

Дворук В.І.,***Борак К.В.,******Добранський С.С.,***** Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна,** Житомирський агротехнічний коледж,
м. Житомир, Україна

E-mail: vidvoruk@gmail.com

**ПРИРОДА СИЛ ТЕРТЯ
ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
СТАЛІ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ**

УДК 621.891

Приведено результати експериментальних досліджень з використанням прямих феноменологічних та нефеноменологічних методів, які показали, що сила тертя та зносостійкість сталі при ковзанні по моноліту визначаються її опором розповсюдженню бокових тріщин на межі пластично деформованої зони пошкодженого поверхневого шару з недеформованим металом. Вказаний опір контролюється ступенем локалізації деформації в поверхневому шарі та його механічним станом.

Ключові слова: моноліт, сила тертя, абразивна зносостійкість, реологічний параметр, локалізація деформації.

Вступ

Абразивним називається механічне зношування матеріалу в результаті дії на його поверхню абразивів, що знаходяться у вільному або закріпленому стані. Залежно від характеру дії абразиву, ступеня його закріпленості, а також властивостей матеріалу, вказаний вид зношування виражається в реалізації ряду процесів: адгезії, пластичної деформації, дряпання та руйнування у різних сполученнях та співвідношеннях.

Якщо зношування відбувається за рахунок зв'язаних поміж собою абразивів відносно поверхні матеріалу (або навпаки), то його називають зношуванням закріпленим абразивом. Одним з його підвидів є зношування об моноліт – великі шматки гірської породи або абразивні круги, у яких абразиви міцно пов'язані один з одним за допомогою зв'язки.

В умовах ковзання по моноліту сили тертя визначаються роботою, що витрачається на подолання молекулярної та механічної взаємодії абразивів з поверхнею матеріалу. Молекулярна взаємодія обумовлена адгезією контактуючих тіл, механічна – пластичною деформацією, дряпанням та руйнуванням поверхні. Формування сил тертя контролюється тією з вказаних взаємодій, що відіграє провідну роль в зоні контакту.

Так, наприклад, при зношуванні об моноліт технічно чистого заліза взаємодія проявляється в сполученні адгезійної та механічної складових, серед яких провідна роль належить механічній складовій, обумовленій дряпанням поверхні абразивом [1].

Дряпання – типовий абразивний процес, в результаті якого по краях подряпин та попереду абразивів, що рухаються уздовж поверхні утворюються навали матеріалу, частина об'єму яких перетворюється на продукти зносу та відокремлюються від неї. Таким чином, процес дряпання пов'язаний з процесами пластичної деформації та руйнування матеріалу [2].

Руйнування при зношуванні об моноліт відбувається внаслідок зминання та зрізування абразивом мікрооб'ємів матеріалу, утворення мікростружки, сколювання та зминання поверхневих шарів.

Товщина пластично деформованого шару, площа його перерізу і площа перерізу мікростружки при абразивному зношуванні значною мірою залежать від режиму тертя (швидкість ковзання, нормальний тиск).

Під час зношування сила абразивного тертя змінюється плавно і залежить від товщини “активного” (пластично деформованого та зруйнованого) шару. За мінімальної її величини сила тертя – найменша, збільшення товщини шару тягне за собою плавне зростання сили тертя.

Зміна швидкості ковзання та нормального тиску при терті по – різному впливають на товщину “активного” шару, а, отже, силу абразивного тертя. Збільшення швидкості ковзання зазвичай зменшує товщину шару, збільшення нормального тиску – збільшує товщину цього шару. Виходячи з цього запропоновано [3] теоретичні криві залежностей сили тертя при абразивному зношуванні від швидкості ковзання та нормального тиску, які повністю відповідають результатам експериментального дослідження сталі.

Встановлено [4], що відношення сили тертя до маси зруйнованого шару величина стала для даного матеріалу і не залежить від виду абразиву. Отже, можна очікувати, навантажувально-швидкісні криві зносу сталі за своєю формою та характером повинні мати схожість з відповідними кривими сили тертя.

Дійсно, поміж абразивним зносом та нормальним навантаженням сталі за сталості інших факторів встановлено [3] пряму пропорційну залежність. За аналогією з силою тертя (див. вище) фізичною причиною такого вигляду цієї залежності може бути закономірне збільшення товщини “активного” шару по мірі зростання нормального тиску при зношуванні.

Стосовно фактору швидкості існує точка зору [5] щодо незначущості його впливу на абразивний знос сталі, хоча, при цьому, констатовано необхідність подальшого вивчення цього питання.

