

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.923

Л.П. КАЛАФАТОВА, докт. техн. наук, Покровськ, Україна

МАСТИЛЬНО ОХОЛОДЖУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЧНІ СЕРЕДОВИЩА ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ КРИХКИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Визначені шляхи підвищення ефективності шліфування важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів з урахуванням їх фізико-механічних властивостей і структури. Для конкретних матеріалів встановлені пріоритетні технологічні способи позитивного впливу мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) на процес різання. Встановлено, що дефектність сформованої поверхні при обробці технічних стеклок, ситалів і кераміки залежить від рівня напружено-деформованого стану зони обробки, на який впливають МОТС із підвищеними диспергуючими властивостями.

Ключові слова: мастильно-охолоджуючі технологічні середовища

Определены пути повышения эффективности шлифования труднообрабатываемых хрупких неметаллических материалов с учетом их физико-механических свойств и структуры. Для конкретных материалов установлены приоритетные технологические способы положительного влияния смазочно-охлаждающих сред (СОТС) на процесс резания. Установлено, что дефектность формируемой поверхности при обработке технических стеклок, ситаллов и керамики зависит от уровня напряженно-деформированного состояния зоны обработки, на который влияют СОТС с повышенными диспергирующими свойствами.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие среды

The ways of increasing the efficiency of grinding hard-to-work brittle nonmetallic taking into account their physic-mechanical properties and structure are determined. Priority technological methods for the positive influence of lubricating-cooling media (LCM) on the process of reduction are established for specific materials. It was revealed that the defectness of the surface formed during processing of technical glasses, cetalls and ceramics depends on the level of the stress-strain state of the treatment zone, which is affected by LCM with increased dispersive properties.

Keywords: lubricating-cooling media

Вступ

Сьогодні сучасні галузі промисловості, такі як аерокосмічна, оборонна, ядерна, хімічна, металургійна, інструментальна широко використовують крихкі неметалеві матеріали (КНМ): технічні стекла, кераміки, в тому числі склокераміку - ситали, властивості яких дозволяють забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики виробів для вказаних галузей. До таких показників відносяться підвищені твердість, зносостійкість, теплостійкість, корозійна стійкість та радіопрозорість, але за показниками оброблюваності різанням вони відносяться до важкооброблюваних і передбачають у

технологічних процесах механічної обробки обов'язкові операції шліфування алмазними інструментами для забезпечення потрібної якості сформованої поверхні. Процес обробки різанням супроводжується виникненням приповерхневого дефектного шару, який негативно впливає на експлуатаційні характеристики виробів і має бути видалений різними способами. Для відповідальних виробів, наприклад, елементів аерокосмічної техніки - з подальшим модифікуванням і зміцненням отриманих поверхонь. Глибина і структура дефектного шару впливають на трудомісткість його видалення, а отже і на собівартість продукції, що випускається, і залежать від фізико-механічних характеристик цих матеріалів і умов шліфування [1, 2]. Експериментально і теоретично встановлено [1, 2], що на параметри дефектного шару впливають фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, його вихідна дефектність, а також умови обробки і, у першу чергу, величина сил, які діють на оброблювану поверхню деталі. При шліфуванні силові характеристики процесу визначаються рядом факторів: міцністю оброблюваного матеріалу; схемою шліфування; технологічними можливостями обладнання; режимними параметрами процесу; технологічними параметрами інструмента і його ріжучою здатністю, яка залежить від ступеню зносу абразивних зерен і способу відновлення їх ріжучих характеристик; фізико-хімічними властивостями технологічного середовища (ТС), що використовується. При порівнянні варіантів технологічних процесів (ТП), які відрізняються одним або декількома перерахованими факторами, критерієм їх ефективності можуть бути глибина і структура дефектного шару, який виникає в результаті обробки і досягає оптимальних значень при мінімальних витратах на весь цикл механічної обробки [2].

