

**Бучинський М.Я.,
Мохній І.Ю.,
Чернявський А.М.**

ШЛІФУВАННЯ ЕМАЛЬОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

Київ
Видавництво Ліра-К
2020

УДК 621.923.7

Б49

Рекомендовано до друку на засіданні вченої ради механіко-технологічного факультету Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу 15 червня 2011 року, протокол №9.

Рецензенти:

- завідувач кафедри «Технологія машинобудування», декан механіко-технологічного факультету Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, доктор технічних наук, професор Ю.Д.Петрина
- завідувач кафедри загально технічних дисциплін Полтавської державної аграрної академії, доктор технічних наук, професор О.В.Горик

Бучинський М.Я.

Шліфування емальованих деталей : монографія / М.Я. Бучинський, І.Ю. Мохній, А.М. Чернявський. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 134 с. 69 іл.

ISBN 978-617-7910-92-2

У роботі викладено результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу алмазного шліфування сталених емальованих деталей, що виконані у вигляді циліндричних стрижнів. Розглянуто вплив режимів круглого шліфування на фізичні, механічні й хімічні властивості силікатних покриттів (емалей). Доведена принципова можливість та розроблена технологія виготовлення за допомогою алмазного шліфування сталених емальованих деталей типу валів, що мають високу розмірну точність спряжених поверхонь. Показано високу стійкість покриттів при роботі в абразивних та корозійних середовищах. Це суттєво розширює галузь застосування емальованих деталей у вузлах тертя ковзання, які працюють в агресивному середовищі при підвищеній температурі.

Книга розрахована на інженерно-технічних спеціалістів нафтогазового і хімічного машинобудування та працівників науково-дослідних інститутів машинобудівного профілю.

УДК 621.923.7

ISBN 978-617-7910-92-2

© Бучинський М.Я., Мохній І.Ю.,
Чернявський А.М., 2020
© Видавництво Ліра-К, 2020

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Шліфування силікатних матеріалів	
1.1 Деякі фізико-механічні властивості силікатних емалей.....	6
1.2 Вплив оброблюваного матеріалу на механізм руйнування при шліфуванні.....	8
1.3 Особливості алмазного шліфування.....	15
1.4 Якість поверхні обробленої штучними алмазами.....	17
Висновки.....	22
Розділ 2. Методика проведення випробувань	
2.1 Вихідні матеріали.....	25
2.2 Дослідження шорсткості поверхні.....	27
2.3 Вивчення структури поверхневого шару.....	33
2.4 Дослідження суцільності силікатного покриття.....	35
2.5 Корозійні дослідження.....	37
2.6 Визначення залишкових напружень та мікротвердості.....	39
2.7 Дослідження на абразивний знос.....	42
Розділ 3. Вплив режимів алмазного шліфування на мікропрофіль емальованих поверхонь	
3.1 Макро- і мікрогеометрія емальованих поверхонь.....	44
3.2 Вплив режимів круглого зовнішнього шліфування на шорсткість емальованих поверхонь.....	48
3.3 Теплова обробка емальованих деталей після шліфування.....	75
Висновки.....	78
Розділ 4. Вплив алмазного шліфування на фізико-хімічні властивості силікатних покриттів	
4.1 Структура поверхневого шару.....	80
4.2 Суцільність.....	88
4.3 Хімічна стійкість.....	93
Висновки.....	99
Розділ 5. Вплив алмазного шліфування на фізико-механічні властивості силікатних покриттів	
5.1. Залишкові напруження.....	101
5.2. Мікротвердість.....	108
5.3. Зносостійкість при абразивному зносі.....	111
Висновки.....	116
Розділ 6. Промислове застосування результатів дослідження.....	117
Висновки.....	121
Література.....	124

ВСТУП

Безперервна інтенсифікація технологічних процесів у хімічній, нафтогазовій і нафтопереробній промисловості ставить перед сучасним машинобудуванням невідкладні завдання створення нових високотехнологічних машин та апаратів із матеріалів, яким властива здатність протистояти дії хімічно й абразивно активних середовищ при підвищених температурах, зберігати свої початкові фізико-механічні властивості у важких умовах тривалої експлуатації.

Аналіз розвитку хімічного та нафтогазового машинобудування свідчить про те, що найбільш ефективними конструкційними матеріалами є композитні матеріали, які мають високоміцну основу і стійку до дії агресивних рідин та газів поверхню [135].

