

М. О. Борисенко, аспірант, І. В. Сінкевич, канд. техн. наук, доцент

ІННОВАЦІЙНІ ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНІ ПАСТИ НА ОСНОВІ СКЛЯНОГО АБРАЗИВУ ТА ПОЛІМЕРНОГО ВОСКУ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

Ключові слова: шліфувально-полірувальна паста, скляний абразив, полімерний віск, вторинна сировина, переробка, пластифікатор, диспергатор.

Вступ. На сьогодні Україна має значну потребу у шліфувально-полірувальних пастах (ШПП), зокрема для обробки скла, кераміки та деревини. Це зумовлено розвитком таких галузей, як автомобільна (полірування автомобільного скла та кузовів є важливою частиною обслуговування та ремонту транспортних засобів.), меблева (активно використовує шліфувально-полірувальні пасти для обробки металевих елементів меблів, таких як фурнітура, ніжки, ручки, замки, петлі та інші деталі), будівельна та ювелірна (потребує використання спеціалізованих паст для досягнення бажаного блиску та якості поверхні виробів) промисловість, де необхідна висока якість обробки поверхонь. Отже, все це, зумовлює потенціал для розвитку виробництва ШПП в Україні. При цьому, особливо актуальним є створення інноваційних ШПП в яких, використовується абразив (скла) та зв'язувальний матеріал (полімерний віск), представлені вторинними матеріалами, отриманими при переробці відходів техносфери.

Мета та постановка завдання дослідження. Виробництво ШПП з матеріалів, які замість зберігання та накопичення на сміттєзвалищах де вони забруднюють довкілля [1, 2], вважається екологічно та економічно позитивним моментом у розвиненні та промислового впровадженні цієї технології. Разом з цим, такі ШПП не містять токсичних розчинників або важких металів, мінімізують ризик утворення пилу небезпечних матеріалів, якщо частки скляного порошку стабілізовані у восковій матриці. Перспективність використання скляного бою як сировини для виробництва абразиву для ШПП, представимо у вигляді структурної схеми, наведеної на рис. 1.

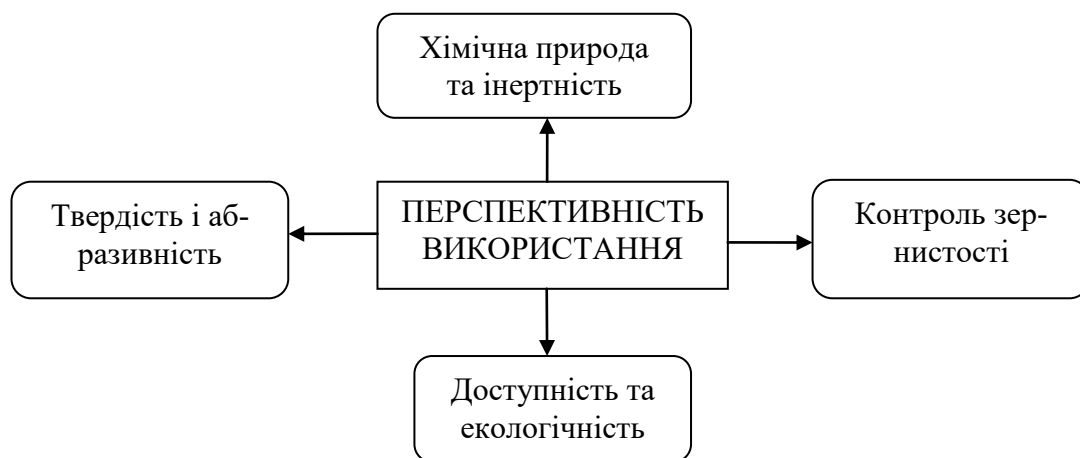


Рисунок 1 – Перспективність використання скляного бою як сировини для виробництва абразиву для ШПП

Хімічна природа та інертність. Скло – це аморфний неорганічний матеріал, який зазвичай отримують шляхом плавлення кремнезему (SiO_2) з лужними оксидами (Na_2O , K_2O) та іншими добавками (Al_2O_3 , MgO), які підвищують хімічну стабільність, міцність, стійкість до вологи [3]. Завдяки своїй природі скло є хімічно інертним – не вступає у реакцію з іншими компонентами ШПП (зв’язувальною речовиною, пластифікаторами, барвниками тощо), не утворює небезпечних сполук. ШПП з скляним абразивом не окислюються і не втрачають абразивних властивостей при зберіганні.

Твердість і абразивність. Твердість скла залежить від його складу та типу, але в середньому, за шкалою Моосу, складає 6–7 од., що вище за мідь та її сплави, сталь і близько до карбїду кремнію [4]. Отже, скло має достатню твердість для ефективного полірування металів, пластмас і лакованих поверхонь. Скло легко дробиться під механічним навантаженням, утворюючи гострі нові грані, які підвищують абразивність. Це особливо корисно у пастах, оскільки зумовлює загострення кутів частинок під час шліфування поверхні матеріалів. Твердість і абразивність скла забезпечує здатність ефективно шліфувати скло, метали, кераміку, деревину, пластики.

Контроль зернистості абразиву – критично важливий фактор для ШПП, бо він визначає інтенсивність обробки та якість поверхні. Контроль зернистості скла дозволяє регулювати абразивність пасти, від грубого шліфування до високоякісного полірування [5]. Подрібнене скло легко класифікувати (сита, просіювання) до потрібної фракції (див. табл. 1) задля отримання ШПП різного функціонального призначення.