Таким чином, можна визначити основні напрямки забезпечення заданих вихідних параметрів ТП механічної обробки КНМ, серед яких значне місце займає використання ТС із направленими експлуатаційними властивостями, які полегшують процес диспергування оброблюваного матеріалу.

Виходячи з цього, метою цієї роботи є визначення можливостей підвищення ефективності шліфування (продуктивності, якості і точності обробки) КНМ шляхом використання мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) направленої дії, з конкретними властивостями, які враховують природу і фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу.

Основний зміст роботи

МОТС є одним із найбільш важливих змінних факторів стану системи різання і, з одного боку, грає роль фактору, який знижує інтенсивність силових і теплових навантажень на різальний інструмент і оброблювану деталь, а з іншого – роль засобу, який дозволяє своєчасно видаляти із зони різання стружку і продукти зносу інструменту (рисунок).

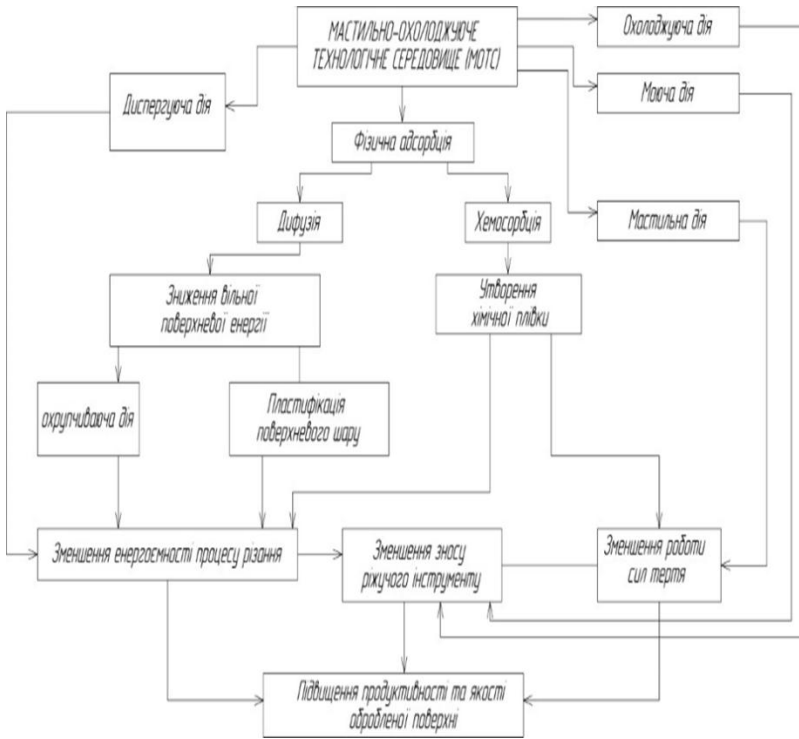


Рисунок – Механізм дії МОТС при механічній обробці КНМ

При обробці крихких неметалевих матеріалів, особливо матеріалів на основі скла, МОТС крім виконання традиційних охолоджуючої, мастильної і миючої функцій здійснюють істотну диспергуючу дію. Останнє, за рахунок знеміцнення поверхневих шарів матеріалу під впливом середовища, дозволяє інтенсифікувати процеси різання і, як наслідок, підвищити продуктивність обробки і працездатність інструменту.

Ефективність процесу формоутворення може бути оцінена величиною питомої інтенсивності формоутворення ($Q_{\text{ф.пит}}$) [3], тобто величиною інтенсивності процесу формоутворення ($Q_{\text{ф}}$), приведеної до одиниці енергетичних витрат на формоутворення ($U_{\text{ф}}$)

$$Q_{\text{ф.пит}} = \frac{Q_{\text{ф}}}{U_{\text{ф}}}. \quad (1)$$

Досліджено теоретичну можливість підвищення ефективності процесу формоутворення за рахунок зменшення енергетичних витрат на

диспергування при використанні поверхнево-активних технологічних середовищ. Прийняв положення [4], згідно якому між окремими процесами різання немає принципіальної різниці, тому що процес стружкоутворення на ріжучих елементах різних інструментів відбувається ідентично, незалежно від їх конструктивного оформлення, розглянемо процес різання як процес, який відбувається при взаємодії різального клину з оброблюваним матеріалом. У цьому випадку енергія формоутворення визначається в основному величиною тангенціальної складової сили різання P_{τ} [3, 5].

