

Установа адукацыі  
«БЕЛАРУСКІ ДЗЯРЖАЎНЫ ТЭХНАЛАГІЧНЫ ЎНІВЕРСІТЭТ»

П. Я. Ваўцяховіч, Д. Ю. Мыцько

# ТРЭННЕ І ЗНОС

Вучэбна-метадычны дапаможнік для студэнтаў спецыяльнасці  
1-36 07 01 «Машыны і апараты хімічных вытворчасцей  
і прадпрыемстваў будаўнічых матэрыялаў».

Мінск 2024

УДК 620.178.162  
ББК 34.41я73  
В14

Разгледжаны і рэкамендаваны да выдання рэдакцыйна-выдавецкім саветам Беларускага дзяржаўнага тэхналагічнага ўніверсітэта.

**Р э ц е н з е н т ы :**

загадчык кафедры «Механізацыя і аўтаматызацыя дарожна-будаўнічага комплексу» Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта доктар тэхнічных навук, прафесар

*А. В. Вавілаў;*

кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры «Фізікахіміі матэрыялаў і вытворчых тэхналогій» Беларускага дзяржаўнага эканамічнага ўніверсітэта *М. П. Кахно*

**Вайцяховіч, П. Я.**

**В14** Трэнне і знос : вучэб.-метадыч. дапам. для студэнтаў спецыяльнасці 1-36 07 01 «Машыны і апараты хімічных вытворчасцей і прадпрыемстваў будаўнічых матэрыялаў» / П. Я. Вайцяховіч, Д. Ю. Мыцько. – Мінск : БДТУ, 2024. – 62 с.  
ISBN 978-985-897-158-8.

У вучэбна-метадычным дапаможніку апісаны розныя віды зносу, роля змазкі, тэмпературы, фрыкцыйнасці і антыфрыкцыйнасці матэрыялаў для дэталей спалучэнняў. Прыведзены разліковыя метады вызначэння інтэнсіўнасці зносу найбольш часта сустракаемых трыбаспалучэнняў.

Прызначаны для студэнтаў спецыяльнасці 1-36 07 01 «Машыны і апараты хімічных вытворчасцей і прадпрыемстваў будаўнічых матэрыялаў» (у адпаведнасці з перакадзіроўнымі табліцамі АКРБ 011-2022 код дадзенай спецыяльнасці 6-05-0714-04 «Тэхналагічныя машыны і абсталяванне»), а таксама з мэтай паглыблення ведаў можа быць цікавым для аспірантаў, навуковых і інжынерна-тэхнічных спецыялістаў у галіне трэння, зносу і змазкі ў машынах.

УДК 620.178.162  
ББК 34.41я73

**ISBN 978-985-897-158-8** © УА «Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт», 2024  
© Вайцяховіч П. Я., Мыцько Д. Ю., 2024

## ЗМЕСТ

ПРАДМОВА .....	5
УВОДЗІНЫ .....	7
1. ТРЭННЕ І ЯГО ЎПЛЫЎ НА РАБОТУ АБСТАЛЯВАННЯ .....	9
1.1. Тапаграфія паверхняў кантакту цвёрдых цел .....	9
1.1.1. Макра- і мікрагеаметрыя паверхняў .....	9
1.1.2. Фрыкцыйныя сувязі пры кантакце няроўнасцей .....	12
1.1.3. Плошча кантакту шурпатых паверхняў .....	14
1.2. Агульная характарыстыка працэсу трэння .....	15
1.2.1. Віды трэння .....	15
1.2.2. Мадэлі сухога трэння .....	16
1.2.3. Трэнне са змазкай .....	18
1.2.4. Вадкаснае трэнне .....	19
1.3. Уплыў розных фактараў на трэнне .....	22
1.3.1. Залежнасць каэфіцыента сухога трэння ад фізіка-механічных фактараў .....	22
1.3.2. Змяненне каэфіцыента трэння пры памежнай змазцы .....	23
1.4. Фрыкцыйныя, антыфрыкцыйныя і змазачныя матэрыялы .....	26
1.4.1. Асноўныя патрабаванні, прад'яўляемыя да фрыкцыйнасці і антыфрыкцыйнасці .....	26
1.4.2. Фрыкцыйныя матэрыялы .....	27
1.4.3. Антыфрыкцыйныя матэрыялы .....	28
1.4.4. Змазачныя матэрыялы .....	29
2. ЗНОС МАТЭРЫЯЛАЎ І ДЭТАЛЕЙ МАШЫН .....	31
2.1. Агульная характарыстыка зносу. Знос у трыбаспалучэннях .....	31
2.1.1. Сутнасць зносу і яго праяўленне .....	31

2.1.2. Інтэнсіўнасць зносу .....	33
2.1.3. Віды зносу.....	34
2.1.4. Стомленасны знос.....	35
2.2. Абразіўны знос .....	37
2.2.1. Агульная характарыстыка абразіўнага зносу .....	37
2.2.2. Падвіды абразіўнага зносу .....	39
2.2.3. Вызначэнне абразіўнага зносу.....	43
2.3. Ударна-абразіўны знос .....	45
2.3.1. Механізм ударна-абразіўнага зносу.....	45
2.3.2. Уплыў розных фактараў на ўдарна-абразіўны знос .....	48
2.3.3. Прагнаванне ўдарна-абразіўнага зносу .....	50
2.4. Спосабы павышэння зносаўстойлівасці .....	52
2.4.1. Канструкцыйныя спосабы.....	52
2.4.2. Тэхналагічныя спосабы .....	55
2.4.3. Эксплуатацыйныя спосабы.....	56
ЗАКЛЮЧЭННЕ .....	59
ЛІТАРАТУРА.....	60

## ПРАДМОВА

Трэнне як з'ява прысутнічае побач з чалавекам на працягу яго развіцця і існавання. Кемлівасць людзей дазволіла высветліць перавагі і недахопы гэтай з'явы і прыладкаваць яе ўласцінасці для павышэння свайго дабрабыту. Напрыклад, першы агонь быў штучна здабыты з дапамогай трэння, масіўныя блокі для будаўніцтва пірамід перамяшчаліся па пяску з паменшаным трэннем.

Важнасць уліку трэння ўзрасла пры актыўным развіцці тэхнікі і тэхналогіі. Значная частка энергіі, якая падводзіцца да тэхналагічных машын і абсталявання, затрачваецца на пераадоленне трэння. Гэта трэнне ў вузлах і дэталях механізмаў самой машыны і яе прывадных элементаў. Акрамя таго, у хутка рухальных машынах даволі шмат энергіі ідзе на пераадоленне супраціўлення руху апрацоўваемага асяроддзя.

У абодвух выпадках трэнне суправаджаецца абразіўным зносам вузлоў і дэталей абсталявання. Працэс зносу характарызуецца велічынёй страт металу і адначасова зніжэннем надзейнасці і даўгавечнасці машыны, скарачэннем іх тэрміну службы. У некаторых выпадках ён наогул можа прывесці да аварыйнай сітуацыі.

Па указанай вышэй прычыне інжынеры-механікі павінны ведаць сутнасць і прыроду такіх з'яў, як трэнне і знос. Яны абавязаны навучыцца ацэньваць уплыў розных фактараў на трэнне і знос розных дэталей і вузлоў машыны. Важным з'яўляецца і ўменне прагназаваць магчымы знос рабочых органаў, павелічэнне трэння яго прывадных элементаў. Ну і, канешне, веданне і магчымасць выкарыстання спосабаў барацьбы з разгледжанымі непажаданымі з'явамі з'яўляецца абавязковым кампанентам у падрыхтоўцы студэнтаў з кваліфікацыяй інжынера-механіка.

Менавіта на гэта скіравана дысцыпліна «Трэнне і знос». Прычым усе ўказаныя вышэй пытанні разглядаюцца на стадыях канструявання, вырабу і эксплуатацыі машын і абсталявання.

Мэта выкладання дысцыпліны – інжынерная падрыхтоўка студэнтаў па пытаннях трэння і зносу дэталей і вузлоў тэхналагічнага абсталявання.

Асноўная задача заключаецца ў атрыманні студэнтамі ведаў аб сутнасці і прыродзе трэння і зносу, уплыве на іх розных фактараў, а таксама ў авалоданні метадамі і алгарытмамі прагназавання гэтых шкодных з'яў і спосабамі барацьбы з імі.

Вывучэнне вучэбнай дысцыпліны «Трэнне і знос» заснавана на ведах і навыках, набытых пры авалоданні такімі дысцыплінамі, як фізіка, тэарэтычная механіка, механіка матэрыялаў і канструкцый, матэрыялазнаўства і тэхналогія канструкцыйных матэрыялаў.

Вынікі вывучэння дысцыпліны садзейнічаюць паспяховаму засваенню такіх дысцыплін, як «Дэталі машын», «Разлік і канструяванне машын і агрэгатаў», «Эксплуатацыя, рамонт і мантаж машын і абсталявання», «Дыягностыка і надзейнасць машын».

Вучэбна-метадычны дапаможнік па дысцыпліне «Трэнне і знос» складаецца з двух раўназначных раздзелаў, адпаведных яе назве.

Першы раздзел «Трэнне і яго ўплыў на работу абсталявання» ўключае такія тэмы, як «Тамаграфія паверхняў кантакту цвёрдых цел», «Віды трэння», «Уплыў на яго розных фактараў». Заканчваецца раздзел выбарам напрамкаў зніжэння трэння і выкарыстоўваемых для гэтага антыфрыкцыйных і змазачных матэрыялаў.

Другі раздзел з назвай «Знос матэрыялаў і дэталеў машын» прысвечаны аналізу ўзаемасувязі трэння і зносу, тут жа ўведзена паняцце інтэнсіўнасці зносу і ацэнены ўплыў шматлікіх фактараў на яе. Разгледжаны розныя віды зносу. Асноўная ўвага звернута на стомленае зношванне, а таксама на абразіўны і ўдарна-абразіўны знос, якія найбольш часта сустракаюцца ў хімічнай прамысловасці і вытворчасці будаўнічых матэрыялаў. Лагічным завяршэннем дадзенага раздзела з'яўляецца разгляд спосабаў павышэння зносаўстойлівасці, такіх як канструкцыйныя, тэхналагічныя і эксплуатацыйныя.

У цэлым лічым, што прапануемы вучэбна-метадычны дапаможнік будзе вельмі карысным для студэнтаў і зможа павысіць узровень іх падрыхтоўкі па пытаннях трэння і зносу.

## УВОДЗІНЫ

Трэнне – гэта ўзаемадзеянне паміж цвёрдымі цэламі альбо цвёрдымі цэламі і навакольным асяроддзем, якое суправаджаецца стратамі энергіі. Большая частка энергіі пераходзіць у цяпло. Увогуле, трэнне – шкодная з’ява.

Асноўныя недахопы трэння – страты энергіі і знос. Аднак ёсць напрамкі дадатнага выкарыстання трэння: тармазы, раменныя і фрыкцыйныя перадачы, шліфоўка, паліроўка і зварка трэннем за кошт вялікага выдзялення цеплавой энергіі.

Першым пачаў вывучаць трэнне Леанарда да Вінчы (1452–1519). Ён увёў паняцце каэфіцыента трэння як адносін сілы трэння да нармальнай нагрузкі:  $F_T = fF_n$  ці  $f = F_T / F_n$ . Далей вывучэннем трэння займаўся Г. Галілей, І. Ньютан, Ш. О. Кулон, Л. Эйлер, М. В. Ламаносаў. Сярод сучаснікаў можна назваць расійскіх навукоўцаў І. В. Крагельскага, Д. М. Гаркунова, А. В. Чычынадзэ, У. А. Беллага і А. І. Свірыдзёнка.

Усе даследаванні па трэнні аб’яднаны ў адну навуку – трыбалогію (ад грэч. *tribo* – цёрці). Дадзены тэрмін упершыню ўведзены ў 1966 г. П. Джостам (Англія), які і лічыцца заснавальнікам гэтага навуковага напрамку.

Звернемся зноў да непажаданых наступстваў, якімі суправаджаецца трэнне: бескарысныя затраты энергіі і знос вузлоў і дэталей машын.

*Страты энергіі.* Энергія (праца), выкананая ў адзінку часу, – гэта магутнасць  $N = A / t = Fs / t = Fv$ , дзе  $A$  – праца, Дж;  $t$  – час, гадз;  $F$  – рухальная сіла, Н;  $s$  – пройдзены шлях, м;  $v$  – хуткасць руху рабочага органа, км/гадз.

Рухальная сіла павінна быць большай, чым сіла супраціўлення:  $F \geq F_c$ , дзе  $F_c$  – сіла супраціўлення руху рабочага органа, Н.

У пераважным выпадку сілай супраціўлення з’яўляецца сіла трэння  $F_c = F_T$ . На пераадоленне трэння траціцца прыкладна 1/3–1/2 частка сусветных энергарэсурсаў.

Трэнне праяўляецца ў двух варыянтах: трэнне са знешнім асяроддзем і трэнне ў трыбаспалучэннях (восі, валы, падшыпнікі).

У якасці асяроддзя можа быць паветра, вадкасць, сыпкі матэрыял. Трэнне праяўляецца пры руху вадкасці ці суспензіі ў трубаправодзе, лопасцей змешвальніка ў сумесі, пры руху аўтамабіля. Дарэчы, пры руху аўтамабіля з павелічэннем хуткасці павялічваецца доля энергіі, якая затрачваецца на пераадоленне супраціўлення паветра. Так, пры  $v = 80$  км/гадз – гэта 50%; а пры  $v = 130$  км/гадз – 75%.

Пры трэнні аб асяроддзе ўся энергія расейваецца ў гэта ж асяроддзе. У другім варыянце (у трыбаспалучэннях) сутыкаюцца дзве паверхні, і трэнне ідзе, напрыклад, «метал па метале». У выніку выдзялення цеплавой энергіі дэталі пераграваюцца, павялічваюцца ў памерах, што можа прывесці да закліньвання і паломкі. Ну і, канешне, павялічваюцца трэнне і, адпаведна, затраты энергіі ў спалучэннях.

*Знос механізмаў машын.* Як і трэнне, ён праяўляецца ў тых жа двух выпадках: пры кантакце са знешнім асяроддзем і ў трыбаспалучэнні.

Пры кантакце з абразіўным асяроддзем (кварцавы пясок) не адбываецца парушэнне работы машыны ў цэлым. Зношваюцца толькі тыя часткі, якія непасрэдна кантактуюць з ім. Таму можна прадугледзець меры па зніжэнні ці прадухіленні зносу. Напрыклад, можна праз паўгода замяняць здрабняльныя целы (шары) у барабаным млыне. Гэта прагназуемы і відавочны знос (як хвароба знешніх органаў чалавека). Асноўная эканамічная праблема пры гэтым – страты каштоўных металаў, якія ў сусветным маштабе дасягаюць мільёнаў тон у год. Ну і, канешне, прастоі на час замены зношаных вузлоў.

Больш небяспечным з'яўляецца знос ў трыбаспалучэннях, дзе кантактуюць два металы. Ён невялікі па велічыні, але паступовы, нябачны (як хвароба ўнутраных органаў чалавека), парушае работу машыны ў цэлым. Яе эксплуатацыя становіцца нерацыянальнай і нават небяспечнай. Знешняе праяўленне такога зносу – вібрацыя, біццё, шум, якія ўзнікаюць з-за павелічэння зазораў. Да 90% машын выводзіцца з-за гэтага з эксплуатацыі. Капітальным рамонтам можна падоўжыць тэрмін службы машын. Але калі кошт рамонтаў перавышае пачатковую цану машыны, то гэта становіцца эканамічна нявыгадным. Вынік зносу ў трыбаспалучэннях – зніжэнне якасці прадукцыі, павелічэнне энергавыдаткаў. Так, аўтамабіль масай 2000 кг пры страце ў трыбаспалучэннях 1 кг металу не падлягае рамонту.



# 1. ТРЭННЕ І ЯГО ЎПЛЫЎ НА РАБОТУ АБСТАЛЯВАННЯ

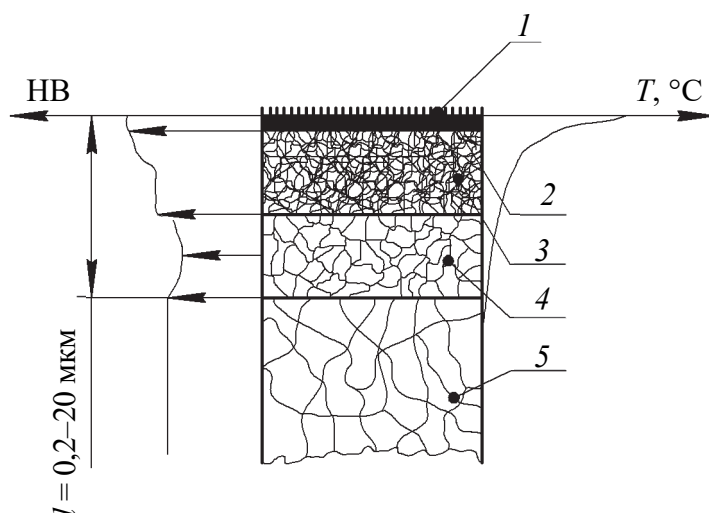
## 1.1. Тапаграфія паверхняў кантакту цвёрдых цел

Трэнне – гэта паверхневая з’ява. Таму яно істотна залежыць ад характарыстыкі кантактных паверхняў.

Тапаграфія (грэч. *topos* – месца) – вывучэнне мясцовасці і стварэнне карт. У нашым выпадку – гэта вывучэнне паверхняў кантакту.

### 1.1.1. Макра- і мікрагеаметрыя паверхняў

Тапаграфію паверхняў разгледзім на прыкладзе металаў. Усе яны маюць крышталёвую структуру. Спачатку вызначым, з чаго складаецца паверхневы пласт (рыс 1.1).



Рыс. 1.1. Паверхневы пласт метала:

- 1 – пласт плевак вільгаці, газаў, забруджвання (0,01–0,1 мкм);
- 2 – пласт аксідаў вялікай цвёрдасці; 3 – дэфармаваная крышталёвая рашотка ад механічнай апрацоўкі (наклёпу); 4 – парушаная крышталёвая рашотка з дэфектамі; 5 – метал зыходнай структуры

Макраадхіленні дэталей і іх паверхняў – гэта скажэнне (перакрыўленасць) геаметрычнай формы. На практыцы часцей за ўсё сустракаюцца адхіленні формы цыліндрычных паверхняў як па даўжыні, так і па папярэчым сячэнні (рыс. 1.2).

Яны ўзнікаюць на стадыях адліўкі, пракату, кавання (апрацоўкі ціскам).

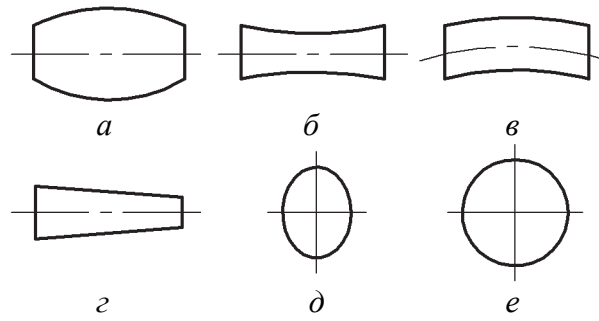


Рис. 1.2. Адхіленні форми цыліндрычных паверхняў:  
*a* – выпуклаць; *б* – седлападобнасць; *в* – увагнутасць; *г* – конуснасць;  
*д* – авальнасць; *е* – агранка

Мікрагеаметрыя і мікраадхіленні паверхняў дэталей ствараюцца часцей за ўсё пры іх механічнай апрацоўцы. Гэтыя адхіленні характарызуюцца хвалістасцю і шурпатасцю.

Хвалістасць – сукупнасць паўтаральных няроўнасцей вялікай даўжыні. Звычайна  $L / H = 50-100$ , дзе  $H$  – вышыня хвалі. Шурпатасць – сукупнасць няроўнасцей малой даўжыні ( $l = 2-800$  мкм) і вышыні ( $h = 0,025-320$  мкм), прычым толькі пры ўмове, што  $h / l \leq 50$  (рыс. 1.3).

