовно процесу чистого тертя. Тому необхідно провести ряд досліджень, спрямованих на визначення адгезійної (тангенціальною) дії сили тертя, що становить, по передній поверхні на моделюючій установці [9].

Вимірювання складових механічної і адгезійної взаємодії сили тертя, для різноманітних досліджуваних пар матеріалів, за даними різних авторів [7, 8], проводилося при різних значеннях температури, як в природних умовах (на повітрі), так і вакуумі, з охолодженням зони контакту, так і без нього, при терті або статичному контакті поверхонь під тиском.

Тому на базі досліджень, що існують в даний час, з питання визначення адгезійної взаємодії сили тертя, автором розроблений метод, який заснований на визначенні тангенціальної складової контактної напруги (тангенціальної сили адгезійного зв'язку) при терті досліджуваних двох видів матеріалів.

Досліди проводилися в умовах заданих температур і інших параметрах даного процесу, які відповідають умовам протікання процесу різання при обробці глибоких отворів [8].

Врахування експериментальних досліджень, приведених в роботах [8, 9] необхідний для визначення впливу процесу тертя на знос ріжучого інструменту і оброблюваної деталі в зоні обробки.

Звідси робимо висновок, при дослідженні багатогранності впливу процесу тертя на процес різання, необхідно враховувати тільки чинники, які впливають насамперед на протікання даного процесу. До цих чинників слід віднести наступні: фізичну і хімічну суть процесу зношування; окремо необхідно відзначити адгезійне зношування, оскільки воно виникає у відмінних від попередніх умовах (тільки в області високих температур і питомого тиску); явища рідко текучості; взаємодія інструментального і оброблюваного матеріалів і так далі.

3. Виклад основного матеріалу

Створення загальної фізичної моделі процесу дії сили тертя з врахуванням всіх його особливостей необхідне для того, щоб виникла можливість опису засобами математичного аналізу існуючих законів взаємодій фізичних явищ при різанні різних матеріалів. Дана фізична модель процесу тертя не може бути розглянута без взаємозв'язку з іншими фізичними явищами, супроводжуваними процесом різання матеріалів, оскільки ці процеси взаємозв'язані між собою. Проте автор навмисно розбиває загальну фізичну модель процесу різання на окремі елементи, зокрема модель процесу тертя (рис. 1) [8, 9], з метою простішого її математичного опису із-за виникаючих нездоланих складнощів з описом перебігу багатofакторних фізичних явищ і їх взаємозв'язків і відсутністю в даний час загальної теорії процесу тертя при різанні різних матеріалів.

Вплив процесу дії сили тертя на процес різання різноманітних матеріалів виявляється в декількох випадках: насамперед, це відбувається із-за зносу

ріжучого інструменту, що веде до зростання сили різання; у другу, із-за зростання кількості теплоти, як в зоні різання, так і в зоні обробки, що викликає приріст сили тертя із-за адгезійної взаємодії; у третю, із-за необхідності подолання дії сили тертя, потрібно прикладати додаткову силу різання.

Виходячи з розглянутого вище аналізу існуючих літературних джерел витікає, що фактично процес тертя при обробці матеріалів різанням складається з наступних основних взаємодій: механічного і адгезійного при стиранні поверхні інструменту і заготовки; електрофізичного і електрохімічного; фізичного і хімічного і так далі.

Суть цих явищ полягає у дії, як в мікросвіті на атомно-молекулярному рівні, так і макросвіті – на рівні невеликих фрагментів оброблюваного і інструментального матеріалів. Тому існує відмінність між зоною різання і зоною обробки, не дивлячись на схожість процесів, що протікають там.

Розглянемо спочатку зону різання. Процес тертя виникає там одночасно з впровадженням в поверхню заготовки ріжучого інструменту спочатку по задній поверхні свердла, потім у міру утворення елементів стружки на передній.