При обробці крихких матеріалів типу стекол, ситалів, кераміки в умовах, що забезпечують інтенсивне руйнування припуску, привалює крихке руйнування [6]. В цьому випадку процес різання може моделюватися як процес тріщиноутворення, в якому напружений стан матеріалу при розклинуванні визначається особливостями виникнення і переміщення тріщини руйнування [3]. Тому складові сили різання повинні розраховуватися з позицій тріщиноутворення. Враховуючи сказане, тангенціальна складова сили різання може бути визначена за методикою [5] для обробки крихких матеріалів. Для цього розглядається схема вільного прямокутного різання. Сила різання, що характеризує енергоємність руйнування припуску, визначається опором матеріалу крихкому зсуву в площині максимальних дотичних напружень. Сила, яка призводить зсув, може бути виражена рівнянням

$$P_{\tau} = \frac{ab \cdot \tau_c}{\sin \beta_1}, \quad (2)$$

де a , b – відповідно товщина і ширина шару, що зрізається; τ_c – максимальне дотичне напруження оброблюваного матеріалу; β_1 – кут, який створений площиною зсуву з горизонталлю.

Аналіз механізму відокремлення об'єму матеріалу при руйнуванні КНМ [6] дозволяє наступним чином описати цей процес при різанні. В початковий момент контакту передньої поверхні інструменту з оброблюваним зразком об'єму матеріалу, що прилягає до ріжучої кромки, підлягає деформації зсуву. Збільшення навантаження у сполученні з неоднорідностями зсувоутворення, які викликані наявністю мікродефектів у структурі матеріалу, призводять до різких локальних концентрацій напружень і зародженню магістральної тріщини руйнування. Подальше збільшення навантаження супроводжується ростом тріщини. При досягненні нею критичної величини відбувається сколювання елемента об'єма твердого тіла шляхом крихкого відриву під дією напружень розтягування, які нормальні до поверхні тріщини. Сколювання елемента стружки супроводжується різким падінням напружень у матеріалі. Після цього цикл повторюється. Тангенціальна складова сили різання, що відображає енергетичний характер процесів руйнування, які протікають в оброблюваному матеріалі, також має періодичний пульсуючий характер

зміни. За даними різних авторів [6] час циклу становить 10-3 – 10-5 с. Таким чином, процес стружкоутворення для крихких матеріалів визначається явищем крихкого відриву, який обумовлений періодичним процесом розвитку випереджувальної тріщини [5].

За даними роботи [7], значення сколюючих напружень, що призводять до руйнування об'єму матеріалу по площині сколювання, дорівнює

$$\tau_c = \frac{E\gamma}{Lp_c}, \quad (3)$$

де E – модуль пружності першого роду; γ – питома вільна поверхнева енергія твердого тіла; L – довжина перерізу відколу; p_c – критичне небезпечне напруження, нормальне до площини тріщини.

Для крихких тіл величина p_c співпадає з межею міцності матеріалу розтягування, тобто $p_c = [\sigma_p]$ [8]. Тоді

$$P_\tau = \frac{E\gamma ab}{L[\sigma_p] \sin \beta_1}. \quad (4)$$

Як слідує з рівняння (4), величина тангенціальної складової сили різання, а, отже, і енергоємність процесу різання при обробці крихких матеріалів залежить від значення питомої вільної поверхневої енергії твердого тіла. Змінюючи величину γ оброблюваного матеріалу за рахунок введення в зону обробки поверхнево-активних МОТС, можливо зменшити енергоємність процесу диспергування матеріалу припуску і добитися інтенсифікації процесу.