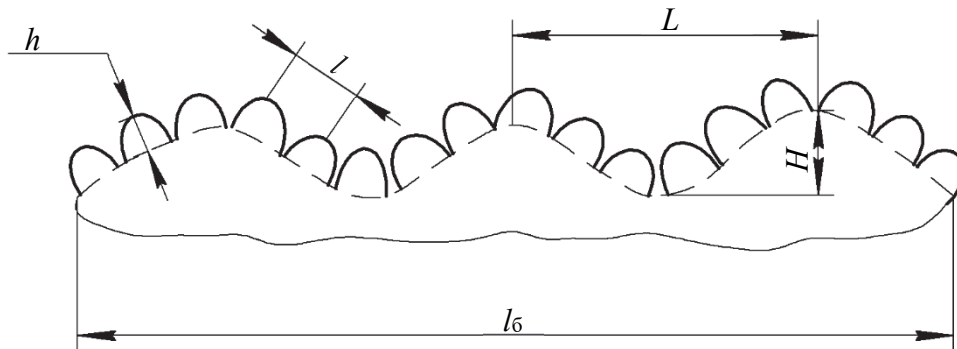


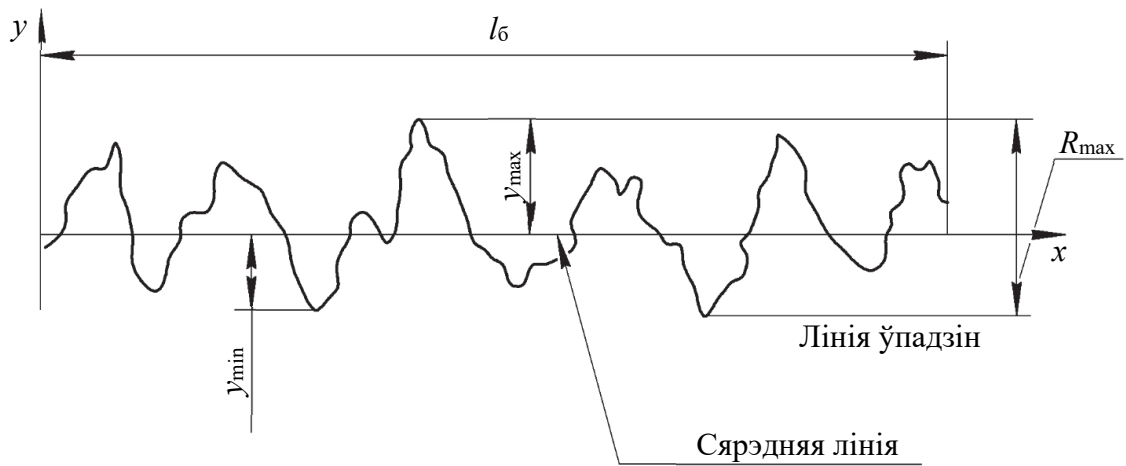
Рис. 1.3. Мікрагеаметрыя паверхні

Шурпатасць паверхні характарызуецца сярэднеарыфметычным адхіленнем  $R_a$  профілю ад сярэдняй лініі і вышынёй няроўнасцей  $R_z$ .

Для іх вызначэння будуецца прафілаграма. Для гэтага выкарыстоўваюцца пераважна шчупавы і аптычны метады. Прыборы, у якіх рэалізуюцца гэтыя метады, называюцца прафілометрамі ці прафілографамі (рыс 1.4).

Для вызначэння  $R_z$  на базавай даўжыні  $l_б$  знаходзяць па 5 значэнняў  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$  (рыс. 1.4):

$$R_z = \frac{1}{10} \left( \sum_1^5 |y_{\max}| + \sum_1^5 |y_{\min}| \right). \quad (1.1)$$



Рыс. 1.4. Прафілаграма паверхні

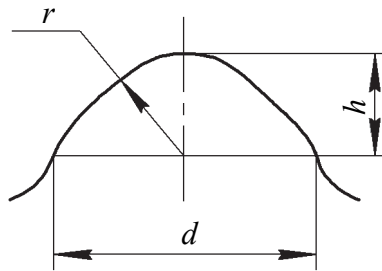
Сярэдняе арыфметычнае адхіленне разлічваецца па формуле

$$R_a = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n |y_i| \right). \quad (1.2)$$

Радыус крывізны няроўнасцей (рыс 1.5) вызначаецца наступным чынам:

$$r = \frac{d^2}{8h}; \quad h = 0,35R_a, \quad (1.3)$$

дзе  $d$  узятая па вышыні  $h$ .

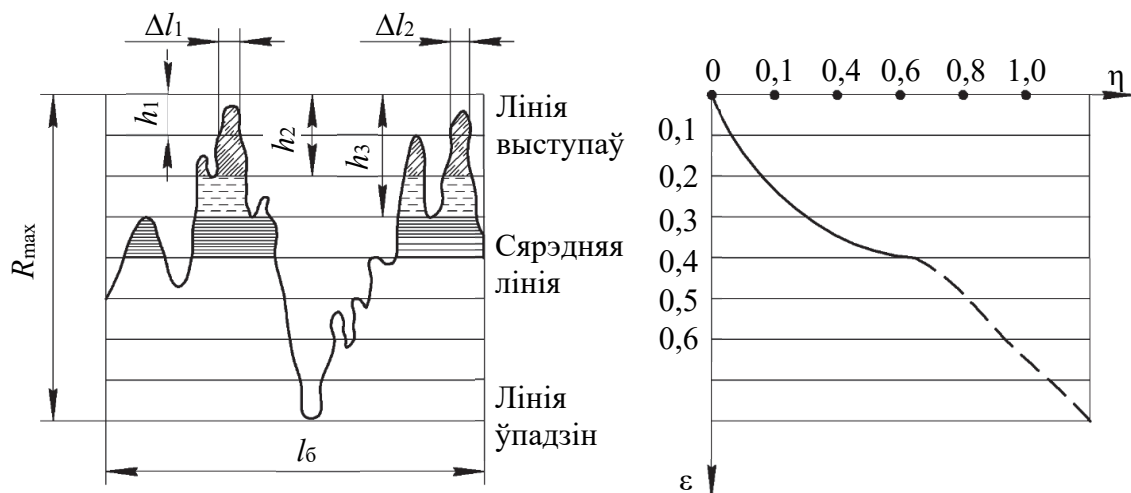


Рыс. 1.5. Радыус крывізны няроўнасці

Для разліку сілы трэння важнай характарыстыкай з'яўляецца крывая апорнай паверхні (рыс 1.6).

Для пабудовы гэтай крывой рассякаюць прафілаграму плоскасцямі  $j$  (1, 2, 3, ...,  $k$ ) звычайна праз роўныя прамежкі  $h_2 \approx 2h_1$  і г. д. Затым для кожнага  $j$ -га сячэння выбіраюць і падсумоўваюць адрэзкі  $l_i$  ( $l_1, l_2, \dots, l_n$ ):

$$l_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (1.4)$$



Рыс. 1.6. Крывая апорнай паверхні

Пасля гэтага знаходзяць адносную апорную даўжыню профілю:

$$\eta_j = \frac{l_{\Sigma j}}{l_6}, \quad (1.5)$$

дзе  $l_6$  – базавая даўжыня, м.

Разлічваюць адноснае збліжэнне:

$$\varepsilon_j = \frac{h_j}{R_{\max}}. \quad (1.6)$$

дзе  $R_{\max}$  – максімальнае адхіленне.

Атрыманыя значэнні адкладаюць на графіку  $\eta_j = f(\varepsilon_j)$ . Так паўтараюць для кожнага сячэння. Крывая апорнай паверхні апісваецца ступеннай залежнасцю.

$$\eta = b\varepsilon^\gamma, \quad (1.7)$$

дзе  $b = 0,5-3,5$ ;  $\gamma = 1,3-2,3$  – параметры, якія залежаць ад віду дэталей.

Мікрагеаметрыя можа быць характарызавана безразмерным комплексам шурпатасці:

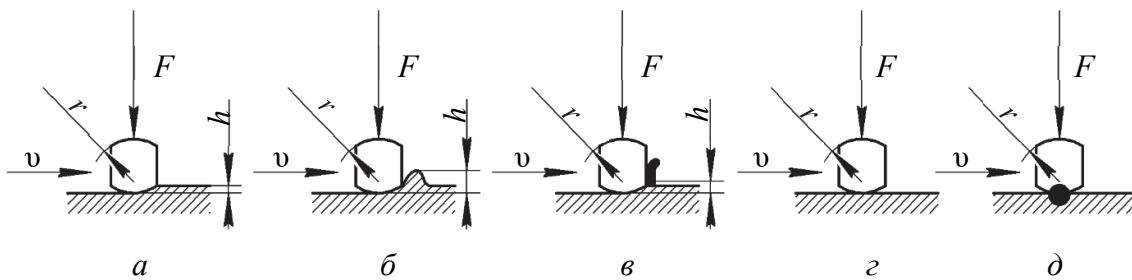
$$\Delta = \frac{R_{\max}}{z \cdot b^{1/\gamma}}. \quad (1.8)$$

### 1.1.2. Фрыкцыйныя сувязі пры кантакце няроўнасцей

Плямы кантакту, якія ўтвараюцца, існуюць і знікаюць пад уздзеяннем нармальных і датычных сіл, называюцца фрыкцыйнымі сувязямі. Іх характар залежыць ад геаметрычных, механічных, фізічных і хіміч-

ных фактараў. Усе пералічаныя фактары можна аб'яднаць адзіным безразмерным комплексам  $h / r$ .

Усяго існуе 5 відаў фрыкцыйных сувязей (рыс. 1.7).



Рыс. 1.7. Фрыкцыйныя сувязі:

- а* – пругкае адцісканне матэрыялу; *б* – пластычнае адцісканне;  
*в* – мікрарэзанне; *г* – адгезійнае парушэнне фрыкцыйнай сувязі;  
*д* – кагезійнае парушэнне фрыкцыйнай сувязі

1. Пры *пружкім адцісканні* матэрыялу няроўнасцю кантактныя напружанні не перавышаюць мяжы пругкасці. Гэты від сувязі назіраецца пры  $h / r \leq 0,01$  для сталей і  $h / r \leq 0,001$  для каляровых металаў.

2. *Пластычнае адцісканне* ўзнікае, калі напружанні дасягаюць велічыні  $\sigma_t$ , пры гэтым  $h / r \leq 0,5$ .

3. *Мікрарэзанне*, пры якім напружанні дасягаюць велічыні разбуральных ( $h / r \geq 0,5$ ). Гэта ўжо не фрыкцыйная сувязь, а чыста механічны працэс – рэзанне. Пераход ад пластычнага адціскання да рэзання ўзнікае пры ўмовах

$$\frac{h}{r} \geq \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{2\tau}{\sigma_t} \right), \quad (1.9)$$

дзе  $r$  – радыус, м;  $\tau$  – датычныя напружанні зрэзу адгезійных сувязей, Па;  $\sigma_t$  – мяжа цяжучасці, Па.

Мікрарэзанне – самы небяспечны працэс.

4. *Адгезія* – прыліпанне, счাপленне на ўзроўні малекул і атамаў разнародных цел. Адгезійнае парушэнне фрыкцыйных сувязей – гэта зліпанне плевак, якія пакрываюць паверхні цвёрдых цел і паскараюць іх разбурэнне. Яно магчыма, калі градыент  $d\tau / dh > 0$  – ніжэйшыя пласты матэрыялу больш трывалыя, чым паверхневыя.

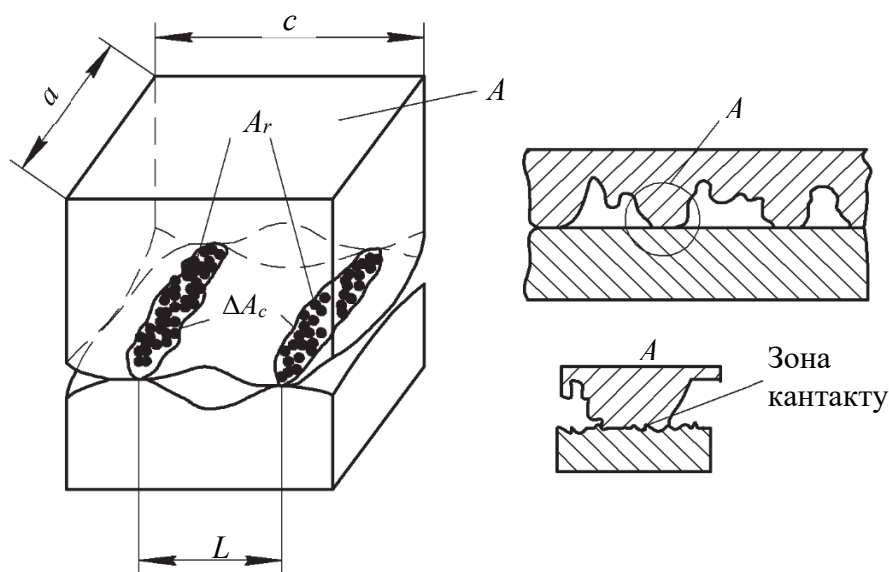
5. *Кагезія* – атамнае, малекулярнае счাপленне асобных частак аднаго і таго ж цела. Кагезійнае парушэнне фрыкцыйных сувязей адбываецца ўнутры матэрыялу з вырывам некаторага яго аб'ёму. Гэта магчыма, калі трываласць сувязі матэрыялу з няроўнасцю вышэй за трываласць асноўнага глыбіннага пласта, гэта значыць  $d\tau / dh > 0$  (адмоўны градыент).

Такім чынам, першыя тры віды фрыкцыйных сувязей – гэта механічныя, прычым трэці (мікрарэзанне) – найбольш непажаданы, а два апошнія – малекулярныя.

### 1.1.3. Плошча кантакту шурпатых паверхняў

Пры кантакце шурпатых паверхняў адрозніваюць намінальную  $A_a = ac$ , контурную  $A_c$  і фактычную  $A_r$  плошчы сутыкнення (рыс. 1.8).

У выніку хвалістасці паверхняў контур кантакту будзе ўзнікаць пераважна на вяршынях хваль.  $A_c \approx (0,05-0,15)A_a$ .



Рыс. 1.8. Контур кантакту паверхняў

Аднак унутры кожнага контуру існуюць фактычныя плямы кантакту з плошчай  $A_r$  пры сутыкненні мікранярэўнасцей, якія ўтвараюць шурпатую паверхню  $A_r = (0,01-0,1)A_a$ . Плямы фактычнага кантакту ўтвараюцца мікравыступамі ( $d_r = 10-20$  мкм).

З-за розных плошчаў разлічваюцца і розныя ціскі:

$$p_r = \frac{F_n}{A_r} - \text{фактычны; } p_c = \frac{F_n}{A_c} - \text{контурны; } p_a = \frac{F_n}{A_a} - \text{намінальны. (1.10)}$$

Ад плошчы  $A_r$  залежыць трэнне і знос, электра- і цеплаправоднасць, хімічная карозія і трываласць прэсавых злучэнняў (пасадак).

Экспераментальна ўстаноўлена, што ў выпадку пластычнай дэфармацыі сферычнай часцінкі  $p = 3\sigma_T = \text{НВ}$  (цвёрдасць па Брынэлю), пры гэтым

$$A_r = \frac{F_n}{\text{НВ}}. \quad (1.11)$$

Пры пругкім кантакце асобнай сферычнай няроўнасці з плоскай паверхняй плошча фактычнага кантакту згодна з тэорыяй Герца

$$A_r = 2,82 \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} (rF_n)^{\frac{2}{3}}. \quad (1.12)$$

Збліжэнне цел пры гэтым

$$a = 0,82 \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{\frac{2}{3}} \left( r^{-\frac{1}{3}} \right) \left( F_n^{\frac{2}{3}} \right). \quad (1.13)$$

## 1.2. Агульная характарыстыка працэсу трэння

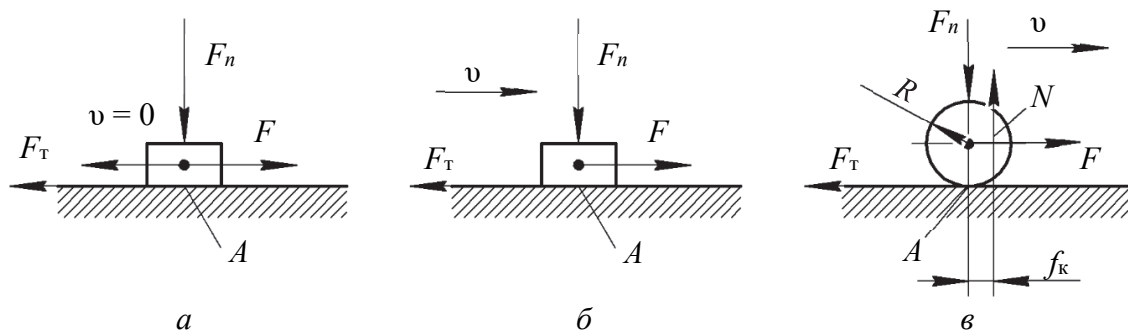
### 1.2.1. Віды трэння

Трэнне – гэта паверхневая з’ява. Важным фактарам для трэння з’яўляецца адрозненне паміж трываласцю адгезійных сувязей (АС) і трываласцю глыбінных пластоў матэрыялу.

Калі АС менш трывалыя, то градыент  $d\tau / dh > 0$  і працэс трэння сканцэнтраваны ў знешніх пластах. Пры гэтым трэнне называецца знешнім.

Калі  $d\tau / dh < 0$  (АС на паверхні больш трывалыя, чым у глыбінных пластах), то разбурэнне сувязей будзе адбывацца на большай глыбіні. У дэфармацыю будуць уцягнуты вялікія аб’ёмы цел. Трэнне пры гэтым называецца ўнутраным (трэнне вадкасці аб цвёрдае цела з эфектам прыліпання – вязкасць).

Знешняе трэнне па кінематычнай прыкмеце падзяляецца на трэнне спакою, слізгацення і качэння (рыс. 1.9, а, б, в адпаведна).



Рыс. 1.9. Знешняе трэнне:  
а – трэнне спакою; б – трэнне слізгацення; в – трэнне качэння

Для першых двух:

$$F_t = fF_n; F_n = N, \quad (1.14)$$

дзе  $f$  – каэфіцыент трэння слізгацця;  $N$  – сіла нармальнай рэакцыі апоры, Н.

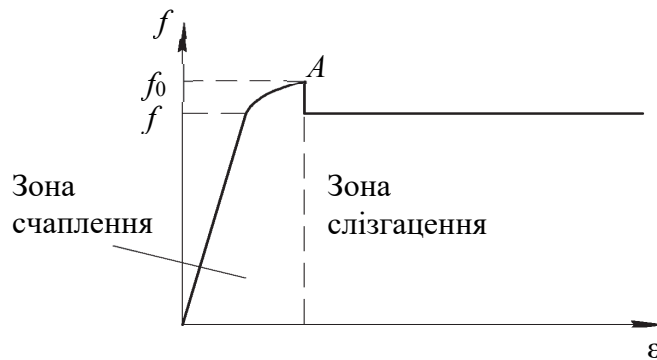
Для качэння:

$$\sum M_A = 0; M_p = M_c; \quad (1.15)$$

$$FR = Nf_k; f_k = \frac{FR}{N}; f_k \leq f, \quad (1.16)$$

дзе  $M_A$  – момант адносна кропкі  $A$ ;  $FR$  – момант вярчэння;  $f_k$  – каэфіцыент трэння качэння (шырыня дэфармаванай пляцоўкі), м.

У сваю чаргу, трэнне спакою  $f_0 > f$  (рыс. 1.10).



Рыс. 1.10. Залежнасць змянення каэфіцыента трэння

Знешняе трэнне можа быць сухое і з памежнай змазкай. Пры трэнні з памежнай змазкай паверхні прыціскаемых цел падзелены пластам змазачнага матэрыялу таўшчынёй ад адной малекулы да 0,1 мкм, у выніку чаго сілы трэння зніжаюцца ў 2–10 разоў.

Унутранае трэнне часцей за ўсё выключна вадкаснае.

### 1.2.2. Мадэлі сухога трэння

Гэтыя мадэлі заснаваныя на малекулярна-механічнай тэорыі, распрацаванай І. В. Крагельскім, Ф. П. Боўдэнам, Д. Тэйбарам і інш. Яна грунтуецца на тым, што з-за хвалістасці і шурпатасці паверхняў кантакт паміж імі заўсёды дыскрэтны, адбываецца па асобных плямах. Меха-нічнае ўзаемадзеянне абумоўлена ўзаемным укараненнем асобных пунктаў дотыку. Адна паверхня ўкараняецца ў другую яшчэ і за кошт дэфармацыі, якая ўзнікае ад дзеяння нагрузкі.

Малекулярнае ўзаемадзеянне абумоўлена ўзаемным прыцягнен-нем малекул і атамаў двух цел.



Таму сумарная сіла трэння

$$F_T = F_{TM} + F_{TD}; \quad f = f_M + f_D, \quad (1.17)$$

дзе  $F_{TM}$ ,  $F_{TD}$  – малекулярная і дэфармацыйная складальныя сілы трэння;  $f$  – агульны каэфіцыент трэння;  $f_M$ ,  $f_D$  – малекулярная і дэфармацыйная складальныя каэфіцыента трэння. Для вызначэння складальных разгледзім кожную з іх паасобку.

*Малекулярная складальная.* Аналіз разрыву малекулярных сувязей дазволіў атрымаць разліковую залежнасць для тангенцыяльных напружанняў:

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (1.18)$$

дзе  $\tau_0$  – напружанне зрэзу малекулярнай сувязі без прыкладання нармальнай нагрукі, Па;  $\beta$  – каэфіцыент павелічэння малекулярнай сувязі пад уздзеяннем нармальнай нагрукі  $F_n$ ;  $p_r$  – ціск на плошчы фактычнага кантакту, Па.