Тому використання силікатних матеріалів (емалей) як захисного склоподібного покриття для металічних виробів, отриманого шляхом емальювання, знаходить усе більш широке розповсюдження. Пояснюється це дешевизною, широким розповсюдженням та легкодоступністю сировини, що необхідна для отримання склоподібних покриттів; малою тривалістю та високою рентабельності процесу емальювання; високими експлуатаційними й декоративними властивостями емальованого металу.

Склоподібні покриття є універсальним видом захисту поверхні металічних виробів від дії кислот, лугів й інших агресивних рідин і газів при температурі до 600К і тисках до 100 МПа [152] та в умовах абразивної активності середовища. Лише деякі метали (платина, золото, тантал, титан) і деякі нікельхромомолібденові сплави можуть змагатися із силікатними емаллями за корозійною стійкістю в різноманітних агресивних середовищах, але ціна цих матеріалів дуже висока [162].

Одним з небажаних результатів корозійної дії хімічно активного технологічного середовища, окрім руйнування конструкційних елементів та передчасного виходу з ладу деталей обладнання, є забруднення продукту виробництва корозійним шламом конструкційних матеріалів, а відповідно зниження його якості через втрату ним чистоти. В зв'язку з цим розвиток виробництва хімічної апаратури із захисними склоподібними покриттями (емаллями) має велике народногосподарське значення [151].

Емальювання, тобто приплавлення до поверхні металічної основи шару спеціального скла за відповідною технологією, дає можливість поєднувати в деталях міцнісні властивості металу з хімічною стійкістю скла [35]. Однак емальовані поверхні, незважаючи на високу гладкість вогнянополірованого шару (середнє арифметичне відхилення мікропрофілю становить 0,1...0,2 мкм), мають нерівномірну хвилястість, амплітуда якої досягає 0,2...0,3 мм, що пов'язане з природою високотемпературного формування склоподібного покриття на металічній основі. Через це емальюють переважно вільні поверхні корпусних деталей.

Емальовання ж деталей типу циліндричних стрижнів (наприклад, валів, осей, штоків, плунжерів, скалок тощо), які мають спряжені поверхні, не знаходить широкого виробничого застосування, бо невисока розмірна точність цапф зі скляним покриттям $\pm 0,2 \dots 0,3$ мм не дозволяє отримати необхідний характер з'єднання з іншими деталями, наприклад, опорами ковзання, направляючими втулками, ущільнюючими кільцями тощо.

Відомо, що обробка великої групи важливих сучасних конструкційних матеріалів на основі двоокису кремнію (скла, ситалу, кварцу, кераміки), до яких відносять і силікатні емалі, практично можлива лише за допомогою абразивного інструменту [8, 122]. Тому надати спряженим поверхням емальованих деталей циліндричної форми високої розмірної точності можна лише за допомогою абразивної обробки, наприклад, алмазного шліфування. Однак застосування алмазного шліфування для емальованих деталей стримувалось декількома факторами.

Перший фактор базувався на відомій теорії крихкого руйнування скла при абразивній обробці [70]. Існувала думка, що шліфування емальованих деталей призведе до утворення наскрізних тріщин, які пронизуючи до металу тонкий шар приплавленого скла, порушують суцільність скловидного покриття. Другий фактор полягає в тому, що при шліфуванні необхідно зрізати гладкий вогнянополірувальний шар скла, який ніби володіє найбільшою хімічною стійкістю і тим самим суттєво понизить антикорозійні властивості емалі, тобто приплавленого до металу шару скла. Третій фактор виділяв нерівномірний допуск на обробку: з одного боку $+0,3$ мм, а з другого – $-0,3$ мм, що не виключало можливості зішліфування емалі в деяких місцях до ґрунту, який не володіє високою хімічною стійкістю.

У зв'язку з викладеним, освоєння шліфування емальованих деталей має велике практичне значення. Слід відзначити, що компанія NationalOilwellVarco випускає цілу низку виробів, в тому числі і циліндричних пар тертя, з керамічними покриттями, які за невисокої собівартості показують прекрасну зносостійкість, корозійну стійкість в абразивних та високомінералізованих середовищах з вмістом CO_2 , H_2S ; цим самим забезпечують високу довговічність нафтогазовидобувного і бурового обладнання. Перевірено часом, доведено експлуатацією, прийнято глобально – девіз під яким вона випускає лінійку керамічних виробів.