Полегшення розвитку нових поверхонь, яке супроводжує процеси деформації і руйнування твердих тіл у присутності поверхнево-активних середовищ (ПАС), пов'язано з проявленням адсорбційного ефекту пониження міцності твердих тіл (ефект Ребіндера). Сенс ефекту Ребіндера є в адсорбційному пониженні міцності твердих тіл у результаті пониження вільної поверхневої енергії тіла на поверхнях, що розвиваються при деформації на межі з поверхнево-активним середовищем [9]. Для крихких тіл, у яких міцність (p_c) пропорційна вільній поверхневій енергії γ [9]: $p_c \approx \gamma^{1/2}$, проявлення ефекту адсорбційного ефекту пониження міцності має першорядне значення для визначення енергоємності процесів руйнування.

Однак відомо [10], що ефект Ребіндера проявляється при виконанні ряду умов, основними з яких є: спорідненість хімічного складу і побудови тіла і ТС; особливості реальної структури твердого тіла (його дефектність); умови деформування. Хімічний склад твердого тіла визначає характер взаємодії між атомами (іонами, молекулами) на межі між фазами. Останнє можливо при певній «спорідненості» цих фаз. Для крихких неметалевих матеріалів,

особливо для матеріалів на основі скла, які є речовинами крихкими з типовими гідрофільними поверхнями (тобто ярко вираженою полярністю), найбільше зниження поверхневої енергії і, таким чином, і міцності, відбувається при контакті з найбільш полярною рідиною – водою або водяними розчинами поверхнево-активних речовин (ПАР), яким притаманна висока полярність [11].

На рівень проявлення ефекту адсорбційного зниження міцності суттєво впливає реальна структура твердого тіла. Дефекти структури матеріалів мають надлишкову вільну енергію, тому на них і відбувається інтенсивна адсорбція атомів ПАС. Адсорбція і викликане нею зниження поверхневої енергії призводить до збільшення розмірів мікротріщин. Зниження міцності матеріалу обумовлює зміну (зменшення) рівня критичних напружень, при яких ці мікротріщини гублять стійкість, наслідком чого є руйнування об'ємів матеріалу. Крім того, дефекти структури служать каналами, по яким молекули середовища проникають всередину зразка, інтенсифікуючи розвиток тріщин.

Оброблювані матеріали відрізняють розвинена система вихідних дефектів структури. Наприклад, структура стекло, речовин аморфних, включає дефекти типу неоднорідностей щільності і хімічного складу, непроварів, бульбашок, зародків кристалізації і т. п. Під дією механічних напружень ті або інші дефекти структури матеріалу розвиваються, починають грати роль локальних концентраторів напружень і забезпечують перші розриви міжатомних зв'язків і поступове зародження ультрамікротріщин [12]. Для ситалів (склокераміка) притаманна вихідна дефектність структури у вигляді мікропорожнин або мікрощілин рівномірно, з конкретною для кожної марки ситалу щільністю розташованих в об'ємі матеріалу. Наявність розвинутої мережі дефектів структури в КНМ передбачає інтенсивне проявлення ефекту адсорбційного зниження міцності.

Адсорбційне зниження міцності залежить також від умов деформування. А саме: від характеру напруженого стану, швидкості деформації, температури, кількості ПАС і розподілення її по поверхні зразка, швидкості розповсюдження компонентів середовища по дефектах структури оброблюваного матеріалу і т. д. Найбільш ярко ефект проявляється при жорстких напружених станах із переваженням деформацій розтягування [13]. Різання, а саме шліфування, характеризується позитивно для сильного проявлення ефекту сукупністю умов [14]: високими локальними напруженнями при складному напруженому стані; значними швидкостями контакту інструменту і зразка; циклічними навантаженнями; малими з'ємами матеріалу за прохід.