Падзяляючы левую і правую часткі на  $p_r$ , атрымаем:

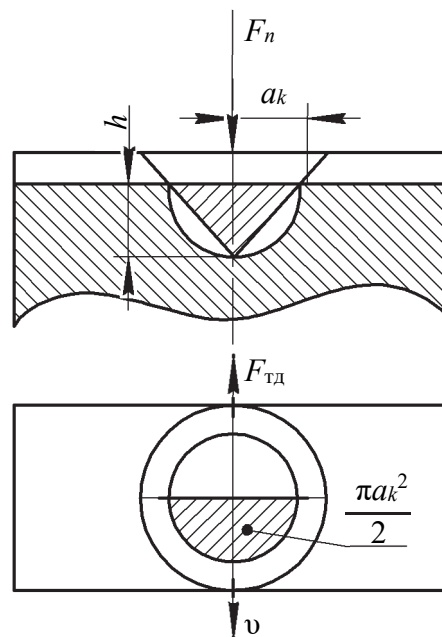
$$f_M = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta, \quad (1.19)$$

дзе  $\tau_0 = 0,2\text{--}30$  МПа,  $\beta = 0,02\text{--}0,15$ .

*Дэфармацыйная складальная.* Прымем, што плошча сячэння, якая перпендыкулярная напрамку руху няроўнасці, будзе роўна плошчы трохвугольніка са старанамі  $h$  і  $2a_k$  (рыс 1.11). Тады

$$A = ha_k, \quad (1.20)$$

дзе  $h$  – паглыбленне;  $a_k$  – радыус плямы.



Рыс. 1.11. Дыфармацыя паверхні

Пры пластычнай дэфармацыі напружанні роўныя  $\sigma_t$ . Пры гэтым

$$F_n = \frac{\pi a_k^2 \sigma_n}{2}, \quad (1.21)$$

дзе  $\sigma_n$  – напружанне, перпендыкулярнае да напрамку руху, МПа.

Тады пры ўмове  $\sigma_n \approx \sigma_t$  атрымаем

$$f_d = \frac{F_{тд}}{F_n} = \frac{2h}{\pi a_k}. \quad (1.22)$$

Радыус сегмента

$$a_k = \sqrt{2hr}; \quad f_d = \frac{2h}{\pi\sqrt{2hr}} \approx 0,5\sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (1.23)$$

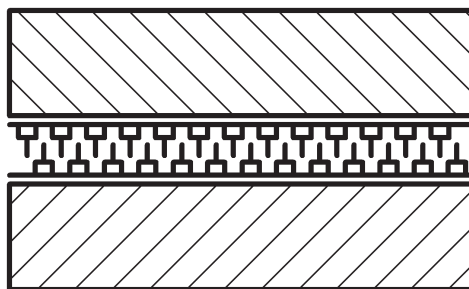
І. В. Крагельскі прапанаваў пры пластычным кантакце замест  $p_r$  выкарыстоўваць велічыню НВ. Тады сумарны каэфіцыент трэння

$$f = \frac{\tau_0}{НВ} + \beta + 0,5\sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (1.24)$$

### 1.2.3. Трэне са змазкай

Гэта так званае трэнне з памежнай змазкай. Усе змазачныя матэрыялы добра адсарбіруюцца на металічнай паверхні. Паверхні пакрываюцца вельмі тонкім пластам  $\delta \leq 0,1$  мкм. Гэтыя пласты вельмі трывала звязаны з металічнай паверхняй сіламі малекулярнага ўзаемадзеяння.

Малекулы змазачнага матэрыялу напраўлены перпендыкулярна да цвёрдай паверхні, што дазваляе ўявіць ідэальную памежную плёўку ў выглядзе ворсу (рыс. 1.12).

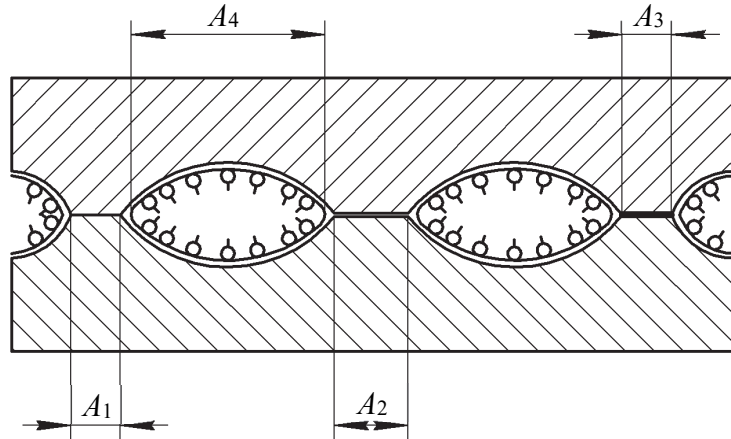


Рыс. 1.12. Малекулярныя сувязі

Энергія сувязі паміж элементамі ўнутры малекул значна вышэйшая, чым паміж хвастамі. Таму па нармалі да цвёрдай паверхні плёўка змазкі мае высокае супраціўленне сціскання. Пры тангенцыяльным перамяш-

чэнні варсінкі кантактуючых паверхняў згінаюцца ў процілеглыя бакі і лёгка слізгаюцца адна па другой.

Канешне, рэальны кантакт пласта змазкі значна складаней з-за шурпатасці, хвалістасці (рыс. 1.13).



Рыс. 1.13. Кантакт паверхняў са змазкай:

$A_1$  – механічны кантакт;  $A_2$  – монамалекулярны пласт;  $A_3$  – кантакт аксідаў;  
 $A_4$  – полімалекулярны кантакт

Такім чынам, супраціўленне руху пры слізгаценні складаецца з супраціўлення зруху вадкаснага памежнага пласта змазкі ( $A_2$ ;  $A_4$ ) і мікрарэзанання кантактуючымі металічнымі паверхнямі ( $A_1$ ).

З-за гэтага можа адбыцца разбурэнне змазачнай плёўкі. Але ў далейшым, дзякуючы добрай адсорбцыі, такія металічныя ўчасткі зноў пакрываюцца змазкай, «залечваюцца». Трэнне ў любым выпадку лічыцца знешнім.

Сіла трэння і каэфіцыент трэння пры наяўнасці памежнай змазкі залежаць ад уласцівасцей змазачнага матэрыялу, кантактуючых паверхняў і тэмпературы.

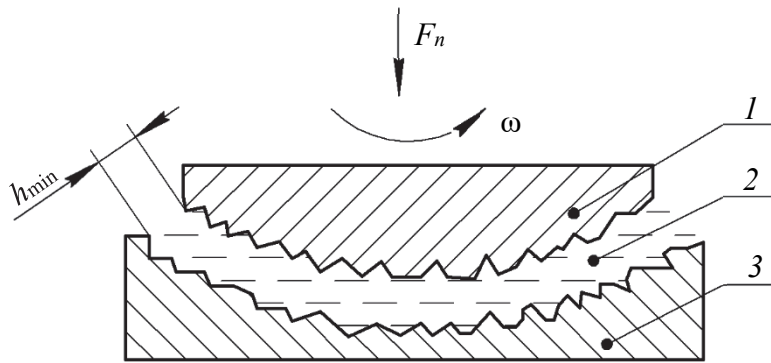
#### 1.2.4. Вадкаснае трэнне

Вадкаснае трэнне характарызуецца тым, што паверхні трэння раздзелены пластам вадкай змазкі, які цалкам успрымае нармальную нагрузку. Менавіта не металічная паверхня, а вадкасць.

Мінімальная таўшчыня пласта павінна перавышаць сумарную вышыню няроўнасцей абедзвюх паверхняў (рыс. 1.14).

$$h_{\min} > (R_{z1} + R_{z2}). \quad (1.25)$$

Вадкаснае трэнне выключна ўнутранае. У ім знешняе трэнне цвёрдых цел замяняецца ўнутраным трэннем пластоў вадкасці.



Рыс. 1.14. Вадкаснае трэнне:  
 1 – вал; 2 – падшыпнік; 3 – пласт змазкі

Асноўныя адрозненні ўнутранага трэння заключаюцца ў наступным:  
 – зона дэфармацыі ўзнікае не ў тонкім паверхневым пласце, а па ўсім аб’ёме.

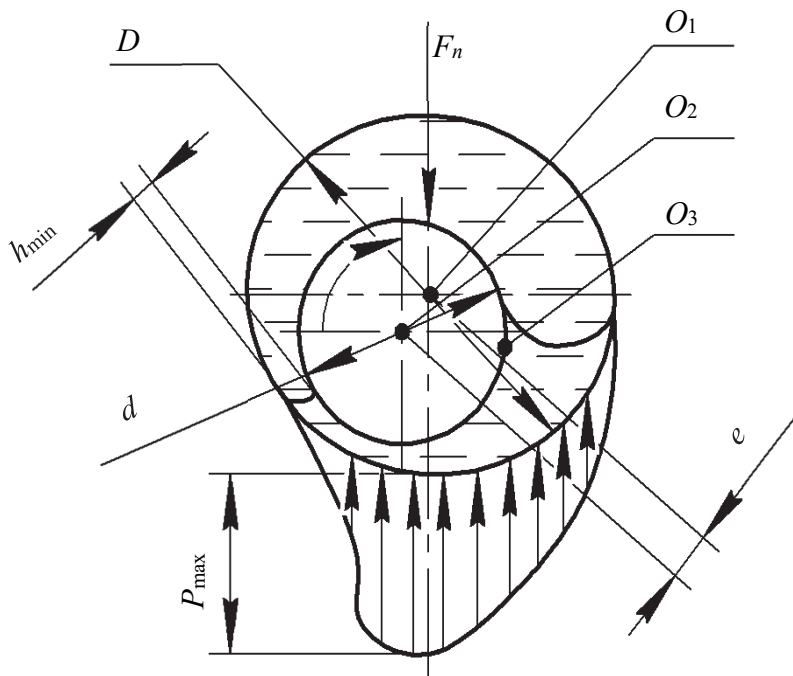
– прырода яго адзіная і характарызуецца ўласцівасцю вадкасці.

Здольнасць вадкасці (газу) аказваць супраціўленне адноснаму руху малекул называецца вязкасцю.

Эфект вадкаснага трэння паспяхова рэалізуецца ў падшыпніку слізгацця (рыс. 1.15):

$$h_{\min} > k(R_{z1} + R_{z2}), \quad (1.26)$$

дзе  $k = 1,2-1,3$  – каэфіцыент запасу.



Рыс. 1.15. Трэнне слізгацця ў вадкасных падшыпніках

Адносны зазор

$$\psi = \frac{D-d}{d} = \frac{R-r}{r} = \frac{\delta}{r}; \quad \delta = R-r, \quad (1.27)$$

дзе  $D$  – дыяметр адтуліны;  $d$  – дыяметр рабочага органа;  $R$  – радыус адтуліны;  $r$  – радыус рабочага органа;  $\delta$  – рознасць радыусаў.

Адносны эксцэнтрысітэт

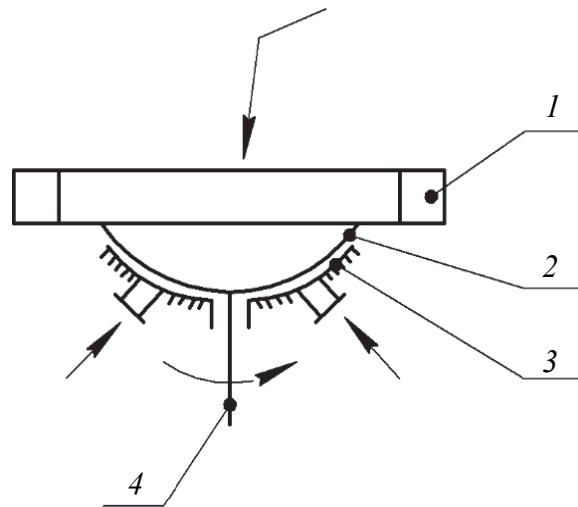
$$x = \frac{e}{\delta}. \quad (1.28)$$

Каэфіцыент трэння для вадкасных падшыпнікаў слізгацення залежыць ад вязкасці вадкай змазкі:

$$f = \frac{\pi \eta \omega}{\psi p}, \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2, \quad (1.29)$$

дзе  $\eta$  – дынамічная вязкасць вадкасці Па·с;  $\omega$  – вуглавая хуткасць, рад/с.

Для прыкладу разглядзім апору ўдарна-цэнтрабежнага млына канструкцыі НВА «Цэнтр», схема якой прыведзена на рыс. 1.16.



Рыс. 1.16. Апора ўдарна-цэнтрабежнага млына:  
1 – ратар; 2 – сфера; 3 – сферычны падпятнік; 4 – вал

Прынцып дзеяння газавай змазкі такі самы, як і вадкаскай. Яе перавагі перад вадкаскай:

- нізкае супраціўленне трэнню;
- даступнасць (паветра);
- неадчувальнасць да тэмпературы і забруджвання.

Недахопам пры гэтым з’яўляецца нізкая нясучая здольнасць з-за сціскальнасці газу.

### 1.3. Уплыў розных фактараў на трэнне

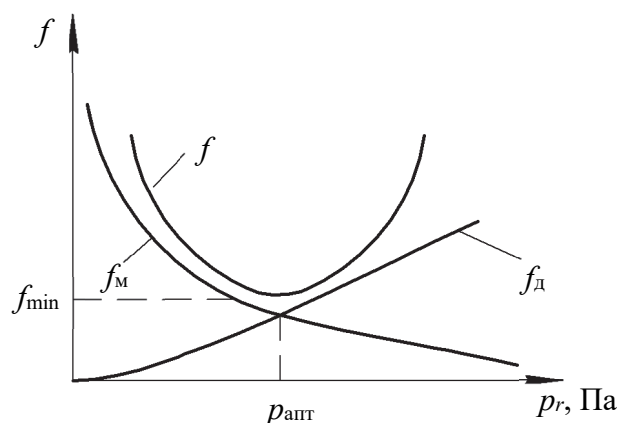
#### 1.3.1. Залежнасць каэфіцыента сухога трэння ад фізіка-механічных фактараў

Найбольшы ўплыў на трэнне аказваюць такія механічныя параметры (фактары), як нармальная нагрузка і хуткасць руху. Для сухога трэння паказана залежнасць ад нагрузкі (рыс. 1.17), дзе  $p_r$  – фактычны ціск, Па.

$$p_r = \frac{F_n}{A_r}; \quad (1.30)$$

$$f = f_m + f_d = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k\sqrt{\frac{h}{r}}. \quad (1.31)$$

Пры павелічэнні  $F_n$  і  $p_r$  зніжаецца  $f_m$  і адначасова павялічваецца ўкараненне няроўнасцей  $h$  і  $f_d$ .



Рыс. 1.17. Залежнасць сухога трэння ад нагрузкі

Змяншэнне вышыні выступаў  $R_z$  прыводзіць да росту  $A_r$ , а адпаведна, да павелічэння  $f_m$ , і наадварот – павелічэнне  $R_z$  спрыяе ўзростанню значэнняў  $h$  і  $f_d$ .

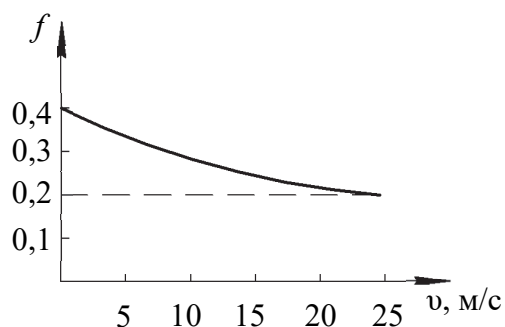
Уплыў хуткасці змяшчэння  $v$ , м/с, на каэфіцыент трэння даволі складаны, паколькі з яе павелічэннем павышаецца і температура кантакту. Усё ж такі прывядзём адну з найбольш распаўсюджаных формул па яе ўліку

$$f = f_0 e^{-cv}, \quad (1.32)$$

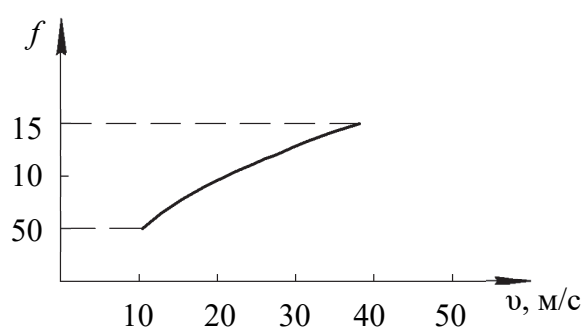
дзе  $f_0 = 0,29$  – каэфіцыент трэння спакою (чыгун – сталь);  $c = 1/23$ – $1/50$  – эмпірычны каэфіцыент трэння для другіх пар.

Формула паказвае, што з павелічэннем хуткасці каэфіцыент трэння змяншаецца (рыс. 1.18). Хаця ёсць і другія даследаванні, згодна з якімі ён павялічваецца. Напрыклад, з павелічэннем хуткасці павышаецца тэмпература. Пры гэтым матэрыялы становяцца больш вязкімі, плас тычнымі і павялічваецца  $f_m$  (рыс. 1.19).

На метале паяўляюцца задзірыны. Урэшце рэшт можа наступіць прыліпанне матэрыялаў. З другога боку, калі пары трэння працуюць з паўзамі, то ў час іх адбываецца ахаладжэнне і загартоўка паверхні. Гэта прыводзіць да зніжэння каэфіцыента трэння за кошт памяншэння пранікнення  $h$  і складальнай  $f_d$ .



Рыс. 1.18. Змяненне каэфіцыента трэння ад хуткасці



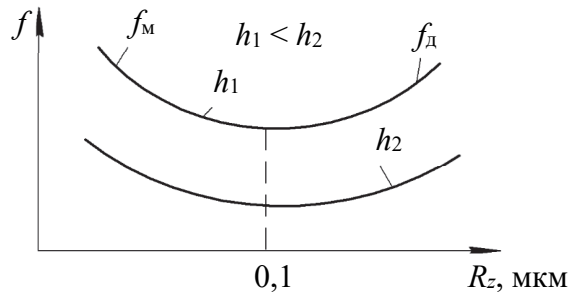
Рыс. 1.19. Змяненне каэфіцыента трэння пры павелічэнні тэмпературы

Дарэчы, калі звярнуцца да магчымага зліпання матэрыялаў, то гэта з'ява выкарыстоўваецца для зваркі трэннем металічных дэталей, напрыклад арматурных пруткоў. Так, для зваркі сталёных пруткоў (СтЗ) дыяметрам 10 мм неабходна прыціснуць тарцы з ціскам 60 МПа і раскруціць адзін з іх да  $n = 3000$  хвіл<sup>-1</sup>. Працэс зваркі завершыцца ўжо праз 3 с. Такім спосабам можна зварваць разнародныя металы: сталь – медзь, сталь – латунь і г. д. Дыяметр пруткоў можа быць  $d = 3,5–200$  мм.

### 1.3.2. Змяненне каэфіцыента трэння пры памежнай змазцы

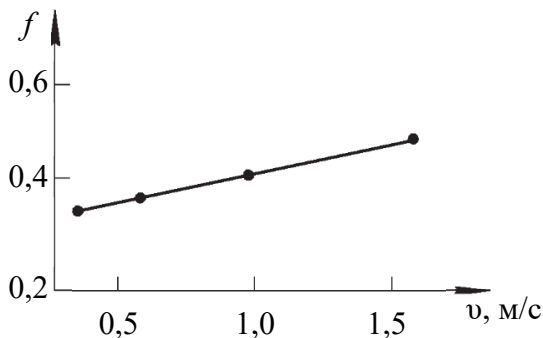
Трэнне пры змазцы мае сваю спецыфіку. Велічыня каэфіцыента трэння істотна залежыць ад трываласці пласта змазкі. А яна вызначаецца малекулярнымі ўласцівасцямі змазвальнага матэрыялу, уласцівасцямі кантактуючых паверхняў і тэмпературай.

Пры павелічэнні шурпатасці каэфіцыент трэння пераходзіць праз мінімум (рыс. 1.20). Чым танейшая плёўка змазкі, тым большы ўплыў гэтага параметра. Пачатковае паніжэнне абумоўлена павелічэннем таўшчыні плёўкі, яе стабілізацыяй за кошт пранікнення ва ўпадзіны. А вось павышэнне пасля мінімуму гаворыць аб выхадзе выступаў з плёўкі і павелічэнні чыста дэфармацыйнай складальнай  $f_d$ .

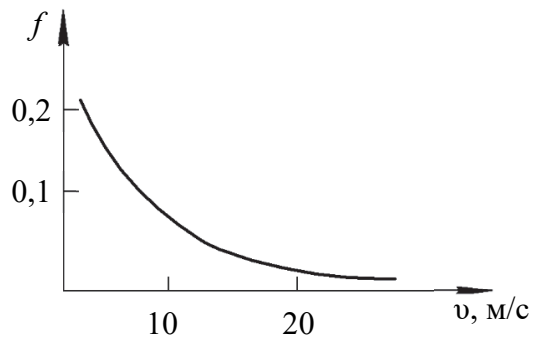


Рыс. 1.20. Змяненне каэфіцыента трэння ад сярэднеарыфметычнай шурпатасці

Змяненне каэфіцыента трэння ад хуткасці неадназначна. Пры нізкіх хуткасцях ён злёгка павялічваецца (рыс. 1.21). Тут  $f_D$  зведзены да мінімуму. І на каэфіцыент трэння ўплывае толькі вязкасць змазкі, якая ўзрастае з павелічэннем хуткасці  $\eta = dv/dh$ .