Таблиця 1 – Орієнтири розмірів часток скляного абразиву в ШПП

Призначення ШПП	Розмір часток, мкм	Ефект на поверхню
Груба шліфовка (зняття шару)	40–100	Швидке зняття матеріалу, шорстка поверхня
Середнє шліфування	20–40	Усунення дефектів, підготовка до полірування
Тонке шліфування	5–20	Рівна поверхня, мінімальні подряпини
Полірування/фініш	1–5	Глянець, дзеркальна гладкість

Для ШПП зі вторинного скла важливо підтримувати стабільну, вузьку фракцію, щоб частки абразиву ефективно і безпечно виконували свої функції. Частки менше 1 мкм практично не ефективні як абразив, бо не знімають матеріал, а лише шліфують м’яко. Частки понад 100 мкм можуть залишати подряпини і застосовуватися лише для грубих робіт. Також зазначимо, що дрібні частки (1–10 мкм) утримуються рівномірно і не осідають. Великі частки (50–100 мкм) можуть осідати або утворювати агрегати погіршуючи однорідність ШПП.

Доступність та екологічність. Основним джерелом абразиву для ШПП – скляного бою в Україні виступає як руйнування будівель та об’єктів інфраструктури (вікна житлових будинків, адміністративних та комерційних споруд; скляні фасади, перегородки, двері та дахові панелі), так і відходи та бій комерційного або побутового скла (браковані листи скла, під час транспортування або обробки; бій склянок, банок, пляшок тощо). В Україні функціонують підприємства, які займаються переробкою скла та виробництвом скляної продукції [6], але внаслідок логістичних проблем та скорочення потужностей переробки, значна частина скла (особливо після руйнувань) не потрапляє на заводи та накопичується на полігонах або несанкціонованих звалищах. Саме цю час-

тину відходів доцільно використовувати для отримання абразиву для ШПП. Використання вторинного скла значно дешевше, ніж натуральних мінералів (карбід кремнію, оксид алюмінію). ШПП з склобоек є економічно вигіднішими для промислового виробництва. Екологічність таких ШПП полягає в наступному: використання вторинної сировини – переробка відходів у корисний продукт; застосовується без використання агресивних кислот або лугів; не виділяє токсичних речовин при зберіганні або застосуванні; після використання залишки пасти безпечні для утилізації.

В якості зв'язувальної основи до абразиву – скла доцільно використовувати полімерний віск – фракцію (C₂₀-C₄₀), отримана при термічному піролізу твердих вторинних поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП) та полістиролу (ПС) [7]. Фізико-хімічні фактори сумісності запропонованих абразиву та зв'язувальної основи, представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні фактори сумісності абразиву та зв'язувальної основи

Фактор сумісності	Пояснення
Хімічна інертність	Скло є аморфним кремнеземом і не реагує з вуглеводневим полімерним воском.
Полярність	Скло має полярну поверхню, а полімерний віск – неполярний, що зменшує хімічну взаємодію, але для пасти це добре: абразив залишається механічно активним.
В'язкість матриці	Віск забезпечує рівномірне утримання часток скла, запобігає їх осіданню.
Механічна сумісність	Полімерний віск пом'якшує контакт часток з оброблюваною поверхнею, мінімізуючи виникнення подряпин від грубих граней скла.

Таким чином, метою даної статті виступає розробка рецептур ШПП на базі скляного абразиву та полімерного воску, які, сьогодні, є перспективними для застосування при обробці скла (чорнове шліфування скляних виробів; підготовка поверхні перед поліруванням SeO₂), обробці пластмас і полімерних виробів (полірування оргскла (ПММА), полікарбонату, епоксидних деталей, коли потрібна помірна абразивність; вирівнювання поверхонь пластмасових моделей (наприклад, у 3D-друку), металевих поверхонь (очищення й легке полірування алюмінію, міді, латуні, бронзи у тих випадках, коли абразиви типу Al₂O₃ чи SiC надто «жорсткі» і залишають глибокі подряпини), деревини і лакофарбових покриттів (шліфування деревини, фанери, шпону з метою отримання гладкої поверхні; полірування лаків та фарб перед нанесенням фінішного шару (аналог паст з мікрокварцом); фінішне шліфування деталей з композитів (епоксидно-скляні матеріали); використання в автосервісах для полірування фар зі скла або пластику).

Задля поставленої мети необхідно провести серію лабораторних досліджень з визначення основних показників якості ШПП, отриманих по розробленим рецептурам, визначити змінення значень цих показників при тривалому зберіганні ШПП.

Аналіз публікацій. На сьогоднішній день, скляний бій досить широко використовується у якості сировини при виробництві нових склотарних виробів (до 80 % шихти у виробництві пляшок може становити склобій, що сприяє економії до 25–30 % енергії при плавленні) [8]; у будівництві (виробництво мінеральної вати; добавка у цемент,

бетон, асфальт; сировина для плитки, керамограніту, декоративних матеріалів) [9]; у хімічній промисловості (сировина для глазурі, емалей, кераміки; використання в склокристалічних матеріалах) [10, 11]; в екології та енергетиці (фільтраційний матеріал для очищення води і газу); відбивач у сонячних панелях) [12–15].

В Україні існують розробки та виробництво ШПП, зокрема для обробки скла, металів, деревини та декоративних виробів з полімерів, але інформація щодо виробництва ШПП зі скляним абразивом не є широко представленою у відкритих джерелах. Тому, це, в остаточному підсумку, можна розглядати в якості перспективної ніші для подальших досліджень та розробок у галузі матеріалознавства та нафтохімії.

Однак, для отримання абразиву для ШПП із скляного бою, його необхідно попередньо підготувати – подрібнити до необхідних розмірів (див. табл. 1) використовуючи наступні технологічні рішення [16–18]: механічне подрібнення (кульові млини (керамічні або сталеві кулі) забезпечують зернистість до 10–20 мкм; вібраційні млини забезпечують зернистість до 5–15 мкм; струменеві млини (jet mills) забезпечують зернистість до 1–5 мкм без перегріву і забруднення); хімічно-механічне подрібнення (використання термічного шоку (нагрівання → різке охолодження → крихкість) перед подрібненням; хімічне травлення HF або NaOH для доведення до наночасточок (дорого і небезпечно, тому малоприматне для масового виробництва ШПП).