Однак активні рідкі середовища полегшують обробку твердих тіл тільки в тому випадку, якщо забезпечена їх швидка поверхнева дифузія в зону різання. Тому молекули і атоми ПАС повинні мати високу швидкість міграції.

Крім того використовувані рідини повинні мати низьке поверхнєве натягування, мати добру змочувальну властивість відносно оброблюваного матеріалу.

Змочування твердого тіла рідиною здебільшого залежить від природи сил взаємодії між рідиною і твердим тілом, що характеризується роботою адгезії W_a [15], яка тим більше, чим більше взаємодія контактуючих фаз. Згідно [15], робота адгезії дорівнює

$$W_a = \sigma_{тг} - \sigma_{рг} - \sigma_{тр}, \quad (5)$$

де $\sigma_{тг}, \sigma_{рг}, \sigma_{тр}$ – поверхнєве натягування на межі, відповідно, тіло – газ, рідина – газ, тіло – рідина.

Доказано [15], що змочування можливо при умові $W_a > \sigma_{рг}$. Приблизно можна вважати, що чим менше поверхнєве натягування рідини $\sigma_{рг}$, тим легше ця рідина змочує тверді тіла при умові, що поверхнєве натягування рідини менше роботи адгезії.

Швидкість розтікання рідини залежить від співвідношення рушійних сил і сил супротиву. Рушійні сили визначаються тими складовими вільної енергії системи, які зменшуються при змочуванні. Рушійну силу розтікання можна знайти, використовуючи силову трактовку поверхнєвого натягування [15]. Рушійна сила, віднесена до одиниці довжини периметру змочування ($\sigma_{руш}$), дорівнює

$$\sigma_{руш} = (\sigma_{рг} - \sigma_{тр}) - \sigma_{рг} \cos(\theta_d), \quad (6)$$

де θ_d – динамічний краєвий кут.

Спрощено, умовно прийнявши, що змочування рідиною твердого тіла є повним, отримаємо

$$\sigma_{руш} = \sigma_{тг} - \sigma_{тр} - \sigma_{рг}. \quad (7)$$

ТС є невід'ємною частиною замкнутої технологічної системи і активним фактором участі у процесі формоутворення. Із (7) слідує, що рушійна сила розтікання характеризує енергетичний стан технологічної системи: оброблюваний матеріал (тверде тіло) – ТС (рідина) – атмосфера (газ). Чим менше поверхнєве натягування самої рідини $\sigma_{рг}$ і поверхнєва енергія γ оброблюваного матеріалу на межі з технологічним середовищем $\sigma_{тр}$, тим більше рушійна сила розтікання, тим вище змочування оброблюваного тіла технологічним середовищем. Для конкретного матеріалу, вихідний енергетичний стан якого характеризується поверхнєвою енергією (поверхнєвим натягуванням) на межі з газом $\sigma_{тг}$, збільшення $\sigma_{руш}$ при контакті з ТС пов'язано зі зменшенням поверхнєвої енергії твердого тіла в системі тіло – рідина, що призведе до зниження енергоємності процесів

диспергування. При цьому величина зниження поверхневої енергії в системі здебільшого визначається спорідненістю ТС і оброблюваного матеріалу.

Рушійна сила розтікання може бути прийнята в якості комплексного критерію при виборі ТС, що оцінюються по ефективності їх дії на процесі диспергування матеріалу припуску при механічній обробці КНМ.

У залежності від тривалості контакту об'єму рідини з поверхнею твердого тіла розтікання може здійснюватися послідовно в кінетичному, інерційному і в'язкому режимах [15]. Кінетичний режим розтікання має місце лише на самій початковій стадії розтікання. Його тривалість при контакті малов'язких полярних середовищ із гідрофільним матеріалом орієнтовно складає 10-4–10-6 с, тобто порівнянна з часом створення сколів при різанні (шліфуванні). Швидкість розтікання v_p в цьому режимі пропорційна величині рушійної сили розтікання [15]

$$v_p = A_p \sigma_{руш}, \quad (8)$$

де A_p – коефіцієнт пропорційності.