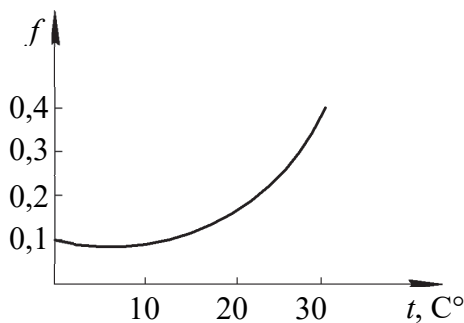


Рыс. 1.21. Змяненне каэфіцыента пры нізкіх хуткасцях



Рыс. 1.22. Змяненне каэфіцыента трэння ад хуткасці і вязкасці змазкі

Далейшае павышэнне хуткасці прыводзіць да зніжэння вязкасці за кошт павышэння тэмпературы, і каэфіцыент трэння падае (рыс. 1.22). Ён спачатку зніжаецца хутка, а затым стабілізуецца. Але гэта стабільнасць не застаецца ва ўсім тэмпературным дыяпазоне. Пры дасягненні тэмпературы плаўлення змазка выцякае з зоны кантакту і трэнне пераходзіць у сухое. Каэфіцыент трэння рэзка ўзрастае (рыс. 1.23).

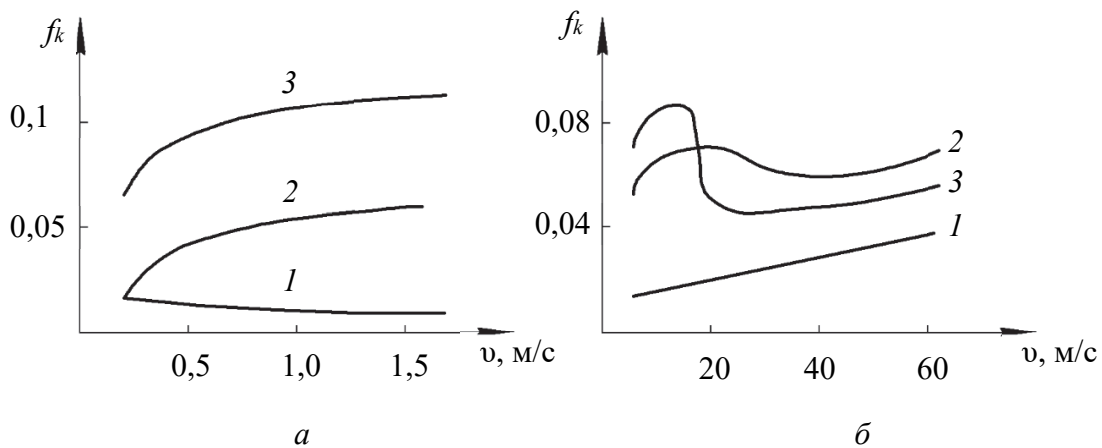


Рыс. 1.23. Змяненне каэфіцыента трэння ад тэмпературы



Пры змяненні нагрузкі каэфіцыент трэння змяняецца прыкладна так, як і пры сухім трэнні. Падводзячы вынік, можна адзначыць, што выяўленне ўплыву розных фактараў на трэнне – складаны і не да канца вывучаны працэс.

Спецыфічным з’яўляецца ўплыў змазак на трэнне качэння. Чым вышэйшая вязкасць змазак, тым вышэйшая супраціўленне качэнню (рыс. 1.24, *a*). Яно ўзрастае з павелічэннем хуткасці ў дыяпазоне 0,2–2 м/с.



Рыс. 1.24. Змяненне каэфіцыента трэння качэння ад хуткасці:  
*a* – пры нізкіх хуткасцях; *b* – пры высокіх хуткасцях;  
 1 – без змазкі; 2 – густая змазка (салідол); 3 – вадкая змазка (масла)

У далейшым каэфіцыент трэння мяняецца па-другому, што абумоўлена павышэннем тэмпературы і зніжэннем вязкасці (рыс. 1.24, *b*). Празмерная змазка павялічвае супраціўленне качэнню.

Такім чынам, трэнне, асабліва пры змазцы, па-рознаму змяняецца ў залежнасці ад розных фактараў. Таму ўзнікла неабходнасць аб’яднаць хаця б некаторыя з іх. Гэта можна зрабіць з дапамогай крытэрыя Зомерфельда для падшыпнікаў слізгацення:

$$S_0 = \frac{p\psi}{\eta\omega}, \quad (1.33)$$

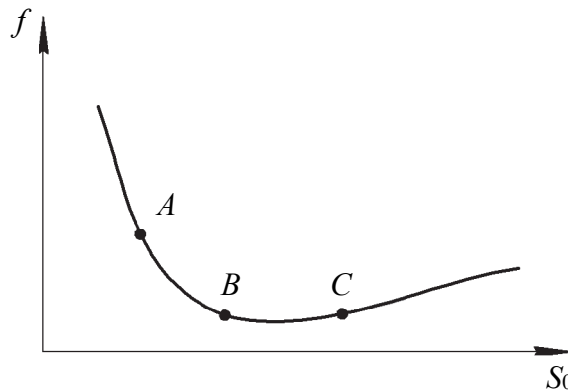
дзе  $p$  – сярэдні ціск у падшыпніках слізгацення, Па;  $\psi$  – адносны зазор,  $\psi = (D - d) / d$ ;  $\eta$  – дынамічная вязкасць, (Па·с);  $\omega$  – вуглавая хуткасць, рад/с.

Пабудавана дыяграма Герсі – Штрыбека (рыс 1.25). У залежнасці ад колькасці змазачнага матэрыялу паміж цвёрдымі цэламі могуць узнікнуць розныя віды змазкі: *AB* – памежнае трэнне; *BC* – вадкаснае трэнне.

Па дыяграме бачна, што найлепшыя ўмовы забяспечваюцца пры вадкасным трэнні. Некаторае павелічэнне  $f$  справа ад пункта *C* звязана з павышэннем таўшчыні пласта змазкі.

Наогул, дадатныя ўласцівасці змазкі заключаюцца ў наступным:

- зніжэнне каэфіцыента трэння і інтэнсіўнасці зносу;
- выдаленне з зоны кантакту трыбаспалучэнняў прадуктаў зносу пры іх наступным аддзяленні фільтраваннем;
- зніжэнне і прадухіленне ад карозіі;
- паляпшэнне дынамічных і акустычных характарыстык трыбаспалучэнняў (змазка адначасова мае пругкія і вязкія ўласцівасці і дапамагае згладжваць дынамічныя нагрузкі і зніжаць шум у працэсе эксплуатацыі).



Рыс. 1.25. Дыяграма Герсі – Штрыбека

## 1.4. Фрыкцыйныя, антыфрыкцыйныя і змазачныя матэрыялы

### 1.4.1. Асноўныя патрабаванні, прад'яўляемыя да фрыкцыйнасці і антыфрыкцыйнасці

Умоўна прынята, што матэрыялы з  $f > 0,2$  – фрыкцыйныя, з  $f < 0,2$  – антыфрыкцыйныя.

Да фрыкцыйных адносяцца тармазы, муфты, раменныя, канатныя перадачы, хадавыя колы, рэйкі, да антыфрыкцыйных – падшыпнікі слізгацення, накіравальнікі, кольца поршневых помпаў, кампрэсараў.

Спецыфіка фрыкцыйнасці і антыфрыкцыйнасці абумоўлена дваякай прыродай трэння і наяўнасцю малекулярнай і дэфармацыйнай складальных, а таксама тым, што трэнне – гэта паверхневая з'ява. Таму цвёрдасць, трываласць на зрух паверхневых пластоў можа значна адрознівацца ад асноўнага аб'ёму матэрыялу. Яны характарызуюцца дадатным градыентам механічных уласцівасцей –  $dt / dh > 0$ .

Фрыкцыйныя матэрыялы павінны мець: нізкі модуль пругкасці – пры пругкім кантакце; нізкую цвёрдасць – пры пластычным кантакце.

Гэта забяспечвае, адпаведна, павышэнне  $f_d$  за кошт больш глыбокага ўкаранення няроўнасцей і павышэнне  $f_m$  у выніку павелічэння фактычнай плошчы кантакту.

У антыфрыкцыйных матэрыялах усё наадварот. Яны павінны мець высокую цвёрдасць і модуль пругкасці. Для іх значэнне  $h / r$  павіна быць як мага меншым. Акрамя гэтага, фрыкцыйныя і антыфрыкцыйныя матэрыялы павінны:

- легка апрацоўвацца механічна;
- хутка прыцірацца пры нізкім зносе;
- быць каразійнаўстойлівымі;
- мець нізкі каэфіцыент цеплавога пашырэння;
- мець стабільны каэфіцыент трэння;
- утрымліваць нетаксічныя прадукты зносу.

#### 1.4.2. Фрыкцыйныя матэрыялы

Дадатны градыент механічных уласцівасцей у такіх матэрыялах дасягаецца двума шляхамі. Першы заключаецца ва ўвядзенні ў кантактны пласт прамежкавага пластычнага матэрыялу, супраціўленне зруху якога меншае, чым дадзены паказчык для кантактуючых цел. Гэта можа быць металічнае і неметалічнае рэчыва, аксідныя плеўкі, цвёрдыя змазкі. Другі шлях – выкарыстанне ў пары трэння такога матэрыялу, які пад уздзеяннем зруху і з павышэннем тэмпературы размякчаецца. Пры гэтым на паверхні трэння ўзнікае пластычная плеўка.

Існуюць наступныя віды фрыкцыйных матэрыялаў: металічныя, азбестакаўчукавыя, азбестасмаляныя, арганічныя, металакерамічныя. Контрцелам пры гэтым служаць тэрмаапрацаваныя высокавугляродзістыя сталі, легіраваныя сталі, чыгуны.

Да *металічных* фрыкцыйных матэрыялаў адносіцца шэры чыгун (СЧ). Вялікая колькасць вугляроду ў ім стварае кантактную плеўку з нізкім супраціўленнем зруху.

*Азбестакаўчукі* – муфты счаплення, тармазы. У іх складзе азбест, каўчук, жалезны сурык, сера, аксід цынку, каніфоль. Каркасам з'яўляецца азбест, каэфіцыент трэння якога  $f = 0,7-0,8$  і залежыць ад тэмпературы. Пры тэмпературы 200–250°C каўчук размякчаецца, што прыводзіць да зняжэння каэфіцыента трэння.

*Азбестасмаляныя* матэрыялы маюць у якасці звязкі эпаксідную смалу. Яны ўстойліва працуюць пры тэмпературы да 500°C. Тыповы матэрыял гэтай групы – рэтынакс. У яго дадаткова ўводзіцца латунны дрот, які ўзмацняе каркас. *Азбестасмаляныя* матэрыялы выкарыстоўваюцца ў тармазах самалётаў.

*Арганічныя* матэрыялы – драўніна, скура, гума. Выкарыстоўваюцца толькі ў нізканагружаных вузлах трэння.

*Металакераміка* – тэрмастойкі матэрыял, які пры павышэнні тэмпературы схільны да прыліпання (схоплівання). Пры гэтым яго каэфіцыент трэння рэзка памяншаецца, напрыклад пры тэмпературы  $100^{\circ}\text{C}$   $f = 0,8$  а пры  $t = 700^{\circ}\text{C}$   $f = 0,1$ .

### 1.4.3. Антыфрыкцыйныя матэрыялы

Гэта ў асноўным матэрыялы для падшыпнікаў слізгацення. Існуюць наступныя віды антыфрыкцыйных матэрыялаў: металічныя, прыродныя, палімерныя, металакерамічныя.

Сярод *металічных* антыфрыкцыйных матэрыялаў вылучаюць:

– бабіт – сплаў волава, сурмы і медзі, Б-83 (83% волава). Выкарыстоўваецца пры  $p \leq 10$  МПа;  $v \leq 50$  м/с;  $t < 70^{\circ}\text{C}$ . Яго каэфіцыент трэння са змазкай  $f \leq 0,005$ ;

– бронза (ОЦС – волава, цынк, свінец і медзь);

– сплавы алюмінію тугаплаўкія (хром, жалеза), легкаплаўкія (волава, сурма, свінец);

– чыгун шэры – коўкі, з павышаным утрыманнем вугляроду (графіту). Выкарыстоўваецца пры нізкіх нагрузках і хуткасцях. Чыгун знаходзіцца на мяжы фрыкцыйных і антыфрыкцыйных матэрыялаў.

*Прыродныя* матэрыялы ўключаюць драўніну і каштоўныя камяні. Апошнія маюць высокую цвёрдасць і нізкі каэфіцыент трэння. Гэта апоры ў гадзінніках. Драўніна звычайна мадыфікаваная, насычаная палімернымі смоламі і металічнымі часцінкамі.

Да *палімерных* антыфрыкцыйных матэрыялаў адносяцца капрон, поліэтылен, матэрыялы на аснове фенолфармальдэгідных і эпаксідных смол, фтарапласт. Найлепшым з іх можна лічыць фтарапласт. Хімічна ўстойлівы, не паглынае ваду, тэрмастойкі (да  $400^{\circ}\text{C}$ ) і мае самы нізкі каэфіцыент трэння. З яго вырабляюць падшыпнікі слізгацення.

У апошні час з’явіўся яшчэ адзін антыфрыкцыйны матэрыял – флубон. Гэта сплаў фтарапласту з графітам.

*Самазмазвальныя* матэрыялы – гэта кампазіты, асноўным кампанентам якіх служыць графіт. У якасці дабавак у яго ўводзяць дысульфіды ( $\text{MoS}_2$ ), дыселеніды ( $\text{WSe}_2$ ) і дытэлурыды ( $\text{MoTe}_2$ ) металаў. Усе гэтыя матэрыялы – цвёрдыя змазкі, якія маюць пласцінчастую будову, асобныя пласты слізгаюць адзін адносна другога. Самым распаўсюджаным з іх з’яўляецца флубон. Ён устойлівы пры тэмпературы ад  $-60$  да  $+800^{\circ}\text{C}$  і ціску  $p \leq 300$  Мпа. Яго каэфіцыент трэння  $f \leq 0,1$ .

*Антыфрыкцыйная металакераміка* мае высокую зносаўстойлівасць і нізкі каэфіцыент трэння. Да яе можна аднесці жалезаграфіт,

бронзаграфіт, алюмаграфіт. Замест графіту можа выкарыстоўвацца малібдэніт. Жалезаграфіт ужываецца пры тэмпературы 80–100°C,  $p \leq 300$  МПа. Антыфрыкцыйныя металакерамічныя матэрыялы у выглядзе плевак могуць наносіцца на паверхню дэталеў трыбаспалучэнняў.

#### 1.4.4. Змазачныя матэрыялы

У залежнасці ад фізічнага стану адрозніваюць газападобныя, вадкія, пластычныя і цвёрдыя змазкі. Найбольш распаўсюджанымі з’яўляюцца вадкія. Гэта масла розных відаў. Па прызначэнні масла бывае:

- маторнае (рухавікі);
- трансмісійнае (каробкі перадач);
- індустрыйнае (прамысловае абсталяванне);

Фізіка-хімічныя ўласцівасці змазачных матэрыялаў рэгламентаваны стандартамі. Сярод гэтых уласцівасцей асноўнымі з’яўляюцца:

- шчыльнасць (пры зададзенай тэмпературы);
- вязкасць ( $t_{50} = 50^\circ\text{C}$ );
- тэмпература ўспышкі;
- тэмпература застывання.

Масла ўяўляе сабой сумесь розных кампанентаў, кожны з якіх выконвае свае функцыі. Звычайна да 90% аб’ёму прыходзіцца на базавае масла, астатнія 10% – прысадкі і напаяльнікі. У якасці базавых вылучаюць мінеральныя (нафтавыя), сінтэтычныя і тлушчавыя масла. Найбольш распаўсюджанымі з’яўляюцца мінеральныя, дарагія сінтэтычныя выкарыстоўваюцца толькі для спецтэхнікі, тлушчавыя – звычайна ў якасці прысадак.

Прысадкі – хімічныя злучэнні з доляй 0,002–5%, якія рэзка паляпшаюць уласцівасці масла. Гэта касторавае, вазелінавае масла, гліцэрын, алеінавая і стэарынавая кіслоты і г. д.

Па прызначэнні прысадкі падзяляюцца на мыйныя, супрацьакісляльныя, супрацьзадзірныя, антыкаразійныя, антыфрыкцыйныя, шматфункцыянальныя.

У прамысловасці найбольшае выкарыстанне атрымала масла індустрыйнае. Па прызначэнні яно падзяляецца на 4 групы:

- Л – для лёгканагружаных вузлоў трэння;
- Г – для гідрасістэмы (гідрапрывада);
- Н – для накіравальнікаў слізгацення;
- Т – для цяжканагружаных вузлоў (зубчастых перадач).

Па эксплуатацыйных уласцівасцях індустрыйнае масла падзяляюць на 3 групы: А – без прысадак; В – з антыакісляльнымі і антыкаразійнымі прысадкамі; С – з супрацьзноснымі прысадкамі.

Маркіроўка масла індустрыйнага И-Г-А-32 азначае, што масла індустрыйнае, гідраўлічнае, без прысадак, мае вязкасць  $v_{50} = 32 \text{ мм}^2/\text{с}$  пры тэмпературы  $t = 50^\circ\text{С}$ .

Аснаўныя характарыстыкі масла індустрыйнага:  $v_{50} = 2\text{--}190 \text{ мм}^2/\text{с}$  (кінематычная вязкасць),  $t_{\text{уп}} = 90\text{--}240^\circ\text{С}$  (тэмпература ўспышкі),  $t_{\text{зас}} = -8\text{--}20^\circ\text{С}$  (тэмпература застывання).

Пластычныя (кансістэнтныя) змазкі – гэта мінеральныя масла, загущаныя солямі тлушчавых кіслот (мыламі). Яны прызначаны для змазкі падшыпнікаў качэння, шарніраў рычажных і кулачковых механізмаў.

Перавагі пластычных змазак:

- утрымліваюцца на нахіленай і вертыкальнай паверхнях;
- не выціскаюцца з зоны кантакту;
- герметызуюць вузел;
- забяспечваюць малы расход;
- простыя ў абслугоўванні;
- менш за астатнія забруджваюць асяроддзе.

Да недахопаў можна аднесці дрэнную працаздольнасць пры мінулавых тэмпературах.

У залежнасці ад складу змазкі падзяляюцца на кальцыевыя, натрыевыя, ліцьевыя.

*Кальцыевыя* змазкі (салідолы) выкарыстоўваюцца ў вільготным асяроддзі, пры  $t < 50^\circ\text{С}$ .

*Натрыевыя* змазкі (кансталіны) плаваюць толькі пры  $100\text{--}200^\circ\text{С}$ . Але яны раствараюцца ў вадзе (карозія).

*Ліцьевыя* змазкі (літол) – асноўныя змазкі ў аўтамабілях.

Апісанне цвёрдых змазак глядзіце ў падраздзеле 1.4.3. Іх наносяць на рабочыя паверхні ў выглядзе тонкіх плевак (уціраюць) ці як парашкападобныя дабаўкі.

## 2. ЗНОС МАТЭРЫЯЛАЎ І ДЭТАЛЕЙ МАШЫН

### 2.1. Агульная характарыстыка зносу.

#### Знос у трыбаспалучэннях

##### 2.1.1. Сутнасць зносу і яго праяўленне

Адной з першых гіпотэз па зносе была гіпотэза М. М. Давідзенкава, які прапанаваў разглядаць яго як два адначасова рэалізуемыя працэсы – сцірання і змяцця. Пад першым ён разумеў адрыв частінак з наступным іх выдаленнем, пад другім – расплюшчванне паверхні матэрыялу. Працэс сцірання аўтар параўноўваў са шліфаваннем. Знос цесна звязаны з трэннем і характарызуецца такімі відамі дэфармацыі, як і пры фрыкцыйных сувязях: пругкае і пластычнае адцісканне і мікрарэзанне.

Першая колькасная залежнасць, якая звязвае знос з уласцівасцямі матэрыялу і знешнімі ўмовамі трэння, была сфармулявана К. А. Тонам. Їм уведзена паняцце адноснай зносаўстойлівасці.

$$\varepsilon = \frac{B_2}{B_1}, \quad (2.1)$$

дзе  $B_2$  – знос эталона (цэлулоіду);  $B_1$  – знос вывучаемага матэрыялу.

С. Н. Хрушчоў пацвердзіў гэту гіпотэзу для металаў і атрымаў залежнасць (рыс. 2.1), якая апісваецца раўнаннем:

$$\varepsilon = \alpha \frac{HB}{p_r}, \quad (2.2)$$

дзе  $\alpha$  – эмпірычны каэфіцыент;  $HB$  – цвёрдасць, МПа;  $p_r$  – фактычны ціск, Па.

Аднак усё сказанае вышэй адносіцца да кантакту дзвюх паверхняў, калі рэалізуецца чыста знешняе трэнне як паверхневая з’ява.