Сортування та контроль зернистості при подрібненні скляного бою доцільно здійснювати за рахунок використання сит з мікроотвором для грубого розділення [19], аерокласифікації (повітряні сепаратори) задля відділення легких і дрібних часток [20, 21]; лазерної гранулометрії (контроль розподілу за розміром) [22].

Матеріали та методи дослідження.

Матеріали. Зв'язувальною основою до ШПП виступав полімерний віск (фракція C₂₀-C₄₀), отриманий при термічному піролізу твердих вторинних ПЕ, ПП та ПС. Технологія отримання та властивості полімерного воску, представлені у роботі [7]. Абразивом виступав скляний бій, отриманий при руйнуванні віконного (листового) содово-вапняного силікатного скла (Soda-lime glass), яке використовувалось у склопакетах, відповідно до DSTU EN 1279-1. Содово-вапняне силікатне скло мало наступні фізико-механічні характеристики: густина – 2,47 г/см³; твердість за Моосом – 6 од.; модуль пружності біля 70 ГПа; міцність на стискання – 700 МПа; міцність на вигін 50 МПа; теплопровідність – 1,0 Вт/(м×К); коефіцієнт термічного розширення – 9,0×10⁻⁶ К⁻¹; температура плавлення – 1500 °С. Додатковими компонентами ШПП можуть виступати пластифікатор – індустріальна олива I-20 та диспергатор – стеаринова кислота. Пластифікатор покращує змочування скла, знижує крихкість пасти, сприяє кращому розподіленню абразиву, а диспергатор гідрофобізує поверхню SiO₂, зменшує агломерацію, підвищує зчеплення зі воском.

Методика отримання абразиву. Перед подрібненням скляний бій сортували – видаляли металеві включення, пластик, крупні сторонні домішки. Проводили попереднє дроблення у молотковій дробарці до фракції <1–5 мм. Далі скляний бій промивали водою та висушували при 105 °С протягом 60 хвилин. Остаточне подрібнення скляного бою відбувалося в лабораторному кульовому млині (об'єм завантаження 3 дм³). В якому робочий стальний барабан заповнювався на 40–50 % об'єму стальними кульками та на 15–20 % об'єму – склом. Діаметр сталих кульок складав: 10–15 мм – для грубого помелу (до 100–50 мкм); 5–10 мм – для середнього помелу (20–30 мкм) та 2–5 мм – для тонкого помелу (5–10 мкм). Співвідношення скла до кульок: 1 : 5–10 (по масі). Стосовно режиму роботи млина слід зазначити, що швидкість обертання барабану

складала 60–80 об./хв., а тривалість подрібнення 30 хв. для отримання абразиву грубого помелу, 2–3 год – для середнього помелу та 4–6 год – для тонкого помелу. Після помелу відділяють скляний порошок від кульок та класифікують його за розміром.

Методика отримання ШПП. Полімерний віск, завантажують лабораторний термостатичний стакан з мішалкою. Нагрівають його до 90–100 °С, підтримуючи його однорідне розплавлення при помірному перемішуванні та додають зважену кількість пластифікатору (до 10 %). Дрібнодисперсний абразив у певній кількості змішують із сумішшю, яка складається із частини розплавленого рідкого воску та диспергатору (до 2 %) задля утворення концентрованої суспензії, що зменшує грудкування. У суміш розплавленого воску і пластифікатору тонким струменем додають абразивну суспензію, інтенсивно перемішуючи мішалкою з лопатями при швидкості обертання 500–800 об/хв) протягом 60 хвилин. Далі суміш охолоджували та підвергали лабораторному дослідженню.

Методи дослідження ШПП. Лабораторне дослідження отриманих зразків ШПП проводилося з використанням стандартних методик: густина (ρ , кг/м^3) за ASTM D1475, penetрація (x , $\text{мм} \times 10^{-1}$) за ASTM D217, стійкість до фазового розшарування (ψ , %) за ASTM D4424, швидкість видалення матеріалу (абразивність) за адаптованим для ШПП ASTM G65, якість шорсткості поверхні після шліфування-полірування за ASTM B46.1. Разом із стандартизованими методами використовувався метод візуальної оцінки висихання ШПП (погіршення нанесення, утворення твердої кірки на поверхні тощо), розмазуваність ШПП (Spreading Test) [7] та термостійкість ШПП.

Термостійкість ШПП визначається температурою при якій зв'язувальна основа пасти – полімерний віск, переходить з твердого до рідкого стану, тобто перестає утримувати форму на поверхні. Визначення проводили у наступний спосіб: на очищену від пилу та знежирену пластину (матеріал – Сталь 3) наносили тонкий шар пасти (0,2–0,5 мм). Далі цю пластину розміщали у повітряній бані, розташованій на електричній плитці. Поступово підвищували температуру повітряної бані (до 5 °С/хв), регулярно спостерігаючи за станом ШПП. Температура при якій ШПП починає розтікатися на поверхні пластини, вважають температурою плавлення – переходу до рідкої консистенції. Визначення вважається точним, якщо 3–5 повторів дають однакову температуру ± 1 °С.

Результати та їх обговорення. Задля лабораторного дослідження можливості отримання ШПП з абразивом – склом та зв'язувальною основою – полімерний віск, різного функціонального призначення, було розроблено рецептури (див. табл. 3), які доцільно використовувати при грубому, середньому, тонкому шліфуванні, а також поліруванні.

Таблиця 3 – Рецептури досліджуваних ШПП

Компонент	Вміст компонентів в залежності від призначення ШПП, %			
	Грубе шліфування	Середнє шліфування	Тонке шліфування	Полірування
Абразив (скляний пил)	60	45	35	25
Полімерний віск (C ₂₀ –C ₄₀)	33	47	55	65
Пластифікатор (олива І-20)	5,5	6,5	8	8
Диспергатор – C ₁₈ H ₃₄ O ₂	1,5	1,5	2	2

Нижче наведемо обґрунтування використання кожного компоненту у складі запропонованих рецептур ШПП.