Метою цієї роботи є визначення можливості та доцільності застосування алмазного шліфування для виготовлення високоточних емальованих деталей, вивчення механізму руйнування поверхневого шару склоподібних покриттів при шліфуванні, дослідження впливу алмазного шліфування на якість поверхні й основні експлуатаційні властивості емальованих деталей, визначення оптимальних режимів круглого зовнішнього шліфування емальованих деталей синтетичним алмазним інструментом, розроблення технології виготовлення емальованих деталей, які мають високу розмірну точність спряжених поверхонь.

1 ШЛІФУВАННЯ СИЛІКАТНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Деякі фізико-механічні властивості силікатних емалей

Ефективність використання емальованих виробів визначається поєднанням у них міцнісних властивостей металу і корозійної, термічної й абразивної стійкості силікатного матеріалу. Найбільш часто для емальовання застосовують низьковуглецеву сталь. Однак, залежно від призначення виробу, використовують також сталі та сплави інших марок.

Прийнята в хімічному машинобудуванні технологія емальовання сталей виробів «мокрим» способом є найбільш простою і полягає в наступному [35, 162]. Емалевий шлікер, що являє собою водну суспензію емалевої фрити, що заправлена глиною, наносять на попередньо очищену поверхню металевого виробу шляхом занурення, поливання або пульверизації шаром товщиною 0,15...0,20 мм. Потім виріб висушують та піддають термічній обробці (випалу) при температурі ~1100...1200 К, у результаті чого емалевий шлікер розплавляється й утворює на металічній поверхні тонкий шар склоподібної маси. Операцію нанесення та оплавлення шлікеру повторюють декілька раз, нарощуючи покриття до необхідної товщини, зазвичай 1,2...2,0 мм.

Силікатне покриття складається з двох різнорідних шарів: емалі для ґрунтування, що забезпечує міцне зчеплення покриття з металевою основою і покривної емалі, яка міцно зчіплюється з ґрунтовим покриттям й утворює зовнішній шар стійкий до корозійно та абразивно активних середовищ. Слід відмітити, що за швидкістю корозійного руйнування лише небагато металів (платина золото, тантал) та деякі нікельхромомолібденові сплави можуть змагатися з емальованими покриттями [6, 41, 127, 141].

У процесі формування силікатного покриття при температурі 1100...1200 К між металом, складовими компонентами шлікеру і пічними газами відбувається фізико-хімічна взаємодія, в результаті якої чіткі межі між металом та ґрунтом, а також між рештою шарів покриття зникає. Вуглець, що міститься в поверхневому шарі металу, взаємодіє з окислами металів, що входять у склад емалі, й окислюється. Крім того, продовжується обезводнення покриття, що формується, та взаємодія води, яка виділяється, з металом, в результаті чого утворюється водень. Газоподібні продукти окислення вуглецю та водню, котрі виділяються, прориваючись скрізь в'язкий шар розм'якшеної емалі в атмосфері, частково затримуються в ньому, утворюючи газові пузири. Характер розміщення газових пузирів у силікатному покритті вивчений недостатньо. Також мало досліджений і вплив газових пузирів на фізико-хімічні властивості захисного шару емалі [3, 35, 52, 162].

Густина силікатних покриттів коливається в межах 2300...2600 кг/м³. Вони є непроникними для газоподібних і рідких агресивних середовищ. Їх модуль пружності змінюється залежно від хімічного складу та мікроструктури емалі від $60 \cdot 10^3$ до $120 \cdot 10^3$ МПа. Внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розши-

рення емалі й металу, силікатні покриття перебувають у напруженому стиснутому стані. На величину напружень стиску (100-300 МПа) великий вплив здійснює товщина покриття і металу, а також геометрична форма виробу, що емалюється. Міцність силікатного покриття на розтяг залежить від внутрішніх термічних напружень у захисному шарі та змінюється від 40 до 100 МПа. На стиск силікатні покриття працюють у 15...20 разів краще, ніж на розтяг. Міцність емалей на стиск знаходиться в межах 800...1500 МПа. Міцність силікатних покриттів на згин змінюється від 150 до 300 МПа і визначається в основному структурою емалі. Ударна міцність силікатних покриттів змінюється залежно від хімічного складу і мікроструктури захисного шару та становить від 80 до 220 МПа, що в 10...30 разів більше, ніж для монолітних деталей із ситалу. Силікатні покриття є достатньо твердими (їх мікротвердість становить ~6500...9500 МПа) і тому добре чинять опір абразивному зносу. Вони здатні зберігати вказану твердість при високих температурах ~700...1100 К [35, 36, 37, 38, 58, 109, 134, 142, 162].