Процес тертя по задній поверхні інструменту насамперед характеризується адгезійною взаємодією, тобто появою і зрізає, так званих «містків схоплювання» між точками контакту інструментального і оброблюваного матеріалу. Цей процес розповсюджується по зростаючій експоненті, залежно від зростання температури в зоні різання і збільшення розмірів майданчиків контакту ювенальних поверхонь у міру зносу інструменту. Збільшення майданчиків контакту ювенальних поверхонь насамперед пов'язане із зносом ріжучого інструменту із-за механічного стирання поверхневих шарів, по-друге, із швидкістю окислювально-відновлюваних реакцій на цих поверхнях.

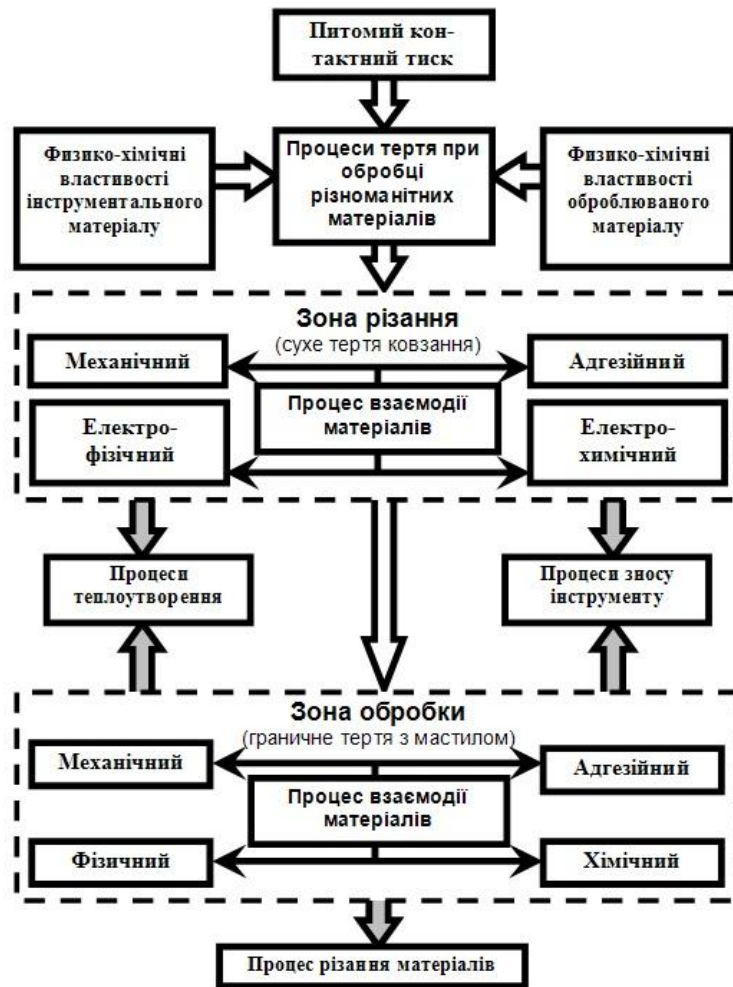


Рис. 1 – Існуюча фізична модель процесу тертя при обробки різноманітних матеріалів: світлими стрілками показаний напрям первинної взаємодії; темними - вторинного; тонкими чорними – внутрішня взаємодія між фізичними явищами процесу тертя

На передній поверхні переважає механічна взаємодія, через те, що зростання кількості теплоти в елементі стружки, що зрізається, розплавляє приконттактний її шар до появи фази рідко текучості оброблюваного матеріалу. Отже, розплав оброблюваного матеріалу під дією високого контактного тиску, заповнює мікро нерівності в поверхні ріжучого інструменту, де і відбувається їх заклинювання, але оскільки процес продовжується постійно в часі, відбувається те, що застрягли частинки оброблюваного матеріалу зрізаються з утворенням ювенальних поверхонь по площині, що зрізається. Надалі це приводить до появи адгезійної взаємодії на зрізаній площині залежно від адгезійної