Таким чином, закономірності впливу зовнішніх механічних дій на зносостійкість сталі визначаються, головним чином, її опором пластичній деформації та руйнуванню.

Експериментальні результати, що викладені вище, отримано, головним чином, в дослідях феноменологічного типу, коли вимірювався взаємозв'язок зовнішніх макроскопічних характеристик: сили тертя, зносу, нормального навантаження, швидкості ковзання.

Подальше поглиблення досліджень в області абразивного зношування потребує залучення феноменологічних прямих методів. Мова йде про такі методи, що здатні давати достатньо пряму інформацію про локальні міцнісні та пластичні властивості металу поблизу вершин тріщин, зародження та розповсюдження яких визначають кінетику абразивного зношування. Зрозуміло, що володіючи результатами застосування прямих методів і, співставляючи їх з феноменологічними даними, можна буде будувати детальнішу та однозначнішу картину зношування.

Постановка проблеми

Метою даної статті є вивчення природи сил тертя та закономірностей зносостійкості сталі в умовах зношування при терті об моноліт з використанням прямих методів дослідження.

Методичне забезпечення дослідження

Об'єктом дослідження була вуглецева інструментальна сталь У12А, хімічний склад якої наведено в табл. 1

Таблиця 1

Марка сталі	Хімічний склад досліджуваної сталі							
	Вміст, %							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
У12А	1,2	0,23	0,25	0,018	0,025	0,20	0,20	0,20

Зразки досліджуваної сталі піддавали термічній обробці (гартування та відпуск) для отримання мартенситної структури (табл. 2)

Таблиця 2

Марка сталі	Режим термічної обробки досліджуваної сталі			
	Гартування		Відпуск	
	температура нагрівання, К	охолоджувальне середовище	температура нагрівання, К	тривалість витримання, год
У12А	1053	Вода	393	0,5

Визначення сили тертя та зносостійкості проводили на модернізованій трибометричній машині 2070 СМТ – 1 [6].

Випробування проводились при сухому терті абразивної колодки об циліндричну поверхню обертового зразка діаметру $d = 50$ мм. Абразивні колодки виготовляли з шліфувального круга 24А40^hС2 ГОСТ 2224 – 83. Матеріал абразиву – електрокорунд білий.

Вивчались залежності зміни сили тертя та абразивного зносу від зміни швидкості відносного переміщення поверхонь та зміни навантаження при терті. Швидкість ковзання змінювали в межах $V = 0,5 - 1,5$ м/с, а навантаження – $P = 5 - 15$ Н.

Із залученням результатів трибологічних випробувань за методиками [7] визначали реологічні характеристики сталі – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} , розмір зони пластично деформованого металу h_n та реологічний параметр $R = K_{Ic} / h_n^{1/2}$ які дають пряму інформацію щодо локальних властивостей і напруженого стану сталі поблизу вершини тріщини.

Знос вимірювали методом зважування на електронних терезах “Nagema” (ціна поділлки 0,001 г).

Результати вимірювання трибо- та реологічних характеристик сталі піддавали обробці методами математичної статистики.

Результати дослідження та їх аналіз

Отримані результати проведеного дослідження представлено на рис. 1 - 3. Аналіз їх показав таке.

Зміни основних параметрів зовнішніх дій – швидкості ковзання і навантаження при терті по різному впливають на величину сили тертя та зносу сталі. Збільшення швидкості ковзання, зазвичай, нелінійно зменшує силу тертя та знос (рис. 1, а, 2, а); збільшення навантаження майже лінійно збільшує силу тертя та знос (рис. 1, б, 2, б).