На подальших етапах розтікання звичайно відбувається в гідродинамічному режимі, формами якого є інерційний і в'язкий режими. Однак і в цих випадках швидкість розтікання середовища пропорційна рушійній силі розтікання.

Для проявлення ефекту адсорбційного зниження міцності ТС повинна бути надійно доставлена в зону утворення крихких тріщин, мати якість, що дозволяють їй швидко розповсюджуватися по цим тріщинам і забезпечувати їх стабільний ріст. Для можливості синтезування ТС з певними заданими властивостями необхідно розглянути механізми розповсюдження ПАС по тріщинам і кінетику росту тріщин при моделюванні процесу різання.

Згідно [16], процес проникнення ПАС у тріщину включає наступні етапи: 1 - послідовне капілярне розтікання рідини всередині тріщини від зовнішньої поверхні вглиб зразка, режим розтікання - інерційний, функція - транспортування середовища вглиб тріщини; 2 - розтікання рідини по поверхні стінок тріщини, режим розтікання - в'язкий, функція - транспортування середовища вглиб тріщини; 3 - поверхнева дифузія атомів ПАС у вершину тріщини, функція - зниження вільної енергії утворюваної поверхні за рахунок полегшення перебудови матеріалу і розриву міжатомних зв'язків у тілі при взаємодії з атомами середовища під час їх проникнення в зону передруйнування; 4 - нерегулярна дифузія (міграція атомів середовища уздовж порожніх дефектів структури), функція - забезпечення вирішального впливу на проникнення атомів середовища по зародковим тріщинам і подальшу дифузію по їх поверхні.

Для того, щоб ТС змогла ефективно впливати на процес руйнування, швидкість її транспортування до вершини тріщини, що утворюється при різі, повинна бути не менше швидкості утворення мікровідколів при різанні. Це

можливо за умови кінематичного режиму розтікання середовища по тріщині. Процес затікання середовища в мікротріщини, що утворюються в зоні різання, інтенсифікується під дією ефекту вакуумування. Створена тріщина під шаром рідини формує вакуумні мікрооб'єми, куди всмоктується рідина. Однак в силу ряду причин [16]: вигнутий меніск у вершини тріщини при капілярному перебігу, різке зростання гідравлічного опору в дуже тонких шарах середовища під стінами тріщини, клиновидний характер профілю вершини тріщини - розглянуті вище механізми поширення ПАС не можуть підвести середовище безпосередньо до вершини тріщини, полегшуючи тим самим його участь в акті руйнування твердого тіла. Зниження вільної поверхневої енергії твердого тіла відбувається за рахунок механізму поверхневої дифузії атомів середовища до вершини тріщини. Так, наприклад, механізм адсорбційної дії ПАР на склі викликається адсорбцією полярних груп цих речовин: OH, COOH, NH₂ та ін. на поверхні при орієнтації вуглеводневими ланцюгами назовні. При цьому полегшуються перебудова структури і розрив міжатомних зв'язків у твердому тілі при взаємодії з атомами середовища під час їх проникнення в зону передруйнування.

За даними роботи [17] при адсорбційному зниженні міцності стекел під дією води поверхнева дифузія є єдиною можливим механізмом проникнення середовища в клиноподібну частину тріщини і, власне, в її вершину. Поверхнева дифузія відбувається на дуже короткому шляху від межі рідкої фази в тріщині до вершини. Тому швидкість росту тріщини руйнування лімітується, як правило, не поверхневою дифузійною, а транспортуванням середовища, швидкість якого залежить від енергетичного стану системи: тверде тіло - середовище - газ. Подальший розвиток зони передруйнування в деформованому матеріалі можливий за рахунок явища нерегулярної дифузії. Чим вище фізико-хімічна спорідненість оброблюваного матеріалу і ТС, тим вище швидкість нерегулярної дифузії і більш ефективним є вплив середовища на характеристики міцності матеріалу.