Для емалювання металічних виробів залежно від умов експлуатації знаходять застосування різні кислото-, лужно- і кислотолужностійкі емалі, які можна поділити на скловидні та склокристалічні (ситалові). Скловидні покриття характеризуються склоподібною (аморфною) будовою. Мікрокристалічна фаза, що виділяється в процесі емалювання та визначає заглушеність (непрозорість) покриття, суттєво не впливає на його фізико-механічні властивості. Склокристалічні покриття отримують шляхом кристалізації при визначених режимах термообробки склоподібних покриттів, у шихту яких були введені спеціальні добавки. В процесі термообробки структура вихідного склоподібного покриття перетворюється в мікрокристалічну, де найбільш дрібні кристалики розміром у десятки частки мікрона рівномірно розподілені по об'єму склоподібної фази. Утворення кристалічного каркаса підвищує механічну, термічну та абразивну міцність (стійкість) силікатного покриття (табл.1.1) [110, 138, 162].

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості силікатних покриттів (емалей)

№ п/п	Найменування фізико-механічних властивостей	Од. виміру	Вид силікатного покриття	
			вихідне склоподібне	термооброблене склокристалічне
1	Модуль пружності	МПа	$(60...100) \times 10^3$	$(80...120) \times 10^3$
2	Границя міцності при згині	МПа	150...200	200...300
3	Мікротвердість	МПа	6500...8000	8000...9500
4	Ударна міцність	МПа	80...110	170...220
5	Абразивний знос	відносні од.	2...3	1
6	Максимальна робоча температура	К	700...900	900...1100

Склокристалічні покриття з'явилися на початку 60-их років ХХ ст. Першим матеріалом такого типу був «Нуцерит», розроблений американською фірмою «Пфаудлер» [172, 173, 175, 176]. Нині вітчизняними вченими розроблені та успішно впроваджуються в промисловість декілька видів склокристалічних емалей. Ними покривають корпуси хімічних апаратів і насосів для перекачування агресивних рідин, трубопровідну арматуру й направляючі лопатки турбін, мішалки для реакторів та інші деталі, що працюють у жорстких умовах [14, 74, 162].

Уявляється досить перспективним використання силікатних покриттів, зокрема склокристалічних емалей, що володіють добрими механічними властивостями, високою корозійною, абразивною й термічною стійкістю для захисту поверхонь деталей тертя, які працюють в агресивному середовищі при підвищеній температурі. Емальовані деталі хімічних машин та апаратів, що виконані у вигляді циліндричних стрижнів, наприклад вали, штоки, вісі, плунжери тощо, значно дешевші від подібних деталей з високолегованих сталей і сплавів та не поступаються їм за міцнісними властивостями.

Перешкодою до широкого застосування емальованих деталей циліндричної форми є невисока розмірна точність спряжених поверхонь. Інтенсивне газовиділення з металічної основи і розплаву емалі та текучість останнього при випаді захисного шару призводять до різновтощинності силікатного покриття, що досягає 200...300 мкм. Унаслідок цього дійсні розміри спряжених поверхонь емальованих деталей циліндричної форми відрізняються від номінальних на $\pm 0,2 \dots 0,3$ мм. Само собою, що деталі з такими допусками не можна використовувати в якості спряжених у відповідальних вузлах тертя ковзання машин і апаратів нафтогазової, нафтопереробної та хімічної промисловості. Надати спряженим поверхням емальованих деталей типу валів високу точність геометричної форми й відповідну шорсткість поверхонь практично можливо тільки за допомогою шліфування. Як відомо, абразивна обробка силікатних матеріалів найбільш ефективна за використанням алмазного інструменту [8].