ШПП для грубого шліфування. Така ШПП повинна бути жорсткою задля швидкого зняття матеріалу. Це забезпечує вміст крупнозернистий (70–100 μm) скляний порошок – абразив. Саме вміст абразиву на рівні 60 % дає високу швидкість зняття матеріалу і економічну ефективність використання вторинної сировини. При цьому, вона характеризується обмеженою розмазуваністю і ризиком седиментації абразиву при недостатній в'язкості зв'язувальної основи. Полімерний віск на рівні 33 % формує тверду матрицю, зв'язує абразивні частки, дає потрібну консистенцію для нанесення. Він має хорошу адгезію до поверхонь і термостійкість. Олива I-20 у кількості 5,5 % є тієї рідкою фазою, що змочує абразив, підвищує пластичність, полегшує нанесення і розмазування. Наведений низький вміст робить пасту доволі твердою, потрібною для грубого шліфування, де надмірна «м'якість» не бажана. Олеїнова кислота у кількості 1,5 % працює як диспергатор/змочувач і частковий пластифікатор; зменшує агрегацію скляних часток і покращує змочування воском/оливою. 1,5 % – типовий ефективний рівень при великому вмісті абразиву.

ШПП для середнього шліфування. Вміст середньозернистого абразиву на рівні 45 % (20–40 μm), забезпечує помітне зняття матеріалу, але не настільки швидко, як 70–100 мкм. Доля 45 % робить пасту збалансованою: достатньо абразиву для ефективності, але знижує ризик надмірної зернистої поверхні і полегшує розмазуваність у порівнянні з 60 %. Велика частка воску (47 %) формує міцну матрицю, утримує абразивні частинки, зменшує стікання і седиментацію, дає контрольовану консистенцію. При 47 % паста буде відносно тверда, що корисно при операціях, де потрібно уникати «розтікання» матеріалу і забезпечити концентровану дію абразиву. Полімерний віск дає кращу адгезію до поверхні ніж деякі парафіни; добре сумісний з піролізним ПЕ. Вміст оливи I-20 на рівні 6,5 % дозволяє забезпечити певний компроміс: паста не дуже м'яка, але має помітне покриття поверхні оброблення. Це підвищує ефективну площу контакту та зменшує ризик зрізування крупних зерен. Олеїнова кислота на рівні 1,5 % – це типовий ефективний рівень для середньозернистих сумішей.

ШПП для тонкого шліфування. Вміст 35 % дрібнозернистого абразиву (5–20 μm) дає помірну абразивність та відносно тонку шорсткість поверхні, підходить для передполірувальної стадії. Саме такий вміст абразиву (35 %) можна розглядати як компроміс: досить абразиву для ефективного зняття, але достатньо матриці (воску/оливи) для гарного покриття поверхні і розмазуваності. Менший об'єм твердих часток знижує ризик агресивного «різання» і зменшує забивання інструмента. Висока (55 %) частка воску створює міцну матрицю, утримує абразив і забезпечує стабільність суспензії (мінімальна седиментація). При цьому, досягається більш тверда текстура пасти, але у поєднанні з 8 % оливи, вона має достатню пластичності для нанесення. Вміст оливи I-20 на рівні 8 % зволожує частки абразиву, покращує розмазуваність і зменшує тертя та допомагає надати ШПП кращого контакту з оброблюваною поверхнею та змінює ступінь абразивного контакту (пом'якшує зняття). Деяко підвищений вміст олеїнова кислоти (2 %) є виправданим для дрібнішого абразиву з більшою питомою поверхнею.

ШПП для полірування. Дрібний абразив (1–5 мкм) призначений для тонкого шліфування / передполірування / фінішної обробки. Вміст на рівні 25 % є збалансованим, оскільки забезпечує достатньо частинок для досягнення потрібної шорсткості та тонкого зняття, але не надто багато, щоб не підвищувати питому поверхню і потребу в

диспергаторі. Очікується делікатне, контрольоване зняття матеріалу та хороша якість поверхні. Висока частка воску (65 %) утворює міцну, стабільну матрицю, що утримує дрібні абразивні частки і запобігає седиментації. Паста буде досить твердою при кімнатній температурі, але з 8 % оливи матриця залишається пластичною під навантаженням. Вміст оливи I-20 на рівні 8 % є достатнім для якісного змочування дрібних часток, покращення розмазуваності та гомогенності контактної площі. Забезпечує потрібний баланс між пластичністю та стабільністю. Вміст олеїнової кислоти у кількості 2 % є доцільним через велику питому поверхню дрібного абразиву, зменшує агрегацію, покращує змочування часток воском/оливою і стабілізує суспензію.

Результати проведених лабораторних досліджень запропонованих рецептур ШПП різного функціонального призначення, представлені у табл. 4.

Таблиця 4 – Показники якості отриманих ШПП

Показник	Функціональне призначення ШПП			
	Грубе шліфування	Середнє шліфування	Тонке шліфування	Полірування
Термостійкість, °C	50	53	55	60
Густина при 20 °C, (ρ), кг/м ³	1610	1420	1250	1160
Пенетрація при 25 °C, (x), мм $\times 10^{-1}$	25	47	64	78
Стійкість до фазового розшарування (ψ), % утримання	77	85	91	98
Розмазуваність, (S), см ²	9	12	15	20
Швидкість видалення матеріалу (MRR), г/хв.	3,0	1,6	0,5	0,15
Якість шорсткості поверхні після шліфування-полірування (R_a), мкм	2,2	1,1	0,4	0,1
Час висихання, міс.	6–8	9–12	12–15	15–18

Очевидно, що із збільшенням вмісту воску у ШПП (від 33 до 65 %) збільшується і її термостійкість (від 50 °C до 60 °C), оскільки віск формує стійку матрицю. Підвищення вмісту оливи I-20 (від 5,5 % до 8 %) та олеїнової кислоти (від 1,5 до 2,0 %), збільшує пластичність, але сприяє зниженню термостійкості. При цьому, дрібні частки (1–5 мм) абразиву трохи підвищують термостійкість шару ШПП через щільніше упакування, але ефект невеликий.