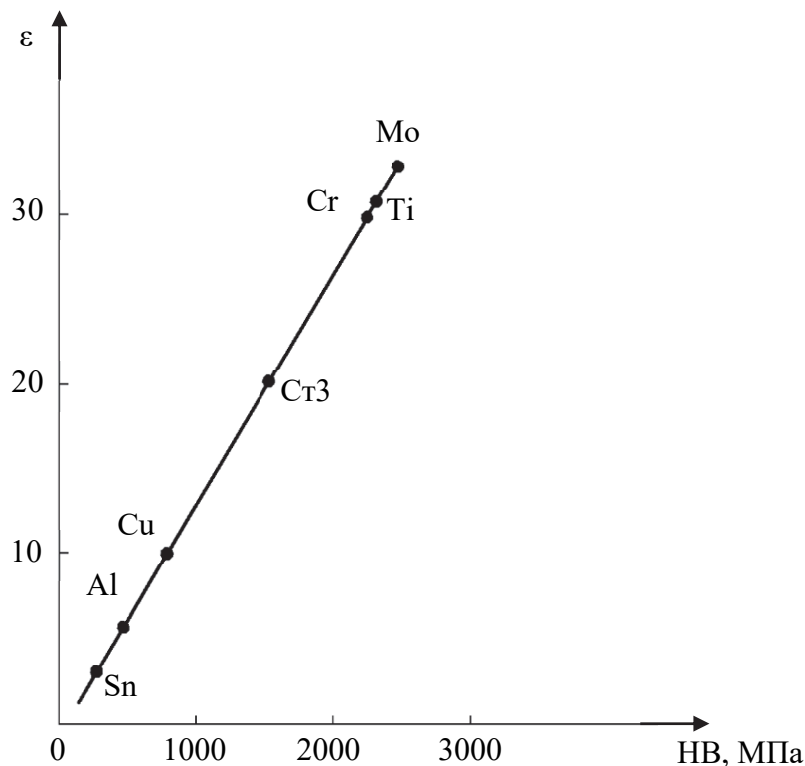
Крыху па-другому працэс зносу развіваецца пры ўнутраным трэнні, калі, напрыклад, паверхня металу сутыкаецца (апрацоўваецца) з абразівам. У гэтым выпадку знос прама прапарцыянальны нагрузцы і адваротна прапарцыянальны цвёрдасці:

$$I = \frac{P_r}{HB}, \quad (2.3)$$

дзе  $I$  – страта матэрыялу ў адзінку часу, кг/с.

Больш таго, у далейшым было выяўлена, што механізм разбурэння матэрыялу мяняецца ў залежнасці ад суадносін цвёрдасці абразіўных часцінак і матэрыялу.

Нават з простых формул, прыведзеных вышэй, відавочна, што велічыня зносу прапарцыянальна нагрузцы ( $p_r$ ) і адваротна прапарцыянальна цвёрдасці матэрыялу паверхняў НВ.



Рыс. 2.1. Залежнасць адноснай зносаўстойлівасці ад цвёрдасці металаў

Каэфіцыент трэння аказвае значны ўплыў на знос. Адносіны зносу двух цел прапарцыянальны адносінам каэфіцыентаў трэння:

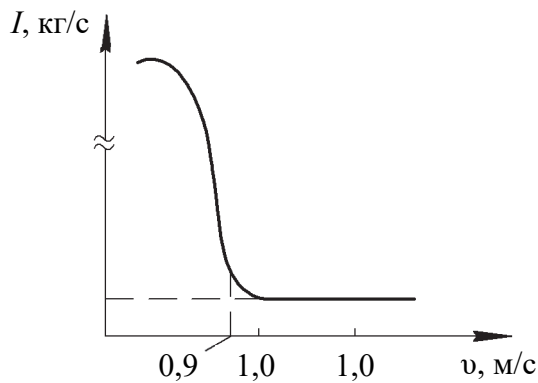
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Інтэнсіўнасць зносу ў залежнасці ад хуткасці слізгацення мяняецца так, як і сіла (каэфіцыент) трэння. Тут аказвае ўплыў не столькі хуткасць, колькі тэмпература ад нагрэву паверхні пры трэнні.

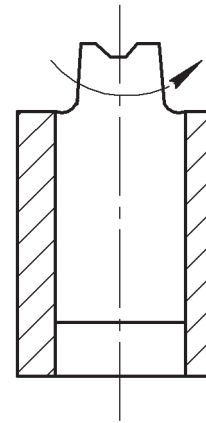
Залежнасць гэта складаная і неадназначная. Можна для прыкладу разгледзець адну эксперыментальную залежнасць (рыс. 2.2).

Пры  $v > 0,9$  м/с глыбіннае вырыванне змяняецца паліраваннем (рыс. 2.3). Знос зніжаецца прыкладна ў 500 разоў. Гэта ўсе з-за павелічэння тэмпературы да  $1000^{\circ}\text{C}$ .





Рыс. 2.2. Залежнасць страты матэрыялу ад хуткасці



Рыс. 2.3. Схема працэсу паліравання

### 2.1.2. Інтэнсіўнасць зносу

У тэхніцы знос звычайна характарызуецца адной з велічынь:

- $I_h$  – лінейная інтэнсіўнасць зносу;
- $I_m$  – масавая інтэнсіўнасць зносу;
- $I_V$  – аб’ёмная інтэнсіўнасць зносу.

Лінейная інтэнсіўнасць зносу ўяўляе з сябе вышыню зношанага пласта, які прыходзіцца на адзінку шляху трэння:

$$I_h = \frac{h}{L}. \quad (2.4)$$

Ці па-другому:

$$I_h = \frac{V}{A_a L} = I_V, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2.5)$$

дзе  $V$  – выдалены (зношаны) аб’ём цела;  $A_a$  – намінальная плошча дотыку;  $L$  – шлях трэння.

Масавая інтэнсіўнасць зносу разлічваецца па формуле

$$I_M = \frac{m}{A_a L}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.6)$$

дзе  $m$  – маса зношанага рэчыва, кг.

Сувязь паміж імі

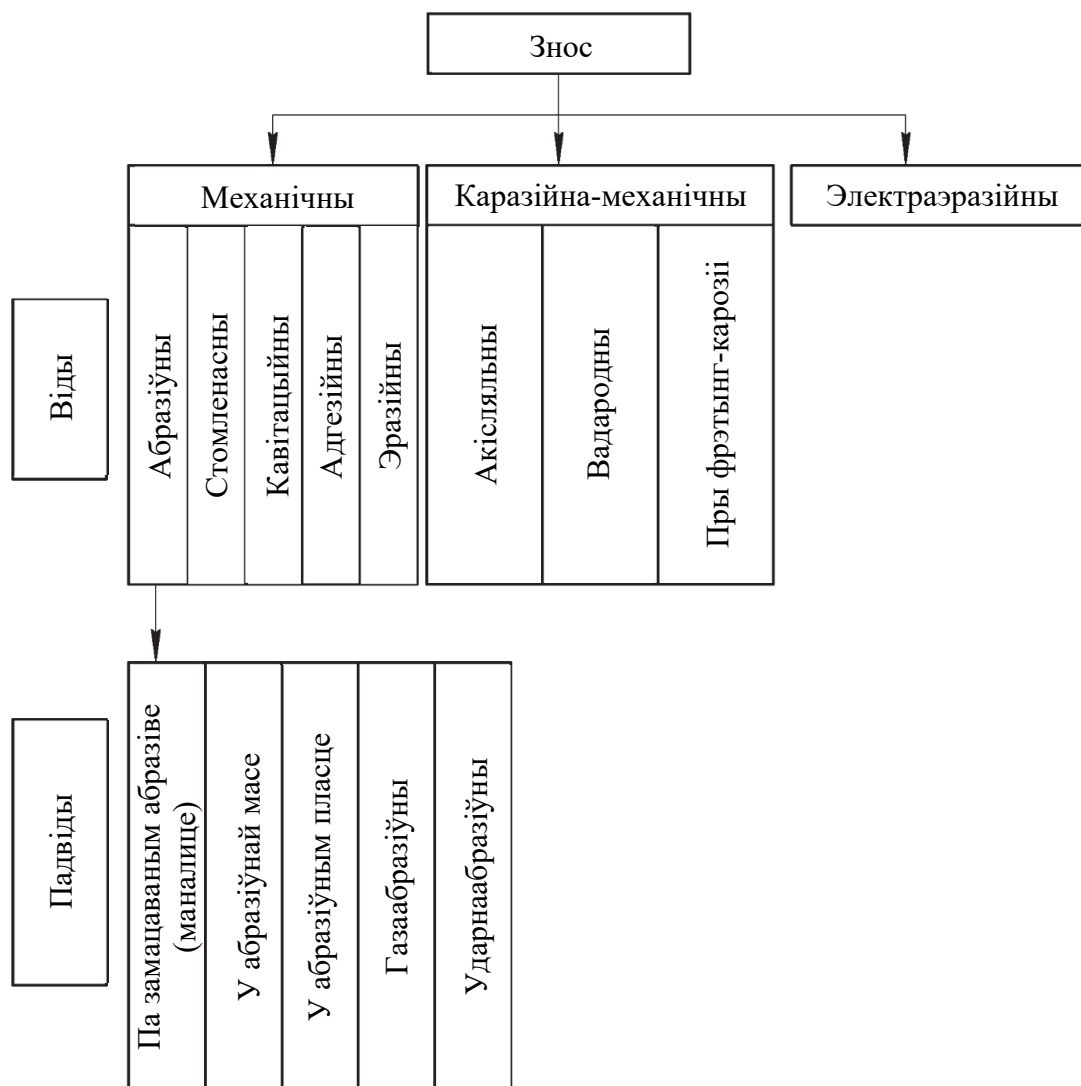
$$I_M = \rho I_h = \rho I_V, \quad (2.7)$$

дзе  $\rho$  – шчыльнасць матэрыялу, кг/м<sup>3</sup>.

Бачна, што гэтыя формулы ніяк не звязаны з уласцівасцямі матэрыялаў і характарыстыкамі працэсу трэння.

### 2.1.3. Віды зносу

На вылічыню зносу аказвае ўплыў шмат фактараў, якія могуць прывесці да розных відаў разбурэння паверхні трыбаспалучэння. У залежнасці ад пераважнага фактара ўсе віды зносу можна класіфікаваць наступным чынам (рыс. 2.4).

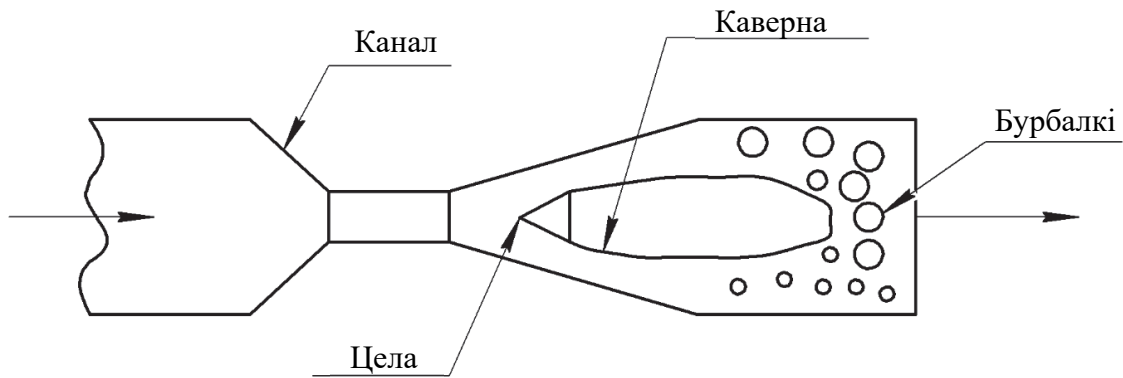


Рыс. 2.4. Класіфікацыя відаў зносу

*Абразіўны знос* – механічны знос пад уздзеяннем абразіўных часцінак. Усё, што было апісана вышэй, гэта без удзелу часцінак, а проста пры кантакце дзвюх шурпатых паверхняў (трыбаспалучэнне).

*Стомленасны знос* – механічны знос у выніку шматразавага дэфармавання мікрааб’ёмаў матэрыялу.

*Кавітацыйны знос* абумоўлены ўтварэннем і схлопваннем (разбурэннем) бурбалак пары ў вадкасці (рыс. 2.5).



Рыс. 2.5. Кавітацыйны знос

Пры абцяканні цела вадкасцю з хуткасцю больш 10 м/с за ім утвараецца пустата, ціск у ёй меншы за атмасферны. Пры тэмпературы 20°C вада закіпае. Бурбалкі пары, папаўшы ў плынь, схлопваюцца. Ціск пры гэтым можа дасягаць 1000 МПа, а трываласць металу – 200–500 МПа. Таму кавітацыяй разбураюцца грабныя вінты судоў (караблёў), рабочыя колы помпаў, павароты трубаправодаў. Але ёсць і карыснае выкарыстанне – здрабненне матэрыялаў.

Кавітацыя наступае пры адпаведных умовах, якія характарызуюцца крытэрыем кавітацыі:

$$k = \frac{2(p - p_n)}{\rho v^2}, \quad (2.8)$$

дзе  $p$  – ціск у плыні, МПа;  $p_n$  – ціск насычанай вадзяной пары пры  $t = \text{const}$ , МПа;  $v$  – хуткасць вадкасці, м/с.

*Адгезійны знос* узнікае ў выніку дзеяння сіл малекулярнага счаплення на мяжы падзелу двух цел. Такое зношванне праяўляецца ў выглядзе задзірын, заяданняў, адгезійнага прыліпання.

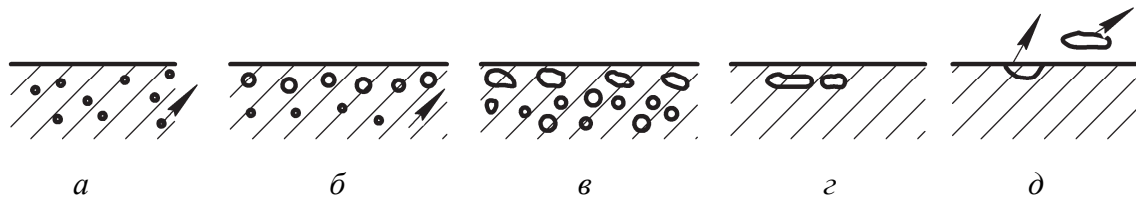
*Эрозія* – паверхневае разбурэнне рэчыва пад ўздзеяннем карозіі і механічнай нагрузкі (усе хімічныя апараты).

*Электраэразійнае разбурэнне* ўзнікае ў выніку механічнай нагрузкі і электрычнага разраду.

#### 2.1.4. Стомленасны знос

Гэта механічны знос у выніку шматразовага дэфармавання мікрааб'ёмаў матэрыялаў. Такое зношванне можа быць як пры сухім трэнні, так і пры памежнай і чыста вадкаснай змазцы. Гэта найбольш распаўсюджаны від паверхневага разбурэння дэталей, якія знаходзяцца ва ўмовах цыклічнага кантактнага нагружэння (зубчастыя колы, падшыпнікі, элементы кулачковых механізмаў, крывашыпна-шатуновыя і г. д.)

Механізм стомленаснага зносу паказаны на рыс. 2.6.



Рыс. 2.6. Механізм стомленаснага зносу

Адноснае перамяшчэнне цел пры слізгаценні выклікае міграцыю зон фактычнага кантакту па павехні кожнага з іх. У выніку гэтыя напружаны і дэфармаваны стан мікрааб'ёмаў змяняецца (рыс. 2.6, а). Пры такім уздзеянні на глыбіні паверхневага пласта паяўляюцца розныя дэфекты: дыслакацыі, вакансіі, лінейныя і кропкавыя дэфекты (рыс. 2.6, б, в). Далей адбываецца іх аб'яднанне і перамяшчэнне бліжэй да павярхні (рыс. 2.6, г). Затым мікрааб'ёмы выходзяць на павярхню і вырываюцца з матэрыялу (рыс. 2.6, д). Так утвараюцца шматлікія паглыбленні.

І. В. Крагельскім атрымана формула для вызначэння інтэнсіўнасці лінейнага зносу за  $n$  цыклаў уздзеяння да аддзялення часцінак ад павярхні:

$$I_h = \frac{0,15}{n} \sqrt{\frac{h p_a}{r p_r}}. \quad (2.9)$$

Колькасць цыклаў для пругкага кантакту

$$n_{\text{пр}} = \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^t, \quad (2.10)$$

для пластычнага кантакту

$$n_{\text{пл}} = \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^t, \quad (2.11)$$

дзе  $\sigma_0$  і  $\varepsilon_0$  – напружанне і адносная дэфармацыя, пры якой адбываецца ўтварэнне часцінак зносу пры  $n = 1$ ;  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  – рэальнае напружанне і дэфармацыя пры кантакце цел;  $t$  – параметр фрыкцыйнай стомленасці матэрыялу, пры  $0 < t < 8$  – пругкі кантакт, пры  $2 < t < 3$  – пластычны кантакт.

Такім чынам, інтэнсіўнасць стомленаснага зносу залежыць ад глыбіні ўкаранення ( $h / r$ ), прапарцыянальнай нагрузкі  $F_n$ , суадносін ціскаў  $p_a / p_r$  і колькасці цыклаў.

І хаця інтэнсіўнасць стомленаснага зносу па велічыні не надта вялікая, менавіта ён з'яўляецца прычынай выхаду з эксплуатацыі да 90% машын і механізмаў.

Прычым трэба яшчэ раз заўважыць, што стомленасны знос рэалізуецца ў выглядзе пругкага і пластычнага кантактаў. Крагельскім атрыманы асобныя формулы для пругкага і пластычнага кантакту. Але яны даволі складаныя, з вялікай колькасцю эмпірычных каэфіцыентаў.

## 2.2. Абразіўны знос

### 2.2.1. Агульная характарыстыка абразіўнага зносу

*Абразіўны знос* – механічнае зношванне матэрыялаў абразіўнымі часцінкамі. Яны, звычайна, маюць значна большую цвёрдасць, чым метал, разбураюць паверхню дэталей і рэзка павялічваюць знос. Часцінкі ў асноўным бываюць мінеральнага паходжання: аксідамі, прадуктамі зносу ці наклепу механічных часцінак. Яны маюць розную форму, часта вострыя грані і рэбры.

Пры абразіўным, як і пры другіх відах зносу, рэалізуецца пругкае і пластычнае адцісканне, але асноўным метадам (механізмам) з’яўляецца мікрарэзанне. Менавіта па гэтай прычыне інтэнсіўнасць абразіўнага зносу значна вышэйшая, чым у другіх відах. Пераход да мікрарэзання ажыццяўляецца пры ўмове

$$\frac{h}{r} = \frac{1 - (2\tau / \sigma_T)}{2}, \quad (2.12)$$

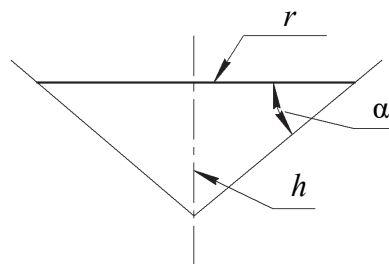
дзе  $r$  – радыус сферычнага індэнтара.

Пры кантакце жорсткай шурпатай паверхні абразіву з пластычнай гладкай паверхняй яго мікрарэзаўнасці будуць укараняцца ў гэту паверхню (рыс. 2.7).

Пры  $p_r = \text{НВ}$  і  $n = 1$ ,  $h = \varepsilon h_{\max}$ . Тады:

$$I_h = \frac{\text{tg} \alpha}{2(\gamma + 1)} \frac{p_a}{\text{НВ}}, \quad (2.13)$$

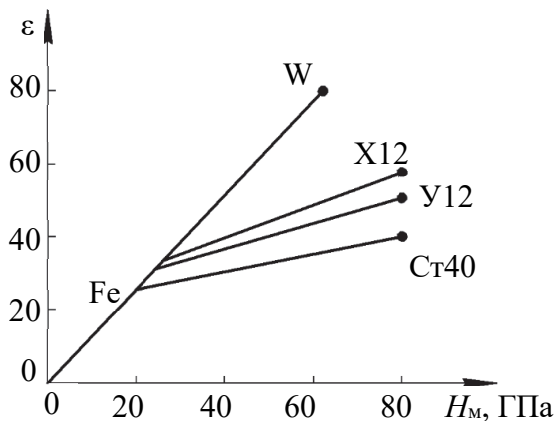
дзе  $\gamma$  – параметр шурпатасці.



Рыс. 2.7. Мікрарэзаўнасць паверхні

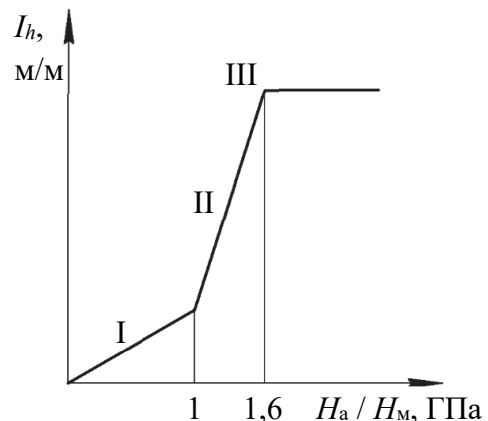
Значыць, пры мікрарэзанні інтэнсіўнасць зносу залежыць ад вастрынці часцінак абразіву, а таксама прамапрапарцыянальна намінальнаму ціску і зваротна прапарцыянальна цвёрдасці паверхні НВ. Залежнасць адноснай зносаўстойлівасці  $\varepsilon = 1 / I_h$  паказана на рыс. 2.8. Найбольш эфектыўным спосабам павышэння абразіўнай ўстойлівасці з'яўляецца лігіраванне, найменш эфектыўным – тэрмаапрацоўка, а дэфармацыйнае павелічэнне трываласці сплаваў (наклёп) не дае ніякага эфекту.