При шліфуванні емальованих деталей відбувається розкриття глибинних шарів силікатного покриття. Але даних щодо корозійної та абразивної стійкості глибинних шарів силікатних покриттів виявити не вдалося, що вимагає досконалих досліджень якості шліфованих емальованих поверхонь.

1.2 Вплив оброблюваного матеріалу на механізм руйнування при шліфуванні

Силікатним покриттям притаманні властивості силікатних матеріалів. Тому вважається, що шліфування емальованих деталей буде супроводжуватись інтенсивним крихким руйнуванням поверхневого шару покриття і утворенням численних глибоких тріщин, які значно понизять опір емальованої поверхні фізико-хімічному впливу агресивного робочого середовища.

В зв'язку з цим слід розглянути механізм руйнування матеріалів при шліфуванні. Як відомо, всі тверді матеріали при нормальних умовах прийнято поділяти на пластичні (в'язкі) та крихкі. Перші володіють властивостями зберігати залишкову деформацію, отриману під дією зовнішніх сил і після припинення їх дії, другі – при прикладенні зовнішніх сил руйнуються без помітної пластичної деформації. Тому процес шліфування крихких матеріалів М.М.Качалов [70], Є.М. Маслов [93], М.І.Поляков [116] й інші характеризують крихким руйнуванням поверхневого шару деталі на противагу пластичному деформуванню цього ж шару при шліфуванні в'язких матеріалів.

Дослідженнями [62] встановлено, що в природі не існує крихких чи в'язких (пластичних) матеріалів, а спостерігається їх крихкий чи в'язкий стан, що зумовлений низкою внутрішніх і зовнішніх факторів, таких, як спосіб та швидкість прикладення навантаження, температура, геометрична форма виробу, фізико-хімічний вплив зовнішнього середовища, хімічний склад, структура тощо. Поєднання всіх цих факторів приводить до створення умов переходу від пластичного (в'язкого) механізму руйнування до крихкого. Вперше умови переходу із в'язкого стану в крихкий були сформовані А.Ф.Йоффе й П. Людвигом.

Згідно зі схемою А.Ф.Йоффе, крихка міцність (опір відриву) матеріалу з пониженням температури залишається незмінною, в той час як границя текучості, що характеризує опір пластичній деформації, значно підвищується і за певної температури стає більше від значення крихкої міцності (рис. 1.1). Подальший розвиток схема А.Ф.Йоффе дістала в працях М.М. Давиденкова [49], Г.І.Погодіна-Алексеева [111], Я.Б.Фрідмана [144] та інших дослідників.

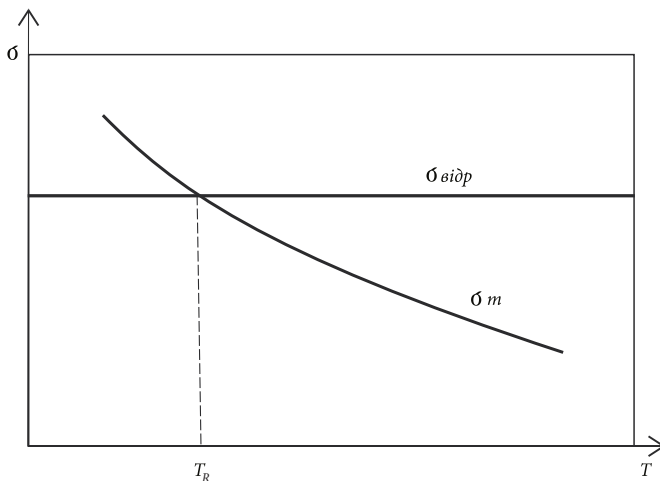


Рисунок 1.1 – Схема Йоффе для пояснення характеру руйнування матеріалу залежно від температури

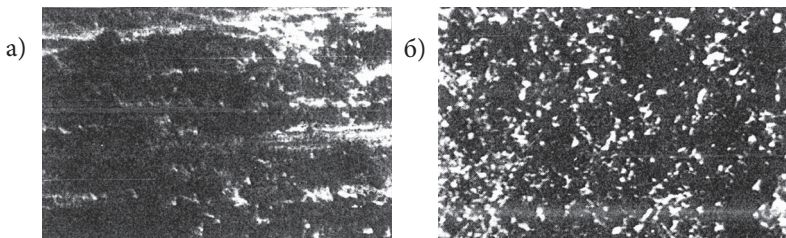
Механічні властивості багатьох склоподібних матеріалів можуть бути достатньо добре описані за допомогою ідеалізованої моделі, що складається з пружини і демпфера. Одним з двох найпростіших шляхів моделювання матеріалу, що володіє пружністю та в'язкістю, є послідовне з'єднання пружини й демпфера, відоме як модель Максвелла [61]. З цієї моделі виходить, що крихке руйнування склоподібного матеріалу визначається швидкістю деформації та часом релаксації матеріалу.