Із збільшенням вмісту абразиву (від 25 до 60 %) у ШПП – збільшується її густина – від 1160 кг/м³ до 1610 кг/м³, оскільки абразив має досить високе значення густини (2500 кг/м³), у порівнянні з іншими компонентами (полімерний віск – 910 кг/м³; олива I-20 – 884 кг/м³; олеїнова кислота – 895 кг/м³).

Чим більше абразиву у складі ШПП, тим вона твердіша і характеризується нижчою пенетрацією (при вмісті 60 % абразиву розміром зерен 70–100 мкм, найменше зна-

чення пенетрації – $25 \text{ мм} \times 10^{-1}$). При високому вмісті абразиву паста утворює щільну кристалічну структуру частинок, яка перешкоджає проникненню твердого тіла у структуру ШПП. Велика зернистість абразиву – частинки розміром 70–100 мкм, формують грубу, жорстку ШПП, яка характеризується низькою пенетрацією. Дрібнозернові частинки абразиву (1–5 мкм) формують більш однорідну структуру ШПП, вона є пластичною та характеризується високим значенням пенетрації ($78 \text{ мм} \times 10^{-1}$). Чим більше полімерного воску та оливи у складі ШПП, тим м'якіша матриця, легше деформується під зовнішнім навантаженням та характеризується підвищеними значеннями пенетрації. При цьому, в'язка матриця компенсує твердість абразиву. Додавання олеїнової кислоти покращує розмазуваність і знижує тертя, трохи підвищуючи значення пенетрації. Вплив невеликий, але помітний у дуже м'яких ШПП. Таким чином, при високому вмісту абразиву, що має крупне зерно, ШПП є твердою, з низькою пенетрацією; при меншому вмісті абразиву, що має малу зернистість ШПП є м'якою, з високою пенетрацією.

Розмазуваність ШПП зростає (від 9 см^2 до 20 см^2) із зменшенням вмісту абразиву, зменшенням його зернистості та збільшенням вмісту матриці (полімерний віск + олива І-20).

Швидкість видалення матеріалу (MRR) на пряму залежить від вміст абразиву (%) та його зернистості – чим більший вміст абразиву, тим вищий потенційний MRR. Абразив з зернистістю 70–100 мкм мають вищу здатність різати та швидко видаляти матеріал, абразив з зернистістю 20–50 мкм та 10–20 мкм – працює м'яко, багато з них шліфують поверхню, але з меншою швидкістю зняття. Із збільшенням вмісту зв'язувальної основи та пластифікатору, тим суттєвіше знижується абразивна дія (малий контактний тиск на зерно), тому MRR знижується. Олеїнова кислота – впливає мало на MRR, більше на якість поверхні/розмазуваність. Отже, зі зниженням вмісту абразиву у ШПП (від 60 % до 25 %) та зернистості абразиву (від 70–100 мкм до 1–5 мкм), спостерігається зниження MRR – від 3,0 г/хв. до 0,15 г/хв. (див. табл. 3).

Стійкість до фазового розшарування (ψ , %) суттєво залежить від таких факторів як густина і форма частинок (більш важкі частинки (вища ρ) осідають швидше), в'язкість зв'язувальної основи (чим вища в'язкість, тим краще зв'язувальна основа – матриця утримує абразив), розмір частинок (великі частинки осідають набагато швидше), агрегація (наявність агломератів значно погіршує ψ ; добре дисперговані ШПП витримують центрифугування краще) та температура (підвищення температури зменшує в'язкість матриці, тим самим, знижуючи величину ψ). Отже, великий вміст (60 %) грубих/важких зерен (70–100 мкм) призводить до швидкого осідання абразиву, оскільки тонка матриця не здатна утримувати частинки; помірний вміст абразиву (45 %) і більш в'язка зв'язувальна основа дають кращу стабільність; середні зерна (20–40 мкм) частково осідають; дрібніші частинки (5–20 мкм) при вмісті 35 % у своїй більшості залишаються в однорідній фазі; низький вміст абразиву (25 %), дуже дрібні зерна (1–5 мкм) забезпечують найвищу стійкість до розшарування.

Якість шорсткості поверхні після шліфування-полірування (R_a , мкм) суттєвим образом залежить від: розміру абразивних частинок (визначає мінімальний можливий рівень R_a); вмісту абразиву (чим більше часток, тим інтенсивніше знімається шар, але й вищий ризик залишити глибші подряпини); характеру зв'язувальної матриці (віск + олива + кислота), яка відповідає за рівномірність розподілу абразиву і ступінь згладжу-

вання мікрорельєфу; фракційності (великі зерна залишають сліди десятків мікрметрів, наддрібні – забезпечують полірування до субмікронного рівня).

ШПП для грубого шліфування містить дуже грубий абразив (70–100 мкм), висока частка (60 %) забезпечує сильне знімання, але залишає глибокі подряпини. ШПП для середнього шліфування містить середній абразив (20–40 мкм), а збалансована матриця забезпечує шліфувальний режим із помітним згладжуванням. ШПП для тонкого шліфування містить дрібний (5–10 мкм) абразив та високий вміст зв'язувальної матриці, що забезпечує тонке шліфування-полірування з досягненням ближчого до дзеркального рівня. ШПП для полірування містить дуже дрібний абразив (1–5 мкм), невелика кількість частинок (25 %), що забезпечує чисте полірування до дзеркального блиску.