Далей для спрашчэння цвёрдасць НВ будзем абазначаць  $H$  і ў прыватнасці для матэрыялу  $H_M$ . Адначасова з павелічэннем цвёрдасці абразіву  $H_a$  расце інтэнсіўнасць зносу. Калі ўзяць адносную велічыню  $H_a / H_M$ , то залежнасць будзе такой, як паказана на рыс. 2.9.

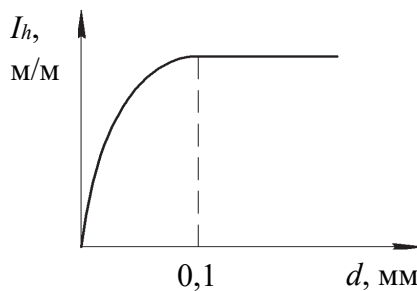


Рыс. 2.8. Залежнасць адноснай зносаўстойлівасці ад цвёрдасці абразіву:

W – вальфрам; X12 – хромаванаая сталь; Y12 – вугляродзістая сталь; Ст40 – сталь 40



Рыс. 2.9. Залежнасць лінейнай інтэнсіўнасці зносу ад адноснай велічыні цвёрдасці абразіву:  
I –  $H_M > H_a$ ; II –  $1,0 < H_M < 1,6$ ;  
III –  $H_M > 1,6$



Рыс. 2.10. Залежнасць інтэнсіўнасці зносу ад дыяметра часцінак

Магчымы тры розныя рэжымы:

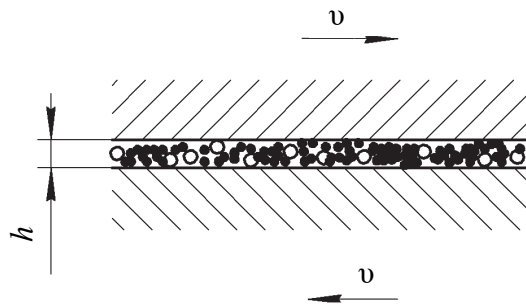
- 1) пры  $H_M > H_a$  зносу не будзе;
- 2) пераходны рэжым пры  $1,0 < H_M < 1,6$ ;
- 3) рэжым інтэнсіўнага зносу мікрарэзаннем пры  $H_M > 1,6$ . Прычым велічыня  $I_h$  ужо не будзе залежыць ад цвёрдасці абразіву.

Пры слізгаценні абразіву назіраецца праямая залежнасць паміж зносам і працягласцю ўздзеяння. Інтэнсіўнасць зносу не залежыць ад хуткасці слізгацення. З павелічэннем размеру абразіву інтэнсіўнасць зносу павялічваецца. Аднак інтэнсіўнае павелічэнне працягваецца да дыяметра часцінак  $d = 0,1$  мм (рыс. 2.10).

### 2.2.2. Падвідны абразіўнага зносу

Абразіўны знос у цэлым падзяляецца на некалькі падвідаў. Найбольш распаўсюджаным з іх з'яўляецца знос у *прамежкавым пласце*. Ён рэалізуецца ў двух варыянтах.

Першы варыянт сустракаецца пры кантакце дзвюх металічных паверхняў, у зазор паміж якімі пападаюць абразіўныя часцінкі. Яны могуць пападаць з навакольнага паветра. Напрыклад, у чыстым паветры ўтрымліваецца да  $5 \text{ г/м}^3$  пылу  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  і інш. з часцінкамі высокай цвёрдасці (да 20 ГПа). Гэта значна перавышае цвёрдасць матэрыялаў (металаў). Такі абразіўны знос можа існаваць у спалучэннях вал – утулка, прычым як без змазкі, так і з ёй (рыс. 2.11).



Рыс. 2.11. Знос у спалучэнні

Другое праяўленне такога зносу сустракаецца ў прамысловых агрегатах загладжвальнага тыпу. Гэта машыны для загладжвання бетонных паверхняў (валковыя, брусковыя), шпаклёвочныя машыны і г. д.

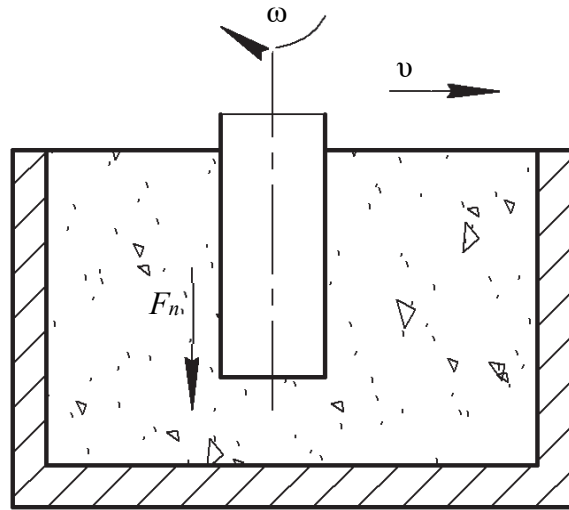
Інтэнсіўнасць зносу ў абразіўным прамежным пласце – функцыя шматлікіх пераменных.

$$I_h = \varphi(H_a, H_m, \sigma_m, \sigma_a, k_f, T), \quad (2.14)$$

дзе  $H_a$ ,  $H_m$  – цвёрдасць абразіву і матэрыялу адпаведна, ГПа;  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$  – трываласць матэрыялу і абразіву адпаведна, МПа;  $k_f$  – каэфіцыент формы;  $T$  – тэмпература, °С.

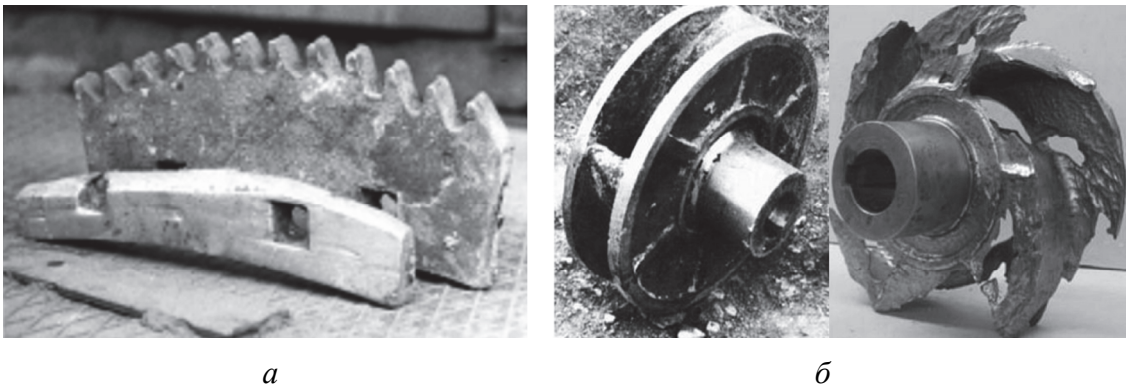
Знос у абразіўнай масе паказаны на рыс. 2.12. Гэты падвід зносу характэрны для ўсіх відаў змешвальнікаў, спіральнага гідракласіфікатара і г. д. Сюды ж можна аднесці знос прэс-формы і пуансона пры прасаванні. Тут яшчэ можа дабаўляцца і агрэсіўнасць асяроддзя. Знос

даволі высокі і патрабуе частай замены дэталей, напрыклад лопасцей змешвальнікаў.



Рыс. 2.12. Знос у абразіўнай масе

Наглядна знос у абразіўнай масе можна ўбачыць на двух фота-здымках, якія прадстаўлены на рыс. 2.13. На рыс. 2.13, *а* паказаны пачатковы і зношаны сектар футроўкі спіралі гідракласіфікатара праз чатыры месяцы работы. Прычым гэты сектар зроблены са зносаўстойлівага матэрыялу – чыгуну ИЧХ28Н2. На рыс. 2.13, *б* прадстаўлены вынік гідраабразіўнага зносу кола шламавай пясковай помпы, якое выраблена таксама са зносаўстойлівага чыгуну і працавала ўсяго 360 гадз.

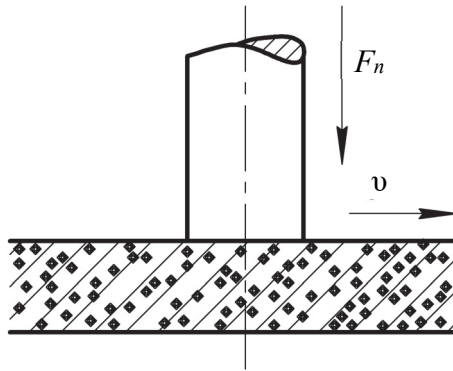


Рыс. 2.13. Знос у абразіўнай масе

*Знос на замацаваным абразіве* паказаны на рыс. 2.14. Замацаваным абразівам (маналітам) можа быць, напрыклад, бетонная пліта. Пры такім кантакце (трэнні) адбываецца знос не толькі металу, але і самога абразіву шляхам драблення і адшчаплення абразіўных часцінак.



Калі метал больш цвёрды і трывалы, то будзе разбурацца абразіў, а наадварот – будзе адбывацца рэзанне і дэфармаванне металу.



Рыс. 2.14. Знос па замацаваным абразіве

Інтэнсіўнасць зносу пры гэтым

$$I_h = \varphi(H_a, H_m, \sigma_m, \sigma_a, F_n, T). \quad (2.15)$$

Практычнае праяўленне такога зносу – шліфоўка каменю (граніту, бетону).

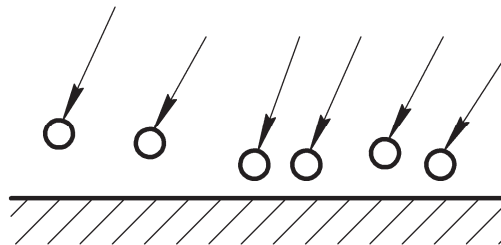
*Знос пры ўдары па замацаваным абразіве.* Тыповая рэалізацыя ўдару па абразіве – адбойны малаток (разбурэнне каменю, бетону). Прамы кантакт абразіўнай часцінкі ў межах ударніка ўтварае на ім паглыбленне ў выглядзе лункі.

Інтэнсіўнасць зносу пры гэтым

$$I_h = \varphi(H_a, H_m, \sigma_m, \sigma_a, F_n, m, v), \quad (2.16)$$

дзе  $m$  – маса часцінкі, кг;  $v$  – хуткасць часцінкі, м/с.

*Газаабразіўны знос* уяўляе сабой знос свабоднымі абразіўнымі часцінкамі, якія рухаюцца ў газавай плыні (рыс. 2.15). Тут, як і ў папярэднім выпадку, асноўны спосаб уздзеяння часцінак на метал – удар.



Рыс. 2.15. Газаабразіўны знос

Таму найбольш моцны ўплыў на інтэнсіўнасць зносу аказваюць такія фактары як,  $m$  і  $v$ . У выніку інтэнсіўнасць зносу складае

$$I_h = \varphi(m, v, \alpha, d, H_a, H_m, T). \quad (2.17)$$

Падрабязна газаабразіўны знос будзе разгледжаны ў наступнай тэме.

*Гідраабразіўны знос* па сваёй сутнасці вельмі падобны на газаабразіўны. Адрозненне заключаецца ў тым, што нясучым асяроддзем з'яўляецца вадкасць, часцей за ўсё вада. Вада аказвае дадатковы ўплыў на разрыў сувязей паміж часцінкамі металу, зніжаючы яго трываласць. Акрамя таго, у водным асяроддзі могуць праяўляцца такія з'явы, як кавітацыя, карозія, якія паскараюць працэс разбурэння матэрыялу. Гэтаму віду зносу падвяргаюцца дэталі пясковых помпаў, гідратурбін, гідрацыкланы, пульпаправоды.

Карысны эфект – гідраабразіўная рэзка металаў. Яна шырока выкарыстоўваецца ў хімічнай прамысловасці для вырабу дэталей з вялікай колькасцю фігурных адтулін. Гэта, напрыклад, трубная дошка кажухатрубных цеплаабменнікаў (рыс. 2.16).

Пры дапамозе гідраабразіўнага зносу рэзаць можна практычна любыя матэрыялы: чорныя металы і сплавы; цяжкаапрацоўвальныя легаваныя сталі і сплавы (у тым ліку жаратрывалыя і нержавеючыя); каляровыя металы і сплавы (медзь, нікель, алюміній, магній, тытан і іх сплавы); кампазіцыйныя матэрыялы; прыродныя і штучныя камяні (граніт, мрамур); шкло і кампазіцыйнае шкло (трыплекс, браняшкло, армаванае шкло, шклотэксталіт); бетон і жалезабетон.



Рыс. 2.16. Трубная дошка кажухатрубнага цеплаабменніка

Звычайна гідраабразіўнае абсталяванне мае наступныя рабочыя параметры:

- ціск ад 300 да 650 МПа;
- памеры абразіўных часцінак – да 600 мкм;
- хуткасць струменя – да 1200 м/с;
- сярэдні расход вады – 3,8 л/хвіл.

### 2.2.3. Вызначэнне абразіўнага зносу

Пры замацаваным абразіве інтэнсіўнасць зносу разлічваецца як пры звычайным мікрарэзанні:

$$I_h = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2(\gamma + 1)} \frac{p_a}{H}, \text{ м/м}, \quad (2.18)$$

дзе  $\operatorname{tg} \alpha = h / r = 0,5$ ;  $\gamma = 2$  (як пры тачэнні);  $p_a = F_n / A_a$ ;  $H$  – цвёрдасць паверхні, ГПа.

Больш таго, тут трэба ад лінейнага зносу перайсці да масавага:

$$I_h = \frac{h}{l}. \quad (2.19)$$

Далей можна шлях трэння ўявіць як

$$l = vt, \quad (2.20)$$

дзе  $v$  – хуткасць;  $t$  – час.

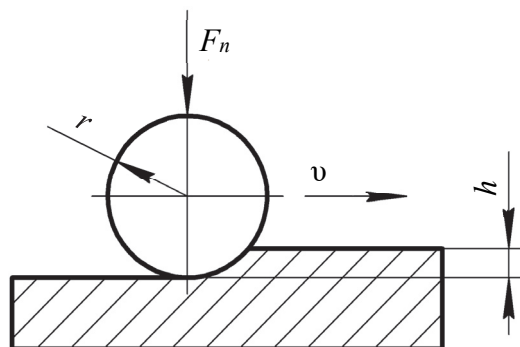
$$I_m = \frac{m}{lA_a}. \quad (2.21)$$

Некалькі другая сітуацыя пры зносе (мікрарэзанні) свабодным абразівам (сферычнай часцінкай). Абразіў звычайна круціцца і акругляецца – гэта сфера. Пры гэтым

$$\frac{h}{r} > \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right). \quad (2.22)$$

Для Ст10 (Ст3), напрыклад,  $\sigma_T = 250$  МПа, а  $\tau = 50$  МПа, тады лёгка можна разлічыць, што  $h / r = 0,3$ , а не 0,5.

Пры свабодным абразіве пясок рухаецца ўздоўж лопасці ўдарна-цэнтрабежнага млына (рыс. 2.17).



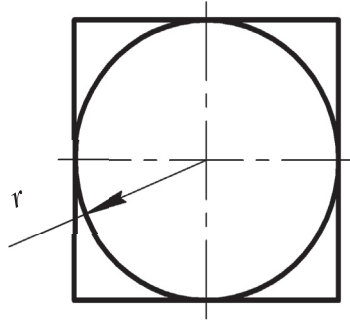
Рыс. 2.17. Рух абразіву ўздоўж лопасці

У якасці характэрнага параметра лепш прыняць аб'ёмную інтэнсіўнасць зносу ў выглядзе

$$w = \frac{Q_m}{Q_a}, \quad (2.23)$$

дзе  $Q_m$  – аб'ём металу, зразаемага ў адзінку часу адной часцінкай, м<sup>3</sup>/с;  
 $Q_a$  – расход абразіву праз элементарную пляцоўку з размерам  $2r$ .

Пляцоўка з размерамі паказана на рыс. 2.18.



Рыс. 2.18. Пляцоўка з размерамі

Плошча ячэйкі роўна  $4r^2$ . Плошча зрэзу абразіву складае  $\pi r^2$ .

Любы аб'ёмны расход  $Q = Av$ , дзе  $A$  – плошча;  $v$  – хуткасць.

Хуткасць зрэзкі металу роўна хуткасці абразіву.

Таму суадносіны аб'ёмных расходаў  $Q$  можна замяніць суадносінамі плошчаў, памножанымі на хуткасць.

$$w = \frac{A_m}{A_a} v, \quad (2.24)$$

дзе  $A_m$  – плошча сегмента зразаемага металу;  $A_a = \pi r^2$  – плошча зрэзу часцінкі абразіву.

З геаметрыі вядома, што вугал сектара, які абмяжоўвае сегмент заглыблення часцінкі, роўны

$$\alpha = \arccos \frac{r-h}{r}, \quad (2.25)$$

дзе  $\alpha$  – вугал, рад;  $h$  вызначаецца з суадносін  $h/r$  па формуле (2.22).

Плошча самога сегмента заглыблення

$$A_m = \frac{1}{2} r^2 (\alpha - \sin \alpha). \quad (2.26)$$

Такім чынам, паслядоўнасць вызначэння зносу будзе такой:

$$\frac{h}{r} \rightarrow h \rightarrow A \rightarrow w. \quad (2.27)$$

Прычым калі падставіць усе параметры ў сістэме СІ, то атрымаем аб'ёмны знос  $w$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, зрэзанага металу.

## 2.3. Ударна-абразіўны знос

### 2.3.1. Механізм ударна-абразіўнага зносу

Ударна-абразіўны знос даволі часта сутракаецца ў прамысловых і бытавых умовах. Ён з'яўляецца спадарожнікам працэсу здрабнення матэрыялаў ва ўдарных млынах, калі хуткасць абразіўных часцінак дасягае 200 м/с. Пры такой хуткасці інтэнсіўнасць зносу даволі вялікая. У выніку рэсурс бесперапыннай работы ўдарных млыноў складае ўсяго некалькі дзясяткаў гадзін. Так, ротар ударна-цэнтрабежнага млына пры памале кварцавага пяску мае рэсурс усяго 36 гадз. Дарэчы, кварцавы пясок з'яўляецца адным з самых абразіўных матэрыялаў і часта бярэцца ў якасці эталоннага асяроддзя пры даследаванні працэсу зносу. Трэба зазначыць, што высокая абразіўнасць пяску выкарыстоўваецца як дадатны фактар, напрыклад, у працэсе пескаструменнай апрацоўкі. Яна нараўне са шротаструменнай з'яўляецца асноўным спосабам выдалення акаліны, аксіднай плёўкі з металічных паверхняў.

*Пескаструменная апрацоўка (пескаструменная ачыстка)* – агульнапрынятае выкарыстанне струменнага метаду ачыткі паверхняў. Дадзены метады адносяцца да халоднай апрацоўкі паверхні без выкарыстання хімічных рэагентаў. Менавіта гэты адрозненне дапамагло знайсці шырокае ўжыванне струменнага метаду для ачыткі металічных нарыхтовак ад акаліны, старой фарбы, іржы і іншых забруджванняў, для аб'ястлушчвання металічных нарыхтовак перад фарбоўкай, газатэрмічным напыленнем, гальванатэхнічнымі і таму падобнымі аперацыямі ачыткі. Гэты спосаб апрацоўкі выкарыстоўваецца таксама для дэкаратаўнага матавання шкла, стварэння дэкаратаўнай «шурпатасці» паверхні.

У залежнасці ад кампануюкі абсталявання і часцінак (абразіву), якія выкарыстоўваюцца, струменныя ўстаноўкі маюць тры асноўныя разнавіднасці:

- абразіваструменная (сухі пясок або іншы абразіўны парашок распаляецца струменем паветра);
- гідрапнеўмаабразіўная (выкарыстоўваецца паветра з вадой і абразівам);

– гідраструменная (ачыстка толькі струменем вады ці іншай вадкасці).