Наведені вище положення теорії Ребіндера і його послідовників свідчать про можливість зниження енергоємності процесу диспергування припуску при введінні в зону різання адсорбційно-активних ТС. При цьому технологічне середовище і сам процес обробки повинні відповідати наступним умовам:

- ТС повинна бути хімічно і фізично спорідненою оброблюваним матеріалам, речовинам полярним, і бути по відношенню до них адсорбційно-активною;
- з метою забезпечення швидкої доставки адсорбційно-активних компонентів середовища до вершин тріщин, що виникають при різанні, рідина повинна добре змочувати поверхню КНМ, а також забезпечувати високу швидкість розтікання, сумірну зі швидкістю утворення мікротріщин при різанні, що можливо при транспортуванні рідини до вершини тріщини в кінетичному режимі. Для виконання цієї умови середовище повинно мати низьке

поверхнєве натягування і високе значення рушійної сили розтікання. Бажано, щоб середовище мало невелику в'язкість, так як збільшення в'язкості гальмує поширення рідини уздовж стінок мікротріщини.

Сформульованим вимогам при обробці КНМ, особливо матеріалів на основі скла, відповідають полярні середовища, зокрема, вода і ТС на її основі з добавками ПАР, що знижують поверхнєве натягування води і підвищують адсорбційну активність середовища. В цьому випадку технологічні середовища крім виконання традиційних охолоджувальної, мастильної і миючої функцій оказують суттєву диспергуючу дію.

Через відмінності у властивостях металів і КНМ і характері їх руйнування при різанні: пластичний для металів і крихкий для крихких неметалевих матеріалів - при обробці останніх першорядне значення набувають диспергуючі властивості середовища. Мастильна, охолоджувальна і миюча властивості ТС також важливі. Однак при нормальній роботі алмазного інструменту (вільне різання) мастильна дія середовища не має такого вирішального значення як, наприклад, при шліфуванні металів [18]. Пояснюється це відмінностями в умовах контакту інструменту і оброблюваного матеріалу і в фізико-хімічних процесах у зоні різання, умовах тертя і т. д.

Узагальнюючи сказане раніше, можна зробити висновок, що ТС для обробки виробів із КНМ повинна являти собою полярну рідину, що містить у своєму складі поверхнєво-активні добавки, які підвищують диспергуючу дію середовища і поліпшують її доставку в зону обробки за рахунок зростаючої здатності до змочування і розтікання по поверхні оброблюваного матеріалу, а також покращують мастильну властивість ТС за рахунок створення екрануючих плівок між поверхнями контакту виробу та інструменту. ТС повинна мати високі миючі властивості, забезпечуючи за рахунок цього своєчасне видалення продуктів диспергування матеріалу і зношування інструменту із зони обробки, а також знижену в'язкість. Середовище повинне бути нешкідливим для здоров'я робітників, економічним і простим у приготуванні.

Висновки

З огляду на вимоги до фізико-хімічних властивостей ТС, що сформульовані вище, були синтезовані МОТС на базі водних розчинів ПАР (оксіетильованих жирних спиртів, алкілмоносультатів та ін.) для наступних операцій механічної обробки КНМ: лезової обробки технічних стекел (точіння, свердління); шліфування технічних стекел і ситалів вільним абразивом і алмазним інструментом; полірування технічних стекел; алмазного шліфування технічної кераміки різних видів, ультразвукової обробки технічної кераміки [1, 2, 18, 20]. При розробці ТС враховувалися технологічні особливості реалізуємих операцій, а саме: застосований

інструмент і характер його зносу; рівень силового впливу на оброблювану поверхню; особливості та механізми процесу диспергування оброблюваного матеріалу; кінематичні характеристики процесу і т. д. Впровадження розроблених МОТС при виконанні перерахованих вище операцій дозволило відносно базових варіантів ТС (вода, масляні емульсоли) підвищити продуктивність обробки до 30%, зменшити дефектність сформованої поверхні і знос алмазного інструменту до 20%.