Час висихання (зберігання без втрати пластичності) для ШПП визначається головним чином: вмістом оливи I-20 (чим більше, тим довше не висихає); часткою полімерного воску (утримує структуру, але схильний до повільної кристалізації); вмістом олеїнової кислоти (покращує диспергування та дещо знижує швидкість висихання); фракцією абразиву (великі частинки прискорюють фазове розшарування і «підсушування», дрібні є більш стабільними). Згідно проведених досліджень, отримані ШПП зберігають робочі властивості від 6 до 18 міс., залежно від свого складу.

Таким чином, зважаючи на отримані результати лабораторного дослідження значимо, що ШПП (60% абразиву (70–100 мкм) / 33% полімерний віск / 5,5 % олива I-20 / 1,5% олеїнова кислота) може бути ефективно використана для чорнового шліфування твердих сплавів, сталі, чавуну. Забезпечує швидке зняття матеріалу, але залишає грубу поверхню та може замінити пасти з карбідом кремнію великої зернистості (F60–F80). ШПП (45 % абразиву (20–40 мкм) / 47 % полімерний віск / 6,5 % олива I-20 / 1,5 % олеїнова кислота) підходить для напівчистового шліфування та підготовки поверхні до полірування при інструментальному виробництві, машинобудуванні, відновленні деталей. Може замінити середньозернисті пасти на оксиді алюмінію (типу ГОІ №2). ШПП (35 % абразиву (5–10 мкм) / 55 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) доцільно використовувати при чистовому поліруванні металів, скла, кераміки; формуванні напівдзеркальної поверхні. Вона виступає аналогом дрібнозернистих ГОІ-паст (№3) або паст на основі оксиду хрому/оксиду алюмінію з розміром частинок 5–10 мкм. ШПП (25 % абразиву (1–5 мкм) / 65 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) перспективно застосовувати для фінішного полірування до дзеркального блиску в таких галузях промисловості як: оптика, приладобудування, інструментальне виробництво, полірування скла й кольорових металів. Вона виступає аналогом високоякісних паст на основі оксиду церію або дрібнодисперсного оксиду хрому.

Висновки. Розроблені шліфувально-полірувальні пасти на основі полімерного воску, відпрацьованої оливи I-20 та олеїнової кислоти з різними концентраціями абразивної фази (склофрагменти різної зернистості) демонструють широкий діапазон технологічних властивостей – від інтенсивного знімання матеріалу $R_a = 2,2$ мкм (ШПП для грубого шліфування) до отримання дзеркальної поверхні з $R_a = 0,1$ мкм (ШПП для полірування).

Ключовими перевагами отриманих ШПП виступають:

– регульованість властивостей за рахунок варіювання фракційного складу та кількості абразиву (можна отримати пасти як для грубого шліфування, так і для тонкого полірування).

– висока стабільність до фазового розшарування (ψ до 95 %) та подовжений термін зберігання (до 18 міс.), що перевищує показники багатьох традиційних паст.

– екологічність і ресурсозбереження – використання вторинної сировини (відпрацьованої оливи та полімерних восків) зменшує вартість ШПП та знижує навантаження на довкілля.

універсальність застосування (від машинобудування та інструментального виробництва до оптичної та скляної промисловості).

– конкурентоспроможність відносно промислових аналогів (ГОІ-пасти, пасти на основі SiC , Al_2O_3 , CeO_2), з можливістю часткової чи повної заміни імпортованих продуктів.

Таким чином, запропоновані композиції є перспективними для впровадження у промисловість завдяки поєднанню високих експлуатаційних властивостей, технологічної гнучкості та економічної доцільності, що відкриває можливості для створення вітчизняної лінійки шліфувально-полірувальних матеріалів нового покоління.

Література

1. Тюлькіна К. О., Колонтай С., Камбур О. Проблеми утилізації відходів в Україні: публічне управління та підприємницький аспект. *Київський економічний науковий журнал*. 2025. № 9. С. 270–278. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-36>.

2. Сторожук В. М., Кшивецький Б. Я., Маєвська О. М., Ференц О. Б. Особливості управління відходами в сучасних умовах. *Вісник ЛДУБЖД*. 2024. № 30. С. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.05>.

3. Лосик М. В., Звір О. М. Технологічні та фізико-хімічні властивості скла : навч. посіб. Львів : ЛНАМ, 2018. 40 с.

4. Вахула Я. І., Магорівська Г. Я. Фізико-хімічні властивості скла. Методи визначення та розрахунку : навчальний посібник. Львів : Левада, 2022. 158 с.

5. Stempkowska A., Gawenda T., Chajec A., Sadowski L. Effect of Granite Powder Grain Size and Grinding Time of the Properties of Cementitious Composites. *Materials*. 2022. 15(24). 8837. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248837>.

6. Жданюк Н. В., Піхуля Н. Д. Аналіз відходів і джерел забруднення скляного виробництва. *Вісник ХНТУ*. 2023. № 1(84). С. 9–17.

7. Борисенко М. О., Сінкевич І. В. Полімерний віск як основа для виробництва шліфувально-полірувальні паст. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 3.

8. Epure C., Munteanu C., Istrate B., Harja M., Buium F. Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields – A Review. *Materials*. 2023. 16(17). 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175957>.

9. Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 191. P. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.

10. Gol F., Yilmaz A., Kacar E., Simsek S., Saritas Z. G., Ture C., Arslan M., Bekmezci M., Burhan H., Sen F. [Назва статті відсутня в оригіналі]. *Ceramics International*. 2021. 47(15). P. 21061–21068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.108>.