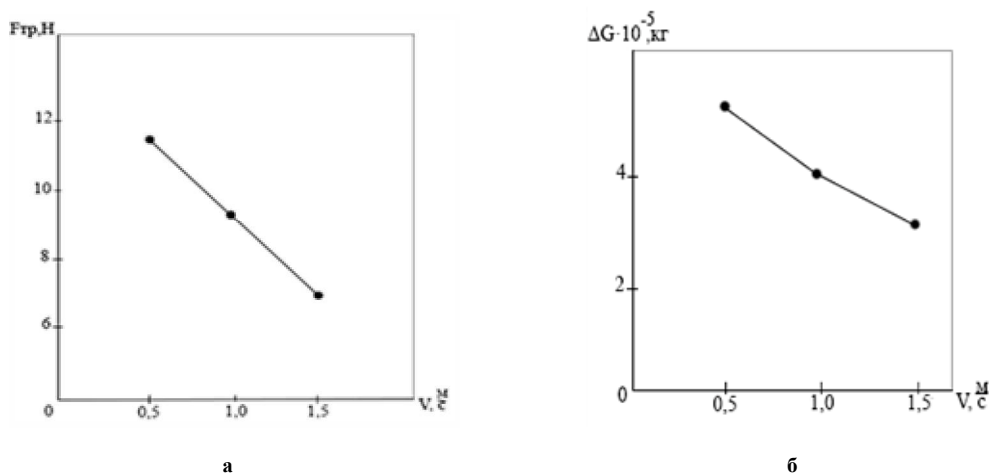


Рис. 1 – Зміна сили тертя при абразивному зношуванні сталі:
а – залежно від швидкості ковзання;
б – залежно від навантаження

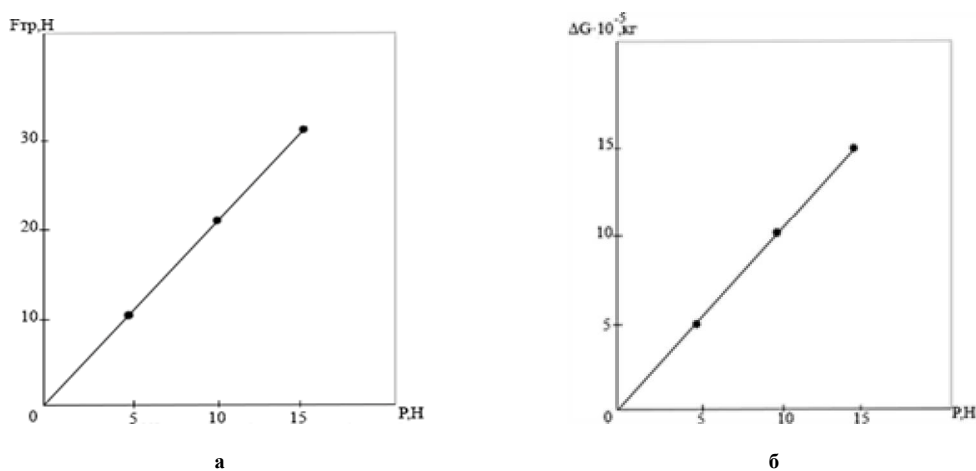


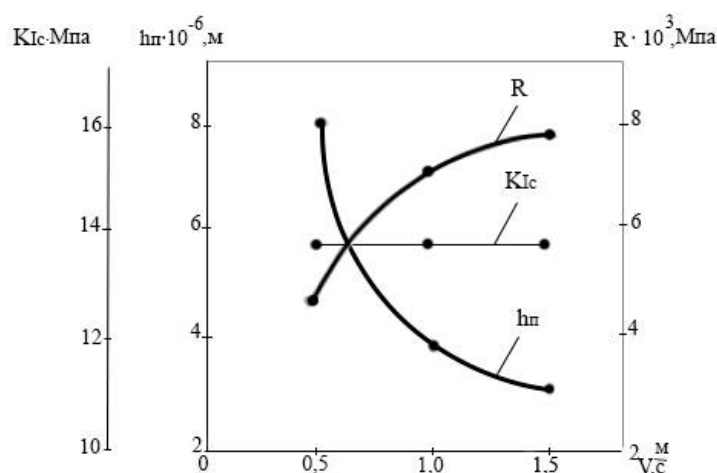
Рис. 2 – Зміна зносу сталі тертя при абразивному зношуванні сталі:
а – залежно від швидкості ковзання;
б – залежно від навантаження

Оскільки, як зазначалось вище, в контактній взаємодії залізвуглецевих сплавів з абразивом провідну роль відіграє механічна складова сили тертя, що обумовлена процесом дряпання, то силу тертя можна розглядати як рівнодійну сил тангенціальних опорів, які виникають на подряпинах при ковзанні абразиву поверхнею металу. Дряпання пов'язане з пластичною деформацією та руйнуванням останнього. Тому сила тертя при абразивному зношуванні визначається роботою, яка витрачається на пластичне деформування та руйнування абразивом малих об'ємів металу на третьовій поверхні.