активності інструментального і оброблюваного матеріалів, що у свою чергу викликає виривання поверхневих частинок інструменту а, отже, приводить до адгезійного стирання ріжучого інструменту і дестабілізації процесу різання. Величина зносу ріжучого інструменту при свердленні переважає більше на задній поверхні, чим на передній (в інших випадках обробки матеріалів цей процес відмінний від розглянутого), тому у ряді випадків при обробці окремих хімічно не активних матеріалів адгезійною взаємодією по передній поверхні можна нехтувати.

Вплив електрофізичних і електрохімічних взаємодій в зоні різання зв'язаний насамперед, із появою електричного потенціалу із-за руйнування кристалічної решітки оброблюваного матеріалу, з іншого боку із-за появи вільних радикалів (іонів) в результаті протікання хімічних реакцій в зоні різання під дією високих температур і великого питомого контактного тиску. Все це в сукупності створює умови для підвищеного зносу ріжучого інструменту, яке виражається у вириванні окремих атомів, молекул або мікрочасток з поверхневих шарів інструментального і оброблюваного матеріалів при створенні електролітичних пар і ін.

Сукупність розглянутих процесів по задній поверхні в зоні різання обумовлює наявність сухого тертя ковзання одного матеріалу по іншому, через те, що підведення ЗОТС безпосередньо на ювенальні поверхні ріжучого інструменту і оброблюваної заготовки в принципі неможливе.

Зона обробки характеризується іншими величинами, зокрема тут переважає механічна взаємодія, тобто процес абразивного зносу йде шляхом дряпання частинок стружки і фрагментів наростів (які значно твердіше оброблюваного матеріалу) обробленої поверхні заготовки і передньої поверхні інструменту.

Адгезійна взаємодія інструментального і оброблюваного матеріалу значно менша, оскільки практично відсутні ювенальні поверхні або вони значно менші, ніж в зоні різання. Окрім цього в даній зоні значно менше вплив

температури, із-за відведення значної кількості теплоти з цієї зони ЗОТС, в деталь або розсіювання в навколишнє середовище.

Проте тут повною мірою виявляються фізичні і хімічні взаємодії між оброблюваним і інструментальним матеріалом. У зоні обробки вплив фізичної взаємодії виявляється у вигляді зміни фізичних властивостей оброблюваного матеріалу, що видаляється, тобто матеріал стружки і фрагменти наростів бувають значно твердішими, ніж основний матеріал, при значно меншій питомій вазі. Це пов'язано з появою твердих окисних плівок на поверхні стружки, наявністю фрагментів наростів і ін.

Хімічна взаємодія виявляється у меншій мірі, оскільки з одного боку в цій зоні менше іонів інструментального і оброблюваного матеріалів, а з іншою за наявності багатоконпонентних ЗОТС ініціюють абсолютно інші хімічні процеси. Зокрема, із-за високої температури відбувається розкладання ЗОТС на окремі фрагменти, що може привести до появи так званого гідродинамічного або хімічного зносу. Цей знос дуже невеликий по величині і дуже тривалі в часі, тому їх значеннями у ряді випадків можна нехтувати, особливо при обробці хімічно не активних матеріалів.

Проте розкладання ЗОТС супроводжується появою вільних радикалів, що у свою чергу ініціює водневий знос інструментального і оброблюваного матеріалів. Даний вид зносу насамперед впливає на якість оброблюваної поверхні, що особливо важливе при остаточній або обробній обробці поверхонь. При невисоких технічних вимогах до обробленої поверхні впливом водневого зносу в зоні обробки можна нехтувати, оскільки він порівняно малий і не робить істотного впливу на точність виконавчих розмірів.