Сучасныя тэхналогіі пескаструменнай апрацоўкі выкарыстоўваюць наступныя тэхналогіі:

– гідрапнеўмаабразіўная ачыстка, у якой вада выкарыстоўваецца для пылепадаўлення і павелічэння эфектыўнасці струменнай ачысткі;

– газадынамічная ачыстка з разгонам абразіву ў рэактыўным струмені да хуткасці 300 м/с;

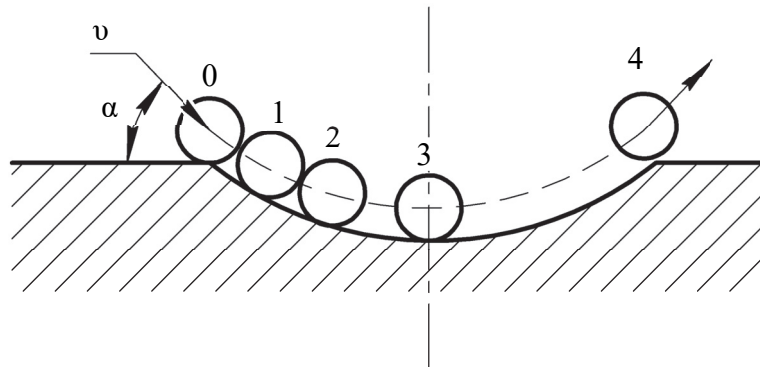
– гідраструменная ачыстка пlynню вады з розным ціскам (ад 10 да 750 МПа);

– гідраабразіўная ачыстка пlynню вады з розным ціскам, які нясе ў сабе абразіў і/або інгібітар;

– ачыстка сухім лёдам.

Спецыфіка ўдарна-абразіўнага зносу абумоўлена самім ударам, як высокаэнергетычным працэсам, сканцэнтраваным на невялікай плошчы.

Пры ўдары абразіўнай часцінкі аб плоскую паверхню адбываецца дэфармацыя гэтай паверхні з утварэннем лункі (паглыблення). Прычым пры праходжанні часцінкі праз лунку на паверхні паслядоўна ажыццяўляюцца працэсы, адлюстраваныя на рыс. 2.19.



Рыс. 2.19. Дэфармацыя паверхні пры ўдары абразіўнай часцінкі:

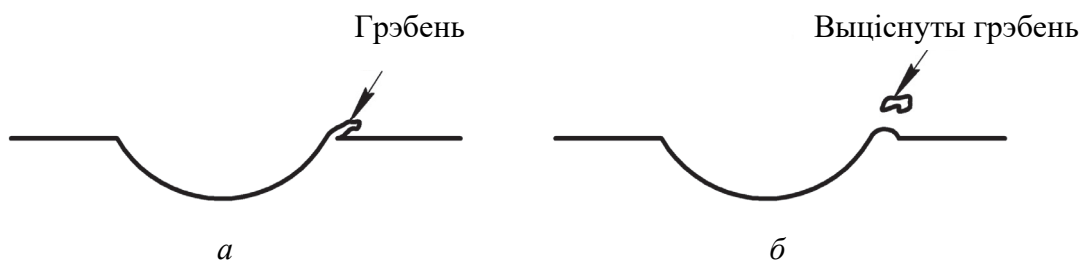
0-1 – пругкая дэфармацыя; 1-2 – пластычная дэфармацыя;

2-3 – плаўленне металу; 3-4 – вынас металу з лункі

Устаноўлена, што пры хуткасці 250 м/с усе металы плавяцца. Аднак у асобных выпадках тэмпература плаўлення дасягаецца пры 20 м/с ( $T_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$ ).

Выціснуты з лункі матэрыял утварае грэбень (рыс. 2.20).

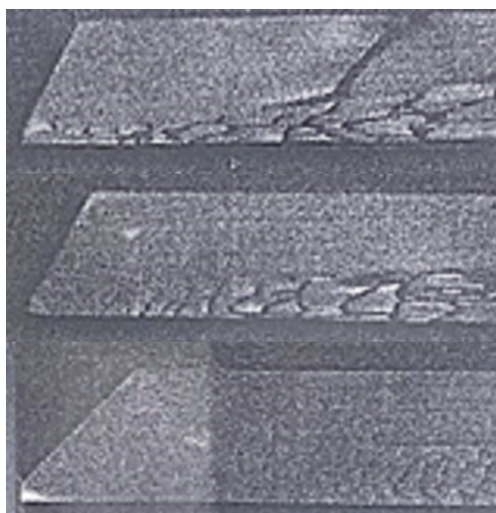
Выціснуты і моцна дэфармаваны грэбень мае слабую сувязь з асноўным матэрыялам і ў далейшым пры наступным удары разбураецца. Пры хуткасці часцінак больш за 180 м/с ён разбураецца на працягу аднаго ўдару.



Рыс. 2.20. Выціснуты з лункі матэрыял (грэбень)

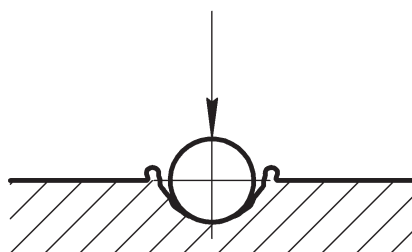
У працэсе зносу ад пачатковых лунак з грабянямі ўтвараюцца характэрныя хвалі на паверхні металу (рыс. 2.21).

Максімальныя няроўнасці атрымліваюцца на пачатковым этапе (0,5–1 хвіл). Пры далейшых ударах адбываецца паступовае выраўноўванне, загладжванне хвалістай паверхні, якая застаецца стабільнай да канца апрацоўкі.



Рыс. 2.21. Хвалі на паверхні металу

На рыс. 2.22 паказаны асаблівасці паверхні матэрыялу, якія назіраюцца пры прамым удары пад вуглом  $90^\circ$ .



Рыс. 2.22. Спецыфіка прамога ўдару часцінкі аб паверхню металу

У гэтым выпадку матэрыял выціскаецца ва ўсе бакі і застаецца на краях лункі. Таму пры ўдарах паверхня атрымліваецца больш роўнай, без яўнай хвалістасці. І, наадварот, пры змяншэнні вугла ( $\alpha < 70^\circ$ ), магчымы чысты працэс мікрарэзання.

### 2.3.2. Уплыў розных фактараў на ўдарна-абразіўны знос

Ударна-абразіўны знос істотна адрозніваецца ад другіх. Сумарны знос тут залежыць ад колькасці часцінак, лепш сказаць, ад колькасці іх саўдарэнняў аб паверхню.

Таму ў дадзеным выпадку інтэнсіўнасць зносу вызначаецца як адносіны страты масы ўзору  $\Delta m$ , кг/с, да масавага расходу абразіву  $Q$ , кг/с:

$$w_g = \frac{\Delta m}{Q}, \text{ кг/кг.} \quad (2.28)$$

Пры гэтым аб'ёмная інтэнсіўнасць

$$w_V = \frac{\Delta V}{Q} = \frac{\Delta m}{Q\rho}, \text{ м}^3/\text{кг (мм/кг)}, \quad (2.29)$$

дзе  $\rho$  – шчыльнасць абразіву, кг/м<sup>3</sup>.

Яшчэ адзін параметр – адносная зносаўстойлівасць матэрыялу.

$$\varepsilon = \frac{w_{\text{эг}}}{w_g}, \quad (2.30)$$

дзе  $w_{\text{эг}}$  – інтэнсіўнасць зносу для эталоннага матэрыялу.

А цяпер разгледзім уплыў розных фактараў на інтэнсіўнасць  $w$ .

1. *Хуткасць удару*. Агульна прызнана, што гэта залежнасць гэта блізкая да квадратычнай (рыс. 2.23):

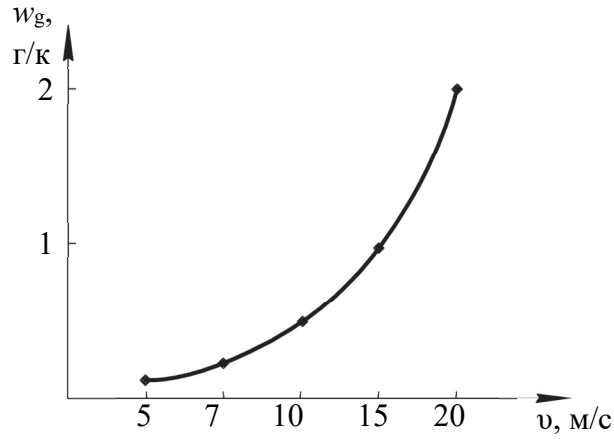
$$w = av^b, \quad (2.31)$$

дзе  $a$  і  $b$  – эмпірычныя каэфіцыенты.

Усе вопыты праведзены ва ўмовах  $H_a > H_m$ , дзе  $H_a$  і  $H_m$  – цвёрдасць па Брынэлю для абразіву і матэрыялу адпаведна.

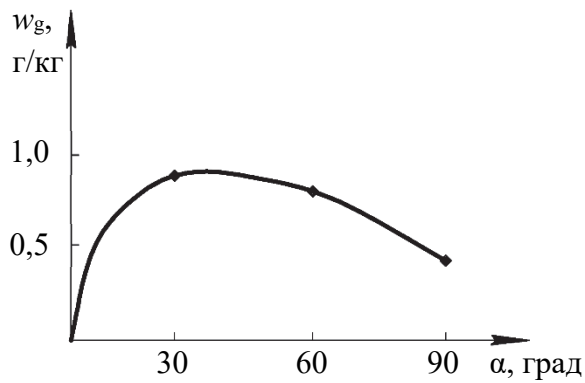
Намі выкарыстаны эксперыментальныя даныя, у якіх у якасці зношваемага матэрыялу выкарыстоўвалася сталь Ст3, у якасці абразіву – тонкадысперсны кварцавы пясок. У працэсе вопытаў змяняліся хуткасць удару  $v$ , м/с; вугал атакі  $\alpha$ , град; размер часцінак абразіву  $d$ , мм; канцэнтрацыя абразіву  $C$ , г/см<sup>2</sup>·с.





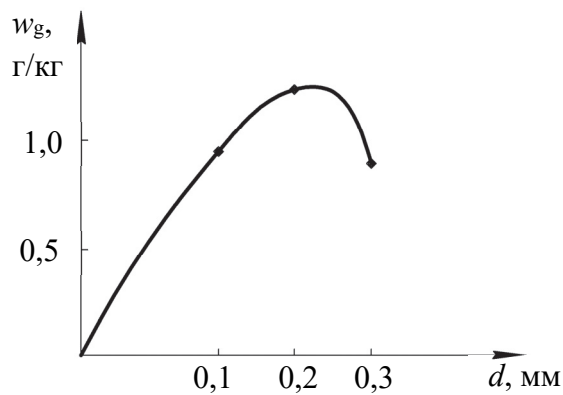
Рыс. 2.23. Залежнасць інтэнсіўнасці зносу ад хуткасці

2. *Вугал атакі.* Аб тым, што пры вугле  $\alpha < 20^\circ$  і вугле  $\alpha = 90^\circ$  будзе назірацца змяншэнне зносу (рыс. 2.24), сказана ў папярэднім пытанні.



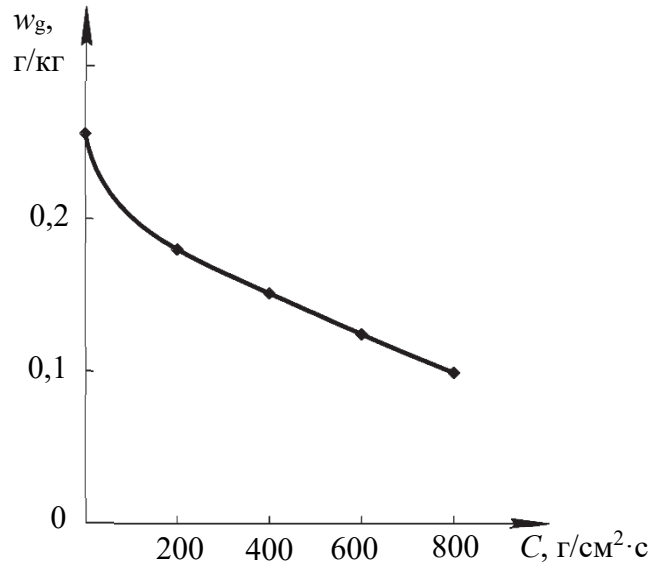
Рыс. 2.24. Залежнасць інтэнсіўнасці зносу ад вугла атакі

3. *Размер часцінак.* Бачна, што да 200 мкм  $w_g$  павялічваецца (рыс. 2.25), а затым зніжаецца, праходзячы праз максімум.



Рыс. 2.25. Залежнасць інтэнсіўнасці зносу ад размеру часцінак

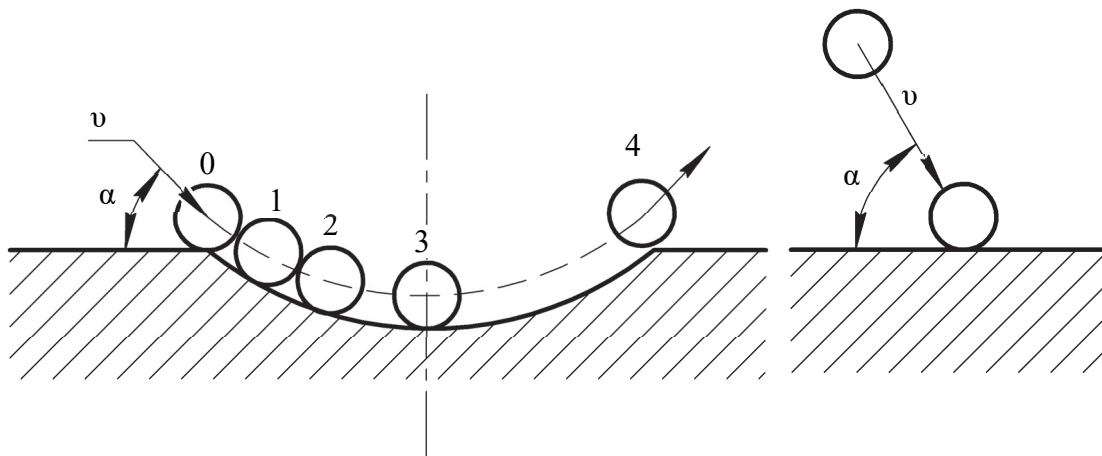
4. *Канцэнтрацыя часцінак* (рыс. 2.26). Пад канцэнтрацыяй разумеецца колькасць матэрыялу, які ўдарыўся ў адзінку часу аб адзінку плошчы. Пры павышэнні канцэнтрацыі не ўсе часцінкі далятаюць да паверхні, ёсць удары адной аб другую. Таму з павелічэннем канцэнтрацыі знос змяншаецца.



Рыс. 2.26. Залежнасць інтэнсіўнасці зносу ад іх канцэнтрацыі

### 2.3.3. Прагназаванне ўдарна-абразіўнага зносу

Найбольш дасканалай для вызначэння ўдарна-абразіўнага зносу з'яўляецца методка, распрацаваная нямецкімі спецыялістамі Бэкманам Д. Ф. і Гоцманам Ф. Мінавіта імі прапанавана фізічная мадэль ударна-абразіўнага зносу, разгледжаная вышэй. Прадубліруем яе (рыс. 2.27).



Рыс. 2.27. Фізічная мадэль ударна-абразіўнага зносу

Траекторыю руху часцінкі ў матэрыяле прапануецца раздзяліць на некалькі адрэзкаў:

0-1 – пругкая дэфармацыя з магчымасцю аднаўлення;

1-2 – пластычная дэфармацыя, пры якой ажыццяўляецца толькі дэфармацыйная работа;

2-3 – пластычная дэфармацыя і плаўленне – пачатак выдалення матэрыялу;

3-4 – зрух пластоў і вынас расплаву.

У якасці асноўнай характарыстыкі (інтэнсіўнасці) зносу прыняты аб'ёмны параметр

$$w_V = \frac{\Delta V}{t}, \text{ мм}^3/\text{кг}, \quad (2.32)$$

дзе  $\Delta V$  – змяненне аб'ёму ўзору за час вопыту,  $\text{мм}^3/\text{с}$ ;  $t$  – масавы расход абразіву,  $\text{кг}/\text{с}$ .

З фізічнай мадэлі Бэкмана і Гоцмана ясна, што механізм выдалення металу з лункі на стадыях (2-3) і (3-4) – розны. Таму формула, прапанаваная імі, мае выгляд

$$w = \frac{3}{4\pi\rho_\alpha e_s^*} (\tau_{s1}j_1 + \tau_{s2}j_2), \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.33)$$

дзе  $\rho_\alpha$  – шчыльнасць абразіву,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $e_s^*$  – шчыльнасць энергіі зрэзу,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $\tau_{s1}$  і  $\tau_{s2}$  – трываласць адгезійных сувязей на зрэз для адпаведных дзвюх стадый, Па;  $j_1$  і  $j_2$  – параметры, якія характарызуюць змяненне паверхні пры зрэзе, аднесенае да аб'ёму часцінкі,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Трэба зазначыць, што пры вывадзе разліковай залежнасці выкарыстоўваліся такія вядомыя параметры, як інтэнсіўнасць лінейнага зносу, фактычная і намінальная плошчы кантакту, трываласць адгезійных сувязей, глыбіня пранікнення, цвёрдасць паверхні. Бэкманам і Гоцманам прадстаўлена разгорнутая метадыка разліку з вызначэннем усіх параметраў, якія ўваходзяць у разліковую формулу. Большасць з іх залежаць ад глыбіні лункі. Адначасова для паверхняў з вялікім модулем пругкасці і высокай шчыльнасцю (металы) прапанавана спрошчаная метадыка. Для разліку зносу па ёй уводзіцца дадатковы параметр

$$\psi = v \left( \frac{2\rho_\alpha}{3H} \right)^{0,5}. \quad (2.34)$$

З выкарыстаннем гэтага параметра вызначаліся ўсе іншыя паказчыкі, якія ўваходзяць ў разліковыя ўраўненні:

$$\tau_{s1} = \tau_0 + \left( \frac{\psi \sin \alpha}{2} \right)^{0,5} H; \quad (2.35)$$

$$\tau_{s2} = \tau_0 + \left( \frac{2\psi \sin \alpha}{1 - \psi \sin \alpha} \right)^{0,5} H, \quad (2.36)$$

дзе  $\tau_0$  – трываласць адгезійных сувязей пры адсутнасці сілы ціску  $F_n$ , Па;  $\alpha$  – вугал атакі пры ўдары, град.

Велічыня  $\tau_0$  з’яўляецца характарыстыкай матэрыялу, з якога зроблены вузел. Для матэрыялаў з асноўнымі кампанентамі жалезам  $\tau_0 = 1320$  МПа, з алюмініем – 400 МПа. Параметр, які характарызуе змяненне адноснай павярхні пры зрэзе, разлічваецца так:

$$j_1 = 6,81\psi^{2,5} \cos^2 \alpha (\sin \alpha)^{0,5}; \quad (2.37)$$

$$j_2 = 0,65\psi^2 \sin^2 \alpha. \quad (2.38)$$

Засталася не вызначанай шчыльнасць энергіі зрэзу, гэта таксама канстанта матэрыялу:

$$e_s^* = k_1 q \rho_m, \quad (2.39)$$

дзе  $k_1$  – эмпірычны каэфіцыент;  $q$  – цеплыня плаўлення металу, Дж/кг;  $\rho_m$  – шчыльнасць металу, кг/м<sup>3</sup>.

Ёсць эксперыментальныя даныя для розных матэрыялаў:

Ст3 –  $e_s^* = 46\,500$  МПа;  $H = 1300$  МПа.

У8А –  $e_s^* = 13\,500$  МПа;  $H = 8500$  МПа.

Вызначана, што методика разліку дае добрыя вынікі пры  $v < 120$  м/с,  $\alpha > 7^\circ$ ,  $r_a > 0,1$  мм (100 мкм). Асноўны ўплыў на знос аказваюць хуткасць удару і вугал атакі.

## 2.4. Спосады павышэння зносаўстойлівасці

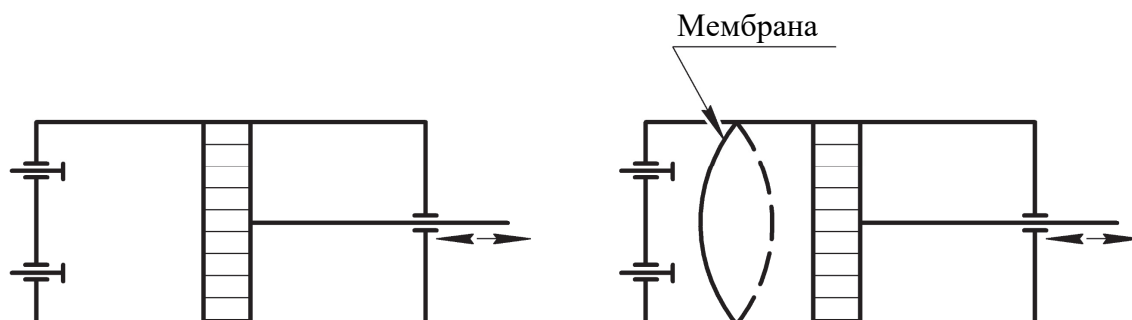
### 2.4.1. Канструкцыйныя спосады

Да канструкцыйных спосадаў павышэння зносаўстойлівасці можна аднесці тыя спосады, якія закладваюцца на стадыі вырабу машыны.

1. *Выключэнне знешняга трэння.* Прадугледжвае выключэнне непасрэднага кантакту механічных павярхняў. Прыклад – замена поршневай помпы на мембранную (рыс. 2.28).

2. *Выбар аптымальнай канструкцыйнай схемы машыны, які ўключае:*

- рацыянальную арганізацыю змазкі;
- магчымасць рэгуліроўкі зазораў у трыбаспалучэннях;
- магчымасць аператыўнай замены зношаных дэталяў;
- улік магчымага тэмпературнага расшырэння дэталяў і забеспячэнне зазораў на яго кампенсацыю.