Список використаних джерел: 1. Гусев В.В. Технологічне забезпечення якості обробки виробів із технічної кераміки: монографія / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецьк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с. 2. Калафатова Л.П. Технологічні основи підвищення ефективності обробки забезпечення якості виробів із технічних стеклових і ситаллів: дис. . докт. техн. наук : 05.02.08 / Калафатова Людмила Павлівна. Харків, 2001. – 515 с. 3. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с. 4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 5. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.И. Еремин. – М.: Машиностроение, 1956. – 319 с. 6. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей / А.Л. Ардамацкий. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с. 7. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 124 с. 8. Авадзи М. Макроскопический критерий хрупкого разрушения в условиях сложного напряженного состояния / М. Авадзи // Труды америк. общ-ва инж-мех. – 1980. – №3. – С. 19-25. 9. Ребиндер П.А. Адсорбционное понижение прочности металлических монокристаллов и самопроизвольное диспергирование в жидких средах / П.А. Ребиндер, В.И. Лихтман, Л.А. Качанова // Докл. АН СССР. – 1956. – Т. 11. – С. 1278-1281. 10. Вествуд А. Чувствительность механических свойств к действию среды / А. Вествуд, Н. Столова. – М.: Мир, 1969. – 352 с. 11. Шукин Е.Д. О роли межатомных взаимодействий в адсорбционном понижении прочности металлов / Е.Д. Шукин, Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов // Докл. АН СССР. – 1966. – № 167. С. 631-639. 12. Шукин Е.Д. Применение сильно поверхностно-активных сред для интенсификации процессов механической обработки твердых тел и материалов / Е.Д. Шукин, Л.С. Брюханова, З.М. Полукарова, Н.В. Перцов // Физико-химическая механика материалов. – 1976. – N4. – С. 40 - 51. 13. Шукин Е.Д. О понижении прочности стекла под действием микроскопических дефектов, наносимых на его поверхность / Е.Д. Шукин А.Л. Кочанова, З.М. Занозина // Физико-химическая механика материалов. – 1965. – N2. – С. 127- 133. 14. Шукин Е.Д. Развитие исследований адсорбционного понижения прочности твердых тел в работах П.А. Ребиндера и его школы / Е.Д. Шукин, Ю.В. Горюнов, Н.В. Перцов // Физико-химическая механика материалов. – 1978. – № 4. – С. 3-9. 15. Сумм В.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / В.Д. Сумм, Б.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с. 16. Шукин Е.Д. Роль процессов распространения адсорбционно-активной среды по поверхности твердых тел в проявлении эффекта адсорбционного понижения прочности / Е.Д. Шукин, Б.Д. Сумм // Поверхностная диффузия и растекание. – М.: Наука, 1969. – С. 161 - 185. 17. Бартнев Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла / Г.М. Бартнев. – М.: Стройиздат, 1974. – 240 с. 18. Калафатова Л.П. Повышение эффективности шлифования твердых сплавов и конструкционной керамики: монография / Л.П. Калафатова, П.Г. Матюха, Д.В. Поколенко и др. – Покровск: ГВУЗ «ДонНТУ», 2017. – 182 с. 19. Калафатова Л.П. Шляхи підвищення ефективності шліфування виробів із важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів / Л.П. Калафатова // Науковий вісник ДонНТУ. Всеукр. наук. вісник. – Красноармійськ: ДонНТУ, 2016. – №1 (1'). – С. 72-83. 20. Калафатова Л.П. Механізми формирования трещиноватого слоя при шлифовании ситаллов / Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – Вып. 86. – С. 26-34.

- Bibliography (transliterated):** 1. *Gusev V.V.* Tehnologichne zabezpechennja jakosti obrobki virobiv iz tehnicnoi keramiki: monografija / *V.V. Gusev, L.P. Kalafatova*. – Donec'k: GVUZ «DonNTU», 2012. – 250 s. 2. *Kalafatova L.