Гідродинамічний знос пов'язаний з дією явища «кавітації» на поверхні інструменту, тобто із-за розпаду ЗОТС утворюються невеликі бульбашки з газом, відривши яких від поверхні інструменту викликає виривання невеликих за об'ємом фрагментів інструментального матеріалу.

Хімічний знос пов'язаний з процесом окислення як інструментального, такого оброблюваного матеріалу і зривом продуктів окислення з

інструментальної і оброблюваної поверхні, що приводить до появи каверн на цих поверхнях.

Перевірку основних положень фізичної моделі (рис. 2) виконали на промірі дослідження процесу обробки отворів в алюмінії. Визначення основних положень фізичної моделі на підстави обробки алюмінію було зроблено виходячи з міркувань високої адгезійної взаємодії цього металу з іншими.

Висновки

1. Створення загальної фізичної моделі процесу дії сили тертя в зоні різання і в зоні обробки при глибокому свердленні матеріалів залежно від взаємодії фізичних явищ між собою, не супротивить існуючим уявленням про даний процес.

2. Фізична модель процесу тертя в даний час (рис. 2), як найповніше враховує взаємний вплив між фізичними явищами, супроводжуючих процес різання.

3. Фізична модель якнайповніше представляє закономірності взаємозв'язків між зоною різання і зоною обробки, а значить, більш повно враховує закономірності впливу фізичних явищ один на одного.

4. Наочність фізичної моделі сприяє точнішому опису процесу дії сили тертя з погляду математичної моделі процесу різання матеріалів.

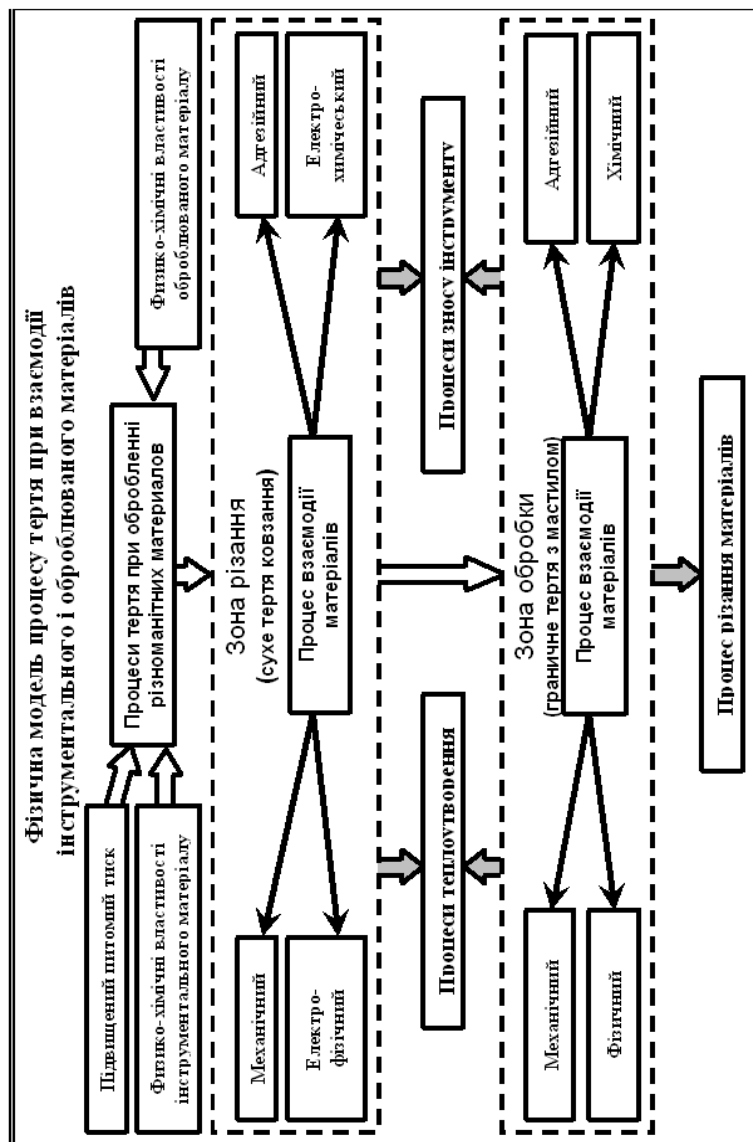


Рис. 2 – Запропонована фізична модель процесу тертя. Світлими стрілками показаний напрям первинної взаємодії; темними - вторинного; тонкими чорними – внутрішня взаємодія між фізичними явищами процесу тертя