Оскільки час релаксації швидко спадає зі зростанням температури, то для певної швидкості деформації в деякому діапазоні температур постійна часу навантаження буде зіставною з часом релаксації, а вид руйнування буде змінюватися від крихкого до руйнування шляхом розриву. Температура, при якій зміна виду руйнування відбувається найбільш швидко, називається температурою крихкого переходу. Температура переходу є функцією швидкості наростання напружень: вона буде зменшуватися при менших швидкостях та зростати при більших.

Особливостями процесу шліфування є розвиток величезних тисків різання в тонкому поверхневому шарі виробу, що призводить до різкого підвищення пластичності деформованого матеріалу. Ці особливості підтверджені дослідженнями А.І.Ісаєва [64], Г.Б. Лур'є [88], Є.М. Маслова [89], А.А. Маталіна [94], М.А. Шальнова [155] та інших.

Механізм руйнування крихкого матеріалу, наприклад скла, при шліфуванні зв'язаним абразивом, за даними А.М.Бардіна [10], М.Є.Дяченко [58], А.В.Казанського [68] та інших, є аналогічним до механізму руйнування скла вільними абразивом, що детально вивчений І.В.Гребенщиковим [45], М.М.Качаловим [70], М.І. Поляковим [116] й іншими. При дії на скло зерен шліфувального круга на його поверхні утворюється ряд подряпин, що супроводжуються тріщинами в товщі зразка. При цьому процес утворення тріщин випереджає рух абразивних зерен. При збільшенні кількості подряпин тріщини, що утворюються, пересікаються, в результаті чого відбувається відділення найдрібніших кусочків скла – стружки.

На рисунку 1.2 показані для порівняння поверхні скла, що шліфоване зв'язаним та вільним абразивом. Наявність упорядкованих слідів обробки на поверхні скла від дії зв'язаних абразивних зерен важко характеризувати лише крихким руйнуванням.



а) зв'язаним абразивом

б) вільним абразивом

Рисунок 1.2 – Поверхня шліфованого скла

Проведені В.А.Хрульковим та А.Я.Голованем дослідження [148] властивостей обробки алмазним інструментом твердих і крихких матеріалів дозволили їм зробити кілька висновків про характер руйнування твердих тіл. На оброблюваній поверхні крихких матеріалів під дією абразивних зерен утворюються тріщини й виколювання, групу яких становлять подряпини. Подряпини, що утворилися на поверхні матеріалу, свідчать про крихке руйнування за рахунок мікротріщин та виколювань. Але це не виключає, на їхню думку, пластичного деформування крихких матеріалів.

Ю.М.Буки та В.К.Кальмушевський, досліджуючи процес алмазної обробки корундової кераміки [28], не знайшли на оброблених поверхнях тріщин, які є наслідком крихкого руйнування.

Результати досліджень алмазної обробки мінералокераміки, які проведені в Харківському політехнічному інституті під керівництвом М.В.Семка [132], свідчать про те, що домінуючим видом руйнування цього матеріалу є зріз. Борозенки від різання (дряпання) не мають слідів сильної пластичної течії (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Слід одиначного алмазного зерна на сплавi BK6M

На думку Е.М.Маслова [91, 93], при шліфуванні твердих та крихких матеріалів відбувається масові сколювання найдрібніших часток матеріалу що обробляється, причому в цьому випадку стружка має дрібнодисперсний вигляд та різноманітну геометричну форму.

Досліджуючи механізм руйнування при алмазному шліфуванні кераміки з високим умістом глинозему, Л.П.Примак установив [120], що переважаючим видом руйнування є крихкий відрив. При тонкому шліфуванні на ділянках скляної фази спостерігаються сліди пластичної течії кераміки.

Основним видом руйнування неметалічних матеріалів на основі двоокису кремнію при алмазному шліфуванні є, як показано в роботі [124], крихке руйнування у вигляді сколів. Однак при високих швидкостях і малих об'ємах стружки, що знімається, як відмічено там же, в крихких матеріалах можливі пластичні деформації. Пластичну течію при шліфуванні мармуру, гіпсу й тальку спостерігали Бейкер, Шоу, Маршалл [167, 177, 178] та інші.

Про велике значення теплових явищ при шліфуванні крихких матеріалів свідчать дослідження, що проведені Боуденом та Скоттом [168], де алмаз пере-

міщували вздовж скляної поверхні з відносно високими швидкостями. Течію спостерігали за умови

$$V\sqrt{0,1N}=105\pm 2 \quad (1.1)$$

де V – швидкість переміщення, м/с;

N – прикладене навантаження, Н.

Оскільки температура поверхні при цьому процесі є функцією $V\sqrt{0,1N}$, є обґрунтованим зв'язати початок течії матеріалу із досягненням поверхнею критичної температури. Оцінки цієї температури, що базуються на прийнятому коефіцієнті тертя, знаходяться в прийнятній відповідності до відомої температури розм'якшення скла.

Проте високі температури не завжди є необхідними для пластичної деформації скла, оскільки при дослідженнях дряпанням, що проведені зі швидкостями 0,01 мм/с, спостерігаються канавки з пластичним зміщенням матеріалу, хоча значного виділення тепла при цьому не було виявлено [179].

Можливість пластичної течії номінально крихких матеріалів при ерозійному різанні показана в роботах Шелдона та Фінні [156]. Ними зроблений висновок, що для переходу від крихкого руйнування до пластичної течії необхідно дотримувалися наступних умов:

$$a) \quad a/r \approx 0,2 \quad (1.2)$$

де a – радіус площадки контакту, для скла дорівнює 1...2 мкм;

r – радіус заокруглення абразивної частки;

$$б) \quad r^2 V^4/5 \leq 2 \cdot 10^{-5} \quad (1.3)$$

де V – швидкість переміщення абразивної частки, м/с;

в) малі кути атаки поверхні, що обробляється $\alpha \approx 20 \dots 30^\circ$.

Згідно із сучасними уявленнями, найбільш повно викладеними Г.М.Іпполітовим [6], Г.Б.Лур'є [88], Е.М.Масловим [91] й іншими дослідниками, процес зняття окремої стружки закріпленим абразивним зерном з поверхні пластичного матеріалу, зокрема металу, складається із кватрання зерна по поверхні та зсуву елементів матеріалу, що оброблюється.

У процесі шліфування навколо вершин контактуючих абразивних зерен виникає зона пружно-пластичної деформації металу. Робота кожного зерна складається з роботи пружних та пластичних деформацій, сил тертя та диспергування. На спеціальному диспергометрі було встановлено [123], що при різанні частка роботи, що переходить у теплоту, становить 97...98% від загальної роботи різання. Іншими словами, в зоні контакту кожного працюючого зерна з металом виникає джерело тепла.

Високі миттєві температури, які розвиваються в процесі шліфування, різко підвищують пластичність металу, що деформується, та створює можливість

зняття стружки округленими абразивними зернами, тобто висока швидкість різання, в результаті котрої виникає велика температура, як відмічає П.І.Ящерицин [163], є необхідним фактором процесу шліфування.

Зняття стружки є можливим при дотриманні нерівності

$$a \gg \rho,$$

з якої випливає, що чим менший ρ (радіус заокруглення ріжучої кромки абразивного зерна), тим більш тонкий шар металу a можна зняти цим зерном.

Специфічною особливістю мікрорізання, що лежить в основі абразивної обробки, як відмічає М.І.Богомолов [19, 20], є не зрізання металу, а пластичне відтиснення його по краях подряпин при дії абразивних зерен. Це відбувається через несприятливу геометрію ріжучих вершин абразиву.

Пластичне відтиснення металу по краях подряпин відбувається при деформуванні його округленими вістрями до деякої критичної глибини

$$h_{кр} \approx 0,1\rho,$$

а руйнування, сколювання та стружкоутворення – при глибині деформування $h_{кр}$ та більше [23, 89].

Виходячи з цього, процес зняття стружки абразивним зерном буде виглядати таким чином (рис. 1.4):

а) зерно вдаряє ріжучою кромкою по поверхні, яка обробляється. Внаслідок того, що $a \ll \rho$ зерно ковзає по поверхні, причому тиск його збільшується. В цей момент виділяється велика кількість теплоти;

б) в результаті зростаючого тиску зерна на поверхню, що обробляється, до $1...2 \times 10^3$ МПа, та зростання пластичності металу за рахунок збільшення температури відбувається зняття металу;

в) глибина шару, котрий знімається, досягає значення $h_{кр}$; відбувається зняття стружки.

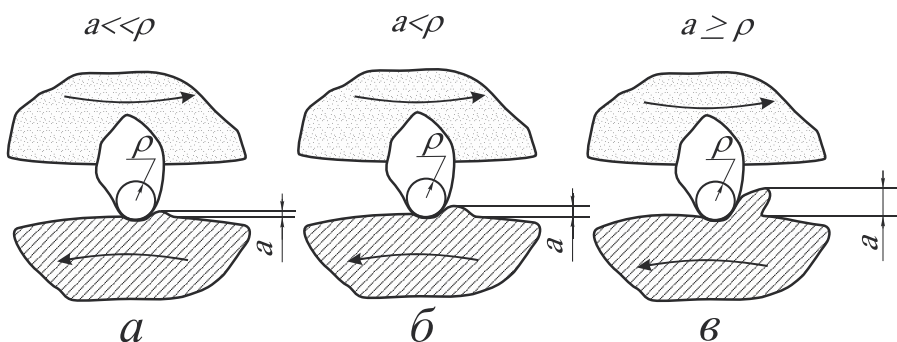


Рисунок 1.4 – Схема зняття стружки алмазним зерном з металічної поверхні

Таким чином, робота одного й того ж абразивного зерна на довжині дуги контакту з поверхнею, що обробляється, ділиться на декілька етапів (ковзання, зминання, зняття стружки).

Установлено, що при жорстких режимах шліфування поверхневий шар металічних деталей розтріскується [89, 92, 164, 165]. Утворення тріщин, тобто крихке руйнування поверхневого шару, зумовлено виникненням напружень, які перевищують границю міцності металу, що обробляється. Причини утворення цих напружень трактуються по-різному (теплова теорія та гіпотеза втоми).

Згідно із тепловою теорією [4, 166], при відомих умовах, які визначаються температурним станом поверхонь, що шліфуються, накладення термічних і структурних напружень сприяє розвитку наявних мікровогнищ тріщин та руйнуванню поверхневих шарів з врахуванням структурного й фазового складу кожного конкретного металевого сплаву.

За гіпотезою втомного утворення [101], шліфувальні тріщини виникають лише при обробці крихких металів, у результаті повторної дії великих сил різання при високій швидкості деформації матеріалу, що обробляється. Тепло, яке виділяється при шліфуванні, може викликати появу тріщин в результаті утворення локальних опіків, залишкових напружень та збільшення крихкості в процесі структурних змін, але тепло не є основною причиною виникнення шліфувальних тріщин.

Із викладеного виходить, що характер руйнування матеріалу при шліфуванні залежить від умов різання та фізико-механічного стану поверхневого шару. Академік А.В.Шубников вважає [159], що при шліфуванні можливі чотири основні випадки:

- а) обробка поверхні крихких тіл прийомами крихкого руйнування;
- б) обробка поверхні крихких тіл прийомами, що викликають пластичну деформацію;
- в) обробка поверхні пластичних тіл прийомами, що викликають пластичну деформацію;
- г) обробка поверхні пластичних тіл прийомами крихкого руйнування.

У процесі шліфування головну роль відіграють механічні властивості твердих тіл: пластичність, крихкість, твердість та пружність. При цьому, залежно від способу дії, тверде тіло може стати крихким або пластичним.

Відомо, що формування силікатного покриття на металевій поверхні супроводжується складними фізико-хімічними реакціями окислення й розчинення металу, насиченням емалевого розплаву окислами металу та утворенням великої кількості газових пузирів, що суттєво змінює первинний склад і властивості вихідного емалевого скла [13].

Ураховуючи викладене та специфічні особливості силікатного покриття (низька температура розм'якшення 800...1100 К, насиченість газовими пузирями, високі напруження стиску тощо), питання про характер руйнування емалі при шліфуванні емальованих деталей можна вважати спірним.