Рыс. 2.28. Спосабы павышэння зносаўстойлівасці

3. *Выбар матэрыялаў для трыбаспалучэння.* Не рэкамендуецца выкарыстоўваць у трыбаспалучэннях вельмі мяккі матэрыял і аднолькавыя па прыродзе матэрыялы. Аптымальным з’яўляецца спалучэнне цвёрдага матэрыялу з мяккім (сталі – бабіт, сталі – бронза). Перспектыўна выкарыстанне палімераў.

4. *Выбар матэрыялаў пры знешнім кантакце з абразівам.* Найбольш зносаўстойлівыя матэрыялы прадстаўлены ў табліцы.

#### Найбольш зносаўстойлівыя матэрыялы

Матэрыял	Каэфіцыент зносаўстойлівасці $k_{з,у}$
Сталь 35	1,0
Храміраваная сталь 40Х	1,38
Марганцовістая сталь 65Г	1,65
Марганцовістая ліцейная сталь 110Г13Л	2,02
Белы чыгун БЧ	3,12
Інструментальны чыгун з дабаўленнем хрому ІЧХ (34Х)	3,61

Каэфіцыент зносаўстойлівасці  $k_{з,у}$  – гэта час напрацоўкі да нейкага канкрэтнага зносу ў асяроддзі кварцавага пяску. У апошні час пачалі шырока выкарыстоўвацца карбіды металаў (крэмнію – SiC, вальфраму – WoC, бору – BC). Іх кошт у 3 разы вышэйшы за чыгун ІЧХ (34Х), а зносаўстойлівасць большая ў 5 разоў. Але гэтыя матэрыялы баяцца ўдарных нагрузак.

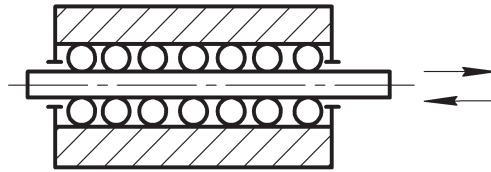
У гідраабразіўным асяроддзі вельмі добра зарэкамендавала сябе зносаўстойлівая гума на аснове каўчуку марак СКД. Яна ў 50 разоў больш устойлівая, чым Ст3 у тым жа абразіве (пяску). Таму дэталі альбо

гуміруюць (трубаправоды) альбо выконваюць у выглядзе зменных элементаў (накладкі змешвальнікаў, футроўка млыноў).

5. *Зніжэнне трэння*, якое прадугледжвае:

– замену трэння слізгацця на трэнне качэння, што можна зрабіць пры лінейным перамяшчэнні (рыс. 2.29);

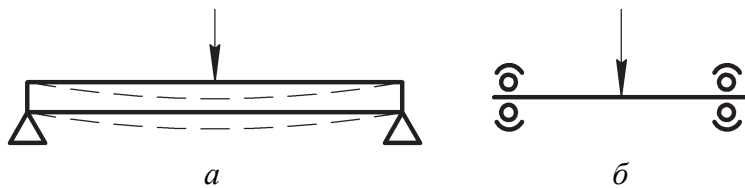
– паляпшэнне ўмоў трэння.



Рыс. 2.29. Замена трэння слізгацця на трэнне качэння

6. *Выкарыстанне прынцыпу самаарганізацыі*, які ўключае:

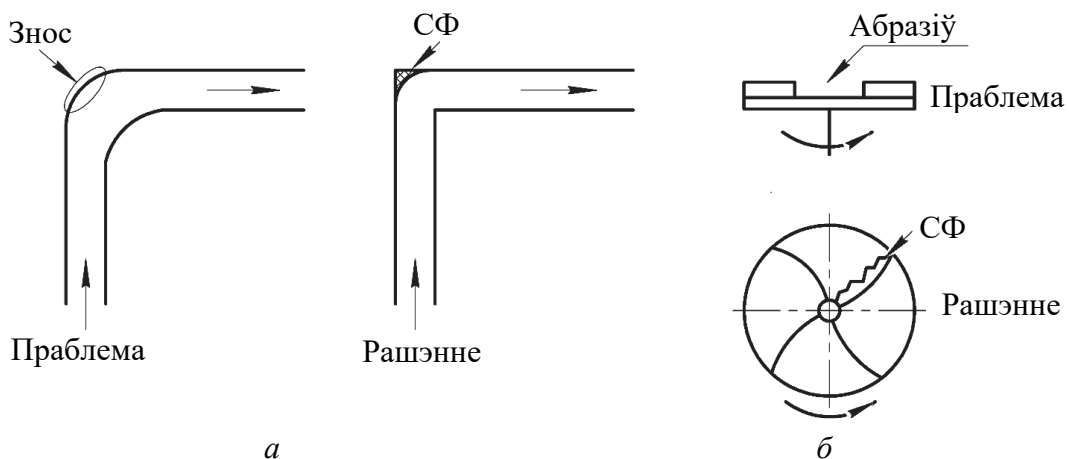
– самаўстаноўку. Пры вялікіх выгінальных нагрузках на доўгія пралёты (барабанны млын) яны прагінаюцца (рыс. 2.30, а). У выніку разбіваецца падшыпнік. Выхад – устаноўка сферычных падшыпнікаў (рыс. 2.30, б);



Рыс. 2.30. Самаўстаноўка:

а – прагінанне доўгіх пралётаў; б – устаноўка сферычных падшыпнікаў

– самафутроўку (рыс. 2.31), у якой рэалізуецца вынаходніцкі прынцып пасрэднага.



Рыс. 2.31. Самафутроўка:

а – калена трубаправода; б – лопасці ўдарна-цэнтрабежнага млына

Самафутроўка ўтвараецца на паверхні пласта таго абразіўнага матэрыялу, які перамяшчаецца. У далейшым знешняе трэнне ператвараецца ва ўнутранае трэнне абразіву.

#### 2.4.2. Тэхналагічныя спосады

Пад тэхналагічнымі разумеюцца ўсе спосады, звязаныя з вырабам вузлоў і дэталей машын.

1. *Правільны выбар шурпатасці паверхняў.* Незалежна ад зыходнай шурпатасці да канца прыпрацоўкі трыбаспалучэнняў усталёўваецца так званая раўнаважная шурпатасць, якая захоўваецца на працягу доўгага часу. Таму пачатковую шурпатасць трэба прызначыць як мага бліжэй да раўнаважнай. Раўнаважная бярэцца і рэкамендуецца з вопыту эксплуатацыі.

Напрыклад:

– падшыпнікі слізгацення –  $R_a = 0,15$  мкм;

– зубы шасцерняў –  $R_a = 0,7-0,8$  мкм.

Грубая апрацоўка (вялікая шурпатасць) забяспечвае кантакт на малых пляцоўках (выступах), а значыць, пры высокіх цісках, што павялічвае знос. Занадта гладкія паверхні схільны да заліпання (малекулярная складальная трэння), схоплівання і, як следства, да задзірын.

2. *Тэрмічная і хіміка-тэрмічная апрацоўка.* Асноўная задача такой апрацоўкі – павышэнне цвёрдасці паверхневага пласта (да 2 мм). Зносаўстойлівасць металаў пры гэтым павышаецца ў сярэднім на 30% (цыяніраванне, азатаванне і г. д.).

3. *Электрахімічныя пакрыцці.* Пакрыццё паверхні метадам электrolізу. Часцей за ўсё гэта хіміраванне для павышэння цвёрдасці паверхняў. Для падшыпнікаў слізгацення, дзе важна хутчэйшая прыпрацоўка паверхняў, – гэта пакрыццё волавам і свінцом.

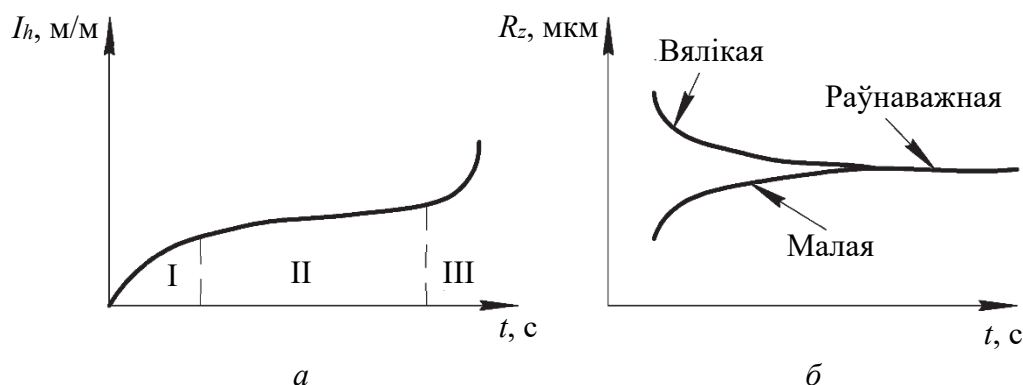
4. *Наплаўка і напыленне* (электратэрмічныя метады). Наплаўка ажыццяўляецца цвёрдымі матэрыяламі і сплавамі з дапамогай электрадугавога метаду. Напыленне адбываецца шляхам нанясення цвёрдых парашкападобных часцінак з дапамогай газу. Па тэхналогіі гэта можа быць газаплазменнае, электрадугавое ці ТВЧ-напыленне. Напыляюць цвёрдыя сплавы, карбіды, кераміку, шкло, палімеры (поліўрэтан).

5. *Механічнае павышэнне цвёрдасці* (дэфармацыйнае). Гэта абкатка паверхні дэталей ролікамі, шарыкамі, струменная апрацоўка стальнымі шарыкамі.

### 2.4.3. Эксплуатацыйныя спосады

У працэсе эксплуатацыі знос дэталей і вузлоў не застаецца пастаянным. Ён змяняецца на крывой Лорэнца В. Ф. (рыс. 2.32). Асноўныя этапы: I – прыпрацоўка; II – стабільны знос; III – катастрафічны знос.

Працэс прыпрацоўкі характарызуецца змяненнем мікрагеаметрыі, аддзяленнем ад паверхні прадуктаў зносу, павышэннем тэмпературы. У канцы працэсу прыпрацоўкі ўсталёўваецца раўнаважная шурпатасць, характэрная для канкрэтнага матэрыялу.



Рыс. 2.32. Залежнасці зносу (а) і раўнаважнай шурпатасці (б) ад часу

Працэс усталяванага зносу характарызуецца невялікімі стратамі металу. Ён працягваецца да таго часу, пакуль размеры і форма цел (дэталей) не пачнуць аказваць істотны ўплыў на іх работу ці пакуль не настане мяжа стомленасці матэрыялу.

Катастрафічны (аварыйны) знос адбываецца тады, калі да механічнага зношвання дадаецца стомленасць, старэнне, карозія матэрыялу.

Эксплуатацыйнымі мерамі, якія падаўжаюць тэрмін службы машын з'яўляюцца:

а) абкатка машын – гэта час прыпрацоўкі дэталей з дасягненнем раўнаважнай шурпатасці. Яе праводзяць пры паніжанай нагрузцы ва ўмовах добрай змазкі з абавязковым кантролем тэмпературы. Заканчэнне гэтага перыяду фіксуецца па стабілізацыі каэфіцыента трэння і тэмпературы. Абкатку часта праводзяць на спецыяльных стэндах;

б) захаванне перыядычнасці тэхнічнага абслугоўвання. Пры адсутнасці тэхналагічнага абслугоўвання знос трыбаспалучэння апісваецца крывой  $I$  (рыс. 2.33).

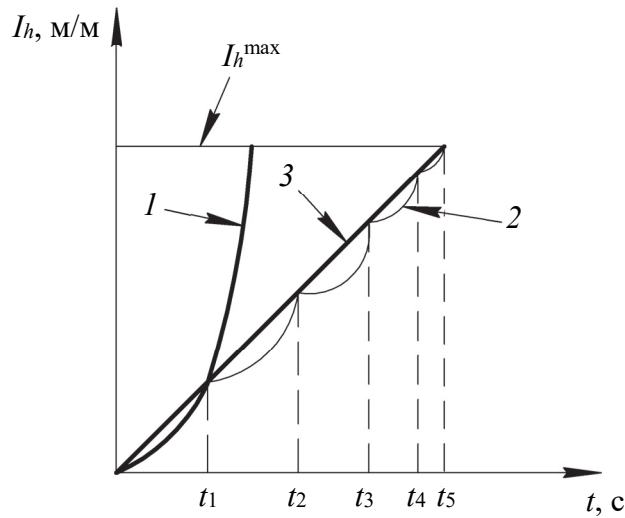
Для яе

$$I_h = \alpha + bt^k, \quad (2.40)$$

дзе  $\alpha$ ,  $b$ ,  $k$  – эмпірычныя каэфіцыенты. Напрыклад, для падшыпнікаў слізгацення  $k = 1,5$ .

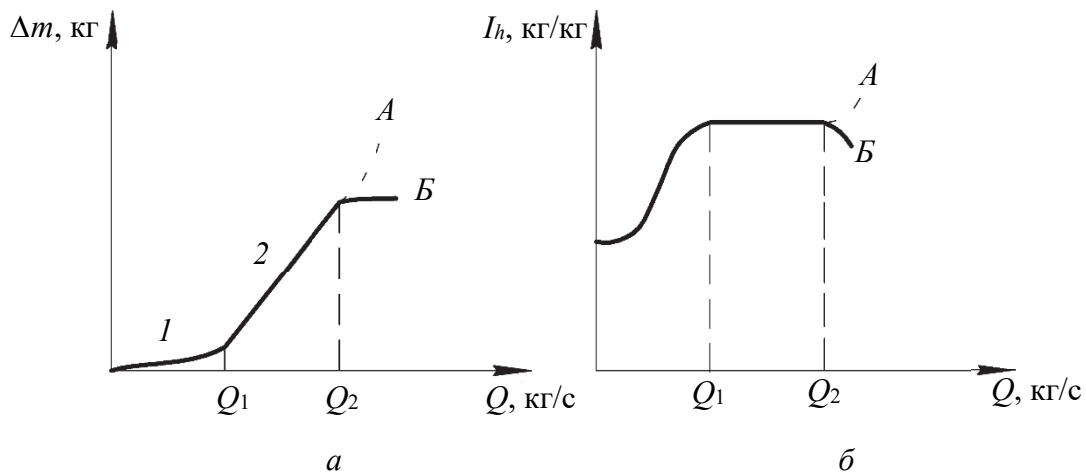


Максімальны памежны знос  $I_h^{\max}$  пры адсутнасці перыядычнага абслугоўвання наступае вельмі хутка. Павелічэнне часу да яго дасягаецца пры перыядычным тэхнічным абслугоўванні і рамонтах, што паказана крывымі 2, якія апраксімуюцца з невялікай пагрэшнасцю прамой 3. На гэтым графіку паказана, што час міжрамонтнага абслугоўвання паступова змяншаецца.



Рыс. 2.33. Знос трыбаспалучэння

Спецыфічная, але падобная залежнасць атрымана і для ўдарна-абразіўнага зносу (рыс. 2.34).



Рыс. 2.34. Змяненне масы (а) і інтэнсіўнасці (б) зносу ад расходнага абразіва:  
 1 – пераменная інтэнсіўнасць; 2 – стабілізацыя;  
 3 – працяглы працэс; А – паскораны (крохкі і  $\alpha_{\min}$ );  
 Б – запаволены (пластычны і  $\alpha_{\text{ср}}$ ).

Інтэнсіўнасць зносу тут разлічваецца па формулах:

$$I_m = \frac{\Delta m}{Q}; \quad (2.41)$$

$$I_v = \frac{\Delta V}{Q} = \frac{\Delta m}{\rho Q}. \quad (2.42)$$

Такім чынам, у апошняй тэме сканцэнтравана разгледжаны асноўныя спосабы павышэння зносаўстойлівасці вузлоў і дэталей машын. Гэта самы галоўны вынік другога раздзела, накіраванага на вывучэнне і прагназаванне абразіўнага зносу.

## ЗАКЛЮЧЭННЕ

У выніку можна сказаць, што трыбалогія з'яўляецца вельмі важнай сферай дзейнасці чалавека любой спецыяльнасці, і інжынеры-механікі не выключэнне, таму вывучэнне аднайменнай дысцыпліны ў час падрыхтоўкі гэтых спецыялістаў вельмі неабходна.

Тэарэтычная накіраванасць у вывучэнні дысцыпліны праяўляецца пры вылучэнні ў трэнні дзвюх складальных: малекулярнай і дэфармацыйнай. Пры гэтым праведзена дакладнае раздзяленне паміж трываласцю глыбінных пластоў матэрыялу і трываласцю адгезійных сувязей, знешнім і ўнутраным трэннем, атрыманы залежнасці для разліку адпаведных каэфіцыентаў трэння.

Яшчэ больш цікавымі можна лічыць тэарэтычныя напрацоўкі ў напрамку вывучэння зносу матэрыялаў. Тут паказана цесная сувязь паміж зносам і трэннем, асабліва ў трыбаспалучэннях. Для іх, у першую чаргу, характэрны стомленасны знос, які праяўляецца ў выніку шматразовага дэфармавання мікрааб'ёмаў матэрыялаў.

Асобную цікавасць для спецыялістаў, звязаных з хімічнай прамысловасцю і вытворчасцю будматэрыялаў, мае абразіўны і акісляльны знос, а таксама іх камбінацыя. Першы праяўляецца ў выглядзе зносу ў прамежкавым пласце і як ударна-абразіўны. Ён узмацняецца пры наяўнасці каразійнага асяроддзя. Нягледзячы на ўсе складанасці, навукоўцам удалося атрымаць даволі адэкватныя метадыкі разліку інтэнсіўнасці абразіўнага зносу.

Разам з тым аналіз розных напрамкаў тэарэтычных даследаванняў трэння і зносу паказвае, што да апошняга часу застаецца шмат невырашаных праблем. Гэта асабліва адносіцца да павышэння дакладнасці разліковых залежнасцей і, напрыклад, уплыву карозіі матэрыялаў на абразіўны знос.

Увогуле, усе тэарэтычныя даследаванні ўрэшце рэшт маюць практычную накіраванасць. Дасканалы разлік каэфіцыентаў трэння ў трыбаспалучэннях дазваляе павысіць дакладнасць разліку магутнасці прываду тэхналагічных машын, вызначыць шляхі зніжэння энергавыдаткаў. Разлік абразіўнага зносу дае магчымасць прагназаваць яго на стадыі распрацоўкі новых машын і апаратаў, а таксама прадугледжваць спосабы яго змяншэння.

Па заканчэнні можна зазначыць, што трыбалогія даволі маладая навука, якая знаходзіцца на стадыі інтэнсіўнага развіцця. Ёй могуць займацца спецыялісты з рознай адукацыяй, у тым ліку і выпускнікі нашай спецыяльнасці.

## ЛІТАРАТУРА

1. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Пенкин, Н. С. Основы трибологии и триботехники / Н. С. Пенкин, А. Н. Пенкин, В. М. Сербин. – М.: Машиностроение, 2008. – 206 с.
3. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2002. – 632 с.
4. Клейс, У. Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / У. Р. Клейс. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
5. Барсуков, В. Г. Триботехника дисперсных материалов / В. Г. Барсуков. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 260 с.
6. Богданович, П. Н. Трение, смазка и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск: Технология, 2011. – 528 с.
7. Беркович, И. И. Трибология, физические основы, механика и технические приложения / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
8. Машков, Ю. К. Трибология конструкционных материалов / Ю. К. Машков. – Омск: ОмГТУ, 1996. – 99 с.
9. Справочник по триботехнике: в 3 т. / сост.: М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.

## Дадапковая

10. Виноградов, В. Н. Механическое изнашивание сталей и сплавов / В. Н. Винаградов. – М.: Недра, 1996. – 364 с.
11. Кащеев, В. Н. Абразивные разрушения твердых тел / В. Н. Кащеев. – М.: Наука, 1970. – 248 с.
12. Тененбаум, М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
13. Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, К. Н. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
14. Белый, А. В. Трибология. Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ / А. В. Белый, К. Лудема, Н. К. Мышкина. – М.: Машиностроение, 1993. – 454 с.

15. Чихос, Х. Системный анализ в триботехнике / Х. Чихос. – М.: Мир, 1990. – 351 с.

16. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.

17. Трение и износ: науч.-техн. журн. [Электронный ресурс] // Гомел. ин-т механики металлополимерных систем Нац. акад. наук Беларуси. – Гомель, 2022. – Режим доступа: <https://nasb.gov.by/rus/publications/nauchnye-zhurnaly/trenie.php>. – Дата доступа: 20.12.2022.

Вучэбнае выданне

Ваўцяховіч Пётр Яўгенавіч  
Мыцько Дзмітрый Юр'евіч

# ТРЭННЕ І ЗНОС

Вучэбна-метадычны дапаможнік

Рэдактар *Т. Я. Самсановіч*  
Камп'ютарная вёрстка *В. А. Саладкевіч*  
Карэктар *Т. Я. Самсановіч*

Выдавец:

УА «Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт».  
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,  
распаўсюдніка друкаваных выданняў  
№ 1/227 ад 20.03.2014.  
Вул. Свядлова, 13а, 220006, г. Мінск.