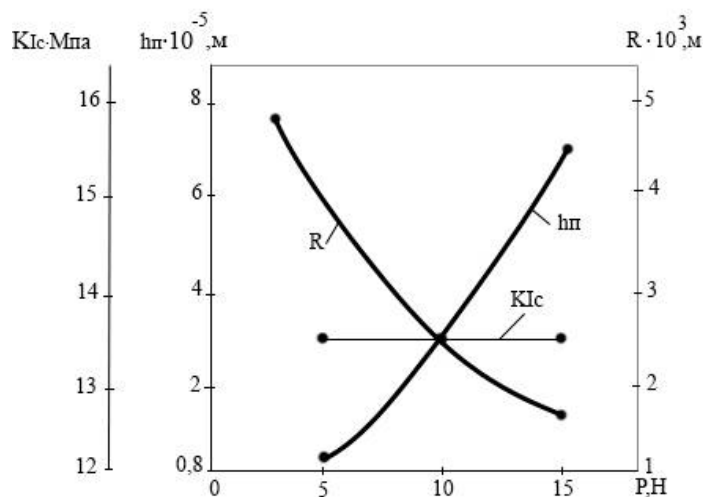
Абразивний знос представляє собою рівнодійну мікропроцесів руйнування абразивом третьової поверхні металу, яким супроводжують процеси мікропластичної деформації. Кожний окремий мікропроцес руйнування під дією одиночного абразиву розвивається у два етапи – зародження та розвитку мікротріщини [8]. Цей факт є визначальним в утворенні двох якісно різних зон в металі, що руйнується: зони

пластичної деформації в околі вершини мікротріщини та зони зруйнованого металу. В умовах зношування при терті об моноліт модель пошкодженого шару металу можна уявити у вигляді двох шарів. Перший шар – зовнішній (тріщинуватий) містить в собі найбільші порушення у вигляді мікротріщин або осередків їх зародження, тобто зв'язок поміж окремими його мікрооб'єктами послаблений через порушення суцільності металу. Тому для цієї зони, вочевидь, не можуть бути застосовані закони механіки суцільних середовищ. Адекватнішим уявляється залучення законів механіки контактного руйнування [9]. Зважаючи на власну “несуцільність” цей шар володітиме найменшою міцністю, що сприятиме формуванню в ньому частинок зносу. Оскільки умова розповсюдження тріщини – це наявність в околі її вершини пластично деформованої зони за високої концентрації в ній напружень та деформацій, то до першого тріщинуватого шару повинен безпосередньо примикати другий шар, який представляє собою пластично деформовану зону, що безпосередньо переходить у вихідний недеформований метал. Останній представляє собою сукупність смуг та ліній ковзання, скидання двійників, а також рідкісних мікротріщин.

Очевидно, що режим навантаження трибо системи моноліт – сталь впливатиме на формування і властивості вказаних шарів, глибину їх розповсюдження, а, отже, зносостійкість сталі.



а



б

Рис. 3 – Зміна в'язкості руйнування K_{Ic} , товщини пластично деформованого шару h_n , реологічного параметру R сталі при абразивному зношуванні:
а – залежно від швидкості ковзання;
б – залежно від навантаження

Реологічний аналіз стану поверхневого шару сталі при терті ковзання по моноліту, проведений в даній роботі показує (рис. 3), що зі збільшенням швидкості ковзання величина її в'язкості руйнування K_{Ic} залишається незмінною, в той час як розміру пластичної зони h_n – закономірно зменшується

(рис. 3, а). За такого співвідношення зміни вказаних характеристик реологічний параметр R сталі збільшується.

Зі збільшенням навантаження в'язкість руйнування K_{lc} також не змінюється, але розмір пластичної зони h_n при цьому зростає (рис. 3, б). Тому реологічний параметр R відповідно зменшується.

Отже, при змінах швидкості ковзання та навантаження в умовах зношування сталі по моноліту реологічний параметр R , що характеризує опір розповсюдженню бокових тріщин на межі пластично деформованої зони з недеформованим металом, контролюється ступенем локалізації деформації в поверхневому шарі та його механічним станом.

Результати співставлення величини реологічного параметру R з величинами сили тертя F_m та зносу ΔG при змінах швидкості V (рис. 1,а, 2,а, 3,а), а також навантаження P (рис. 1,б, 2,б, 3,б) свідчать про наявність такого корелятивного зв'язку поміж ними: чим вище реологічний параметр тим менше сила абразивного тертя та знос сталі.

Отже, сила тертя та зносостійкість сталі при терті ковзання по моноліту визначається її опором розповсюдженню бокових тріщин на межі зони пластично деформованого металу з недеформованим.