Список використаних джерел

1. Цеснек Л. С. Механика и микрофизика истирания поверхностей / Л. С. Цеснек. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
2. Семенов А. И. Методика и образцы для исследования адгезионного взаимодействия при высоких температурах / А. И. Семенов, В. В. Поздняков, А. А. Кацура // Трение и износ при высоких температурах : сб. науч. тр. – М. 1973. – С. 23–27.

3. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента / В. В. Шульц. – Л.: Машиностроение, 1990. – 208 с.

4. Литвинов В. Н. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении / В. Н. Литвинов, Н. М. Михин, Н. К. Мышкин. – М.: Наука, 1979. – 185 с.

5. Шпеньков Г. П. Физикохимия трения / Г. П. Шпеньков. – Минск : Университетское, 1991. – 397 с.

6. Котляров А.Я. и др. Прочность адгезионной связи резца со стружкой при прерывистом резании сплавов титана // Станки и инструмент. – 1979. – № 9. – С. 19–21.

7. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

8. Маршуба В. П. Адгезионное взаимодействие быстрорежущей стали с литейными алюминиевыми сплавами / В. П. Маршуба // Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг : тр. VII междунар. семинара 24-28 сент. / Харьк. гос. политехн. ин-т. – Х., 1997. – С. 185–187.

Маршуба В.П., Чернякова О.В. «Физическая модель процесса трения при взаимодействии инструментального и обрабатываемого материалов».

В данной статье рассматриваются особенности построения физической модели процесса действия силы трения, которая базируются на основании существующих, на сегодня представлений о процессе резания разнообразных материалов. Действие силы трения рассматривается в свете появления, взаимодействия и влияния, один на другого физических явлений, которые сопровождают процесс резания. Разработанная физическая модель действия силы трения позволит существенно сократить время, использованное на проектирование новых режущих инструментов и разработку технологических процессов обработки отверстий.

Ключевые слова: физическая модель, трение, резание материалов, обработка отверстий.

Маршуба В.П., Чернякова О.В. «Фізична модель процесу тертя при взаємодії інструментального і оброблююмого матеріалів».

В даній статті розглядаються особливості побудови фізичної моделі процесу дії сили тертя, що базуються на підставі існуючих на сьогодні уявлень про процес різання різноманітних матеріалів. Дія сили тертя розглядається в світлі появи, взаємодії та впливу друг на друга фізичних явищ, які супроводжують процес різання. Розроблена фізична модель дії сили тертя дозволить суттєво скоротити час, використаний на проектування нових ріжучих інструментів та розробку технологічних процесів обробки отворів.

Ключові слова: фізична модель, тертя, різання матеріалів, обробка отворів.

Marshuba V.P., Chernyakova O.V. «Physical model of process of friction at co-operation of instrumental and processed materials».

In this article the features of construction of physical model of process of action of force of friction, which are based on the basis of existing, for today pictures, are examined of process of cutting of various materials. The action of force of friction is examined in the light of appearance, co-operation and influence, one on other the physical phenomena which accompany a cutting process. The developed physical model of action of force of friction will allow substantially to shorten time, utilized on planning of new toolpieces and development of technological processes of treatment of openings.

Key words: physical model, friction, cutting of materials, treatment of openings.

Стаття надійшла до редакції 7 травня 2010 р.