11. Almendro-Cande M. B., Jordán Vidal M. M. Glasses, Frits and Glass-Ceramics: Processes and Uses in the Context of Circular Economy and Waste Vitrification. *Coatings*. 2024. 14(3). 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030346>.
12. Ahmad S., Mac-Allister Cedraz F., Borne N., Albert J. N. L., Aw T. G. Characterization and evaluation of recycled glass sand as water filtration media. *Journal of Water and Health*. 2025. 23(6). P. 780–793. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2025.023>.
13. El-Sayed M. S. I., Razek T. A. A. M., Mohamed Y. H. Utilization of crushed glass and ceramic wastes as a filtration medium in drinking water plants. *Journal of Environmental Science*. 2018. 44(2). P. 19–33. DOI: <https://doi.org/10.21608/jes.2018.35408>.
14. Tedjokusuma K., Lauth W., Willenbacher N. Manufacture and filtration performance of glass filters made from capillary suspensions. *Separation and Purification Technology*. 2024. 329. 125097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125097>.
15. Ritter K., McBride A., Chambers T. Soiling Comparison of Mirror Film and Glass Concentrating Solar Power Reflectors in Southwest Louisiana. *Sustainability*. 2021. 13(10). 5727. DOI: <https://doi.org/10.3390/su1310572>.
16. Sun L., Kim M., Doh J.-H., Zi G. A Novel Method of Crushing Glass. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021. 25(12). P. 4763–4770. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2341-6>.
17. Orhororo E. K., Oghoghorie O. Design of Hammer Mill for Crushing of Glass Waste. 2017. 1. P. 1–7.
18. Rank P., Hacker N., Gerdes T. Influence of the initial morphology on the dry-milling behavior of glass. *Powder Technology*. 2025. 467. 121490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121490>.
19. Stoops G. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. 2nd ed. Elsevier, 2018. 982 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01728-5>.
20. Varukha D. A., Smirnov V. A., Edl M., Demianenko M. M., Yukhymenko M. P., Pavlenko I. V., Liaposhchenko O. O. Modelling of Separation and Pneumatic Classification Processes of Airodisperse Systems in the Shelf Device. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. 5. P. 5–9. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).f2).
21. Xing Q., Utami D. P., Demattey M. B., Kyriakopoulou K., de Wit M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. 66. 102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>.
22. Brial V., Tran H., Sorelli L., Conciatori D., Ouellet-Plamondon C. M. Effect of fluorite addition on the reactivity of a calcined treated spent pot lining in cementitious materials. *Cement*. 2023. 12. 100070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100070>.

Bibliography (transliterated)

1. Tiulkina K. O., Kolontai S., Kambur O. Problemy utylizatsii vidkhodiv v ukraini : publichne upravlinnia ta pidpriemnytskyi aspekt. *Kyivskyi ekonomichnyi naukovyi zhurnal*. 2025. No. 9. P. 270–278. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-36>.
2. Storozhuk V. M., Kshyvetskyi B. Ya., Maievska O. M., Ferents O. B. Osoblyvosti upravlinnia vidkhodamy v suchasnykh umovakh. *Visnyk LDUBZhD*. 2024. No. 30. P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.05>.

3. Losyk M. V., Zvir O. M. Tekhnolohichni ta fizyko-khimichni vlastyvyosti skla : navch. posib. Lviv : LNAM, 2018. 40 p.
4. Vakhula Ya. I., Mahorivska H. Ya. Fizyko-khimichni vlastyvyosti skla. Metody vyznachennia ta rozrakhunku : navch. posib. Lviv : Levada, 2022. 158 p.
5. Stempkowska A., Gawenda T., Chajec A., Sadowski L. Effect of Granite Powder Grain Size and Grinding Time of the Properties of Cementitious Composites. *Materials*. 2022. 15(24). 8837. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248837>.
6. Zhdaniuk N. V., Pikhulia N. D. Analiz vidkhodiv i dzherel zabrudnennia sklianoho vyrob-nytstva. *Visnyk KhNTU*. 2023. No. 1(84). P. 9–17.
7. Borysenko M. O., Sinkevych I. V. Polimernyi visk yak osnova dlia vyrobnytstva shlifivalno-polirivalni past. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2025. No. 3.
8. Epure C., Munteanu C., Istrate B., Harja M., Buium F. Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields – A Review. *Materials*. 2023. 16(17). 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175957>.
9. Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 191. P. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.
10. Gol F., Yilmaz A., Kacar E., Simsek S., Saritas Z. G., Ture C., Arslan M., Bekmezci M., Burhan H., Sen F. [Назва статті відсутня в оригіналі]. *Ceramics International*. 2021. 47(15). P. 21061–21068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.108>.
11. Almendro-Cande M. B., Jordán Vidal M. M. Glasses, Frits and Glass-Ceramics: Processes and Uses in the Context of Circular Economy and Waste Vitrification. *Coatings*. 2024. 14(3). 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14030346>.
12. Ahmad S., Mac-Allister Cedraz F., Borne N., Albert J. N. L., Aw T. G. Characterization and evaluation of recycled glass sand as water filtration media. *Journal of Water and Health*. 2025. 23(6). P. 780–793. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2025.023>.
13. El-Sayed M. S. I., Razek T. A. A. M., Mohamed Y. H. Utilization of crushed glass and ceramic wastes as a filtration medium in drinking water plants. *Journal of Environmental Science*. 2018. 44(2). P. 19–33. DOI: <https://doi.org/10.21608/jes.2018.35408>.
14. Tedjokusuma K., Lauth W., Willenbacher N. Manufacture and filtration performance of glass filters made from capillary suspensions. *Separation and Purification Technology*. 2024. 329. 125097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125097>.
15. Ritter K., McBride A., Chambers T. Soiling Comparison of Mirror Film and Glass Concentrating Solar Power Reflectors in Southwest Louisiana. *Sustainability*. 2021. 13(10). 5727. DOI: <https://doi.org/10.3390/su1310572>.
16. Sun L., Kim M., Doh J.-H., Zi G. A Novel Method of Crushing Glass. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021. 25(12). P. 4763–4770. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2341-6>.
17. Orhorhoro E. K., Oghoghorie O. Design of Hammer Mill for Crushing of Glass Waste. 2017. 1. P. 1–7.
18. Rank P., Hacker N., Gerdes T. Influence of the initial morphology on the dry-milling behavior of glass. *Powder Technology*. 2025. 467. 121490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121490>.
19. Stoops G. Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. 2nd ed. Elsevier, 2018. 982 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01728-5>.