Висновки

1. Запропоновано модель пошкодженого шару сталі при зношуванні тертям об моноліт як системи, що складається з двох зон: зовнішньої – тріщинуватої та пластично деформованої, яка безпосередньо примикає до нього. Така модель визначається кінетикою процесу руйнування у два етапи – зародження та розвитку мікротріщин.

2. Встановлено, що при зміні режиму навантаження в умовах зношування по моноліту опір розповсюдженню бокових тріщин на межі пластично деформованої зони з недеформованою контролюється ступенем локалізації деформації в пошкодженому шарі та його напруженим станом.

3. Встановлено, що сила тертя та зносостійкість сталі при терті ковзання по моноліту визначається її опором розповсюдженню бокових тріщин на межі пластично деформованої зони з недеформованим металом.

Література

1. Трибофізика: Підручник / В.І.Дворук, В.А.Войтов. – Харків: [б.в], 2014. – 374с.
2. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В.Н.Кашеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 213с. – Библиогр.: С.210-212.
3. Костецкий Б.И. Износостойкость деталей машин / Б.И.Костецкий. – К.: Укр. отд. Машгиз, 1950. – 168с. – Библиогр.: С.166 – 167.
4. Кузнецов В.Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов. Избранные труды / В.Д.Кузнецов. – М.: Наука, 1977. – 310с.
5. Хрущов М.М. Исследование изнашивания металлов / М.М.Хрущов, М.А.Бабичев. – М.: АН СССР, 1960. – 352с. – Библиогр.: С.337 – 342.
6. Дворук В.І., Клімін В.В., Пасічник В.О., Тісов О.В. Модернізована трибометрична машина 2070 СМТ – 1 // Проблеми тертя та зношування: зб. наук праць. – К., 2007. – Вип.51. – С.33 – 37.
7. Дворук В.И. Научные основы повышения абразивной износостойкости деталей машин / В.И.Дворук. – К.: КМУГА, 1007. 101с. – Библиогр.: С.96 – 99.
8. Маклинток Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Маклинток, А.Аргон. – М.: Мир, 1970. – 460с. – Библиогр.: С.457 – 459.
9. Колесников Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В.Колесников, Е.М.Морозов. – М.: Наука, 1989. – 224с. – Библиогр.: С.183 – 219.

Поступила в редакцію 23.11.2015

Dvoruk V.I., Borak K.V., Dobransky S.S. **Nature forces and friction laws to wear resistance steel abrasive wear.**

The results of experimental studies using direct phenomenological methods have shown that friction and wear resistance when sliding on steel monolith defined by its resistance to lateral spread cracks on the verge of plastically deformed zone of the damaged surface layer of deformed metal. Said resistance is controlled by the degree of localization of deformation in the surface layer and its mechanical condition.

Keywords: monolith, friction, abrasive wear resistance, rheological parameters, localization of deformation.

References

1. Tribofizika: Pidruchnik. V.I.Dvoruk, V.A.Vojtov. Harkiv [b.v], 2014. 374s.
2. Kasheev V.N. Processy v zone frikcionnogo kontakta metallov. M. Mashinostroenie, 1978. 213s. Bibliogr.: S.210 - 212.
3. Kosteckij B.I. Iznosostojkost' detalej mashin. K. Ukr. otd. Mashgiz, 1950. 168s. – Bibliogr.: S. 166 – 167.
4. Kuznecov V.D. Fizika rezanija i trenija metallov i kristal lov. Izbrannye trudy. M. Nauka, 1977. 310 s.
5. Hrushhov M.M., Babichev M.A. Issledovanie iznashivaniya metallov. M. AN SSSR, 1960. 352s. Bibliogr. S.337 – 342.
6. Dvoruk V.I., Klimin V.V., Pasichnik V.O., Tisov O.V. Modernizovana tribometrichna mashina 2070 SMT – 1. Problemi tertja ta znoshuvannja: zb. nauk prac'. K., 2007. Vip.51. S.33 – 37.
7. Dvoruk V.I. Nauchnye osnovy povyshenija abrazivnoj iznosostojkosti detalej mashin. K. KMUGA, 1007. 101s. Bibliogr. S.96 – 99.
8. Maklintok F., ArgonA. Deformacija i razrushenie materialov. M. Mir, 1970. 460s. Bibliogr. S.457 – 459.
9. Kolesnikov Ju.V., MorozovE.M. Mehanika kontaktnogo razrushenija. M. Nauka, 1989. 224s. Bibliogr. S.183 – 219.