20. Varukha D. A., Smirnov V. A., Edl M., Demianenko M. M., Yukhymenko M. P., Pavlenko I. V., Liaposhchenko O. O. Modelling of Separation and Pneumatic Classification Processes of Airodisperse Systems in the Shelf Device. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. 5. P. 5–9. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).f2).

21. Xing Q., Utami D. P., Dematthey M. B., Kyriakopoulou K., de Wit M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. 66. 102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>.

22. Brial V., Tran H., Sorelli L., Conciatori D., Ouellet-Plamondon C. M. Effect of fluorite addition on the reactivity of a calcined treated spent pot lining in cementitious materials. *Cement*. 2023. 12. 100070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100070>.

УДК 662.7

М. О. Борисенко, аспірант, І. В. Сінкевич, канд. техн. наук, доцент

ІННОВАЦІЙНІ ШЛІФУВАЛЬНО-ПОЛІРУВАЛЬНІ ПАСТИ НА ОСНОВІ СКЛЯНОГО АБРАЗИВУ ТА ПОЛІМЕРНОГО ВОСКУ

В статті розглянуто можливість отримання шліфувально-полірувальних паст на базі вторинної сировини – скляного абразиву та поліетиленового воску. Сьогодні, основним джерелом скляного абразиву виступає скляний бій, що утворюється при руйнуванні жилих та інфраструктурних об'єктів під час ведення бойових дій на території України. Відсутність необхідних потужностей для переробки скляного бою, призводить до його накопичення на сміттєзвалищах та полігонах де він становить суттєву загрозу для навколишнього середовища. Разом з цим, значна частка накопичених відходів може перероблятися у абразив для шліфувально-полірувальних паст, які користуються значним попитом при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт. Встановлено, що варіюючи зернистість та вміст абразиву, можна отримувати ШПП широко спектру застосування: ШПП (60 % абразиву (70–100 мкм) / 33 % полімерний віск / 5,5 % олива I-20 / 1,5 % олеїнова кислота) може бути ефективно використана для чорнового шліфування твердих сплавів, сталі, чавуну; ШПП (45% абразиву (20–40 мкм) / 47 % полімерний віск / 6,5 % олива I-20 / 1,5 % олеїнова кислота) підходить для напівчистового шліфування та підготовки поверхні до полірування при інструментальному виробництві, машинобудуванні, відновленні деталей; ШПП (35 % абразиву (5–10 мкм) / 55 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) доцільно використовувати при чистовому поліруванні металів, скла, кераміки; формуванні напівдзеркальної поверхні; ШПП (25 % абразиву (1–5 мкм) / 65 % полімерний віск / 8 % олива I-20 / 2 % олеїнова кислота) перспективно застосовувати для фінішного полірування до дзеркального блиску в таких галузях промисловості як: оптика, приладобудування, інструментальне виробництво, полірування скла й кольорових металів. Запропоновані ШПП завдяки поєднанню високих експлуатаційних властивостей, технологічної гнучкості та економічної доцільності є перспективними для впровадження у промисловість.

Ключові слова: шліфувально-полірувальна паста, скляний абразив, полімерний віск, вторинна сировина, переробка, пластифікатор, диспергатор.

M. O. Borysenko, I. V. Sinkevych

INNOVATIVE GRINDING AND POLISHING PASTE BASED ON GLASS ABRASIVE AND POLYMER WAX

The article considers the possibility of obtaining grinding and polishing pastes based on secondary raw materials - glass abrasive and polyethylene wax. Today, the main source of glass abrasive is glass cullet, which is formed during the destruction of residential and infrastructure facilities during hostilities in Ukraine. The lack of the necessary capacity for the processing of glass cullet leads to its accumulation in landfills and landfills where it poses a significant threat to the environment. At the same time, a significant portion of the accumulated waste can be processed into abrasive for grinding and polishing pastes, which are in great demand during repair and restoration work. It has been established that by varying the grain size and content of the abrasive, it is possible to obtain SPP with a wide range of applications: SPP (60 % abrasive (70–100 μm) / 33 % polymer wax / 5.5 % I-20 oil / 1.5 % oleic acid) can be effectively used for rough grinding of hard alloys, steel, and cast iron; SPP (45 % abrasive (20–40 μm) / 47 % polymer wax / 6.5 % I-20 oil / 1.5 % oleic acid) is suitable for semi-finishing grinding and surface preparation for polishing in tool production, mechanical engineering, and parts restoration; SHPP (35 % abrasive (5–10 μm) / 55 % polymer wax / 8 % I-20 oil / 2 % oleic acid) is advisable to use for fine polishing of metals, glass, ceramics; forming a semi-mirror surface; SHPP (25 % abrasive (1–5 μm) / 65 % polymer wax / 8 % I-20 oil / 2 % oleic acid) is promising to be used for final polishing to a mirror shine in such industries as: optics, instrument making, tool production, polishing of glass and non-ferrous metals. The proposed SHPP, due to the combination of high performance properties, technological flexibility and economic feasibility, are promising for implementation in industry.

Keywords: grinding and polishing paste, glass abrasive, polymer wax, secondary raw materials, processing, plasticizer, dispersant.

Отримано редколегією 04.02.2026

Сінкевич Ірина Валеріївна (Iryna Sinkevych), канд. техн. наук, доцент, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6089-0266>;

Борисенко Максим Олексійович (Maksym Borysenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0001-9397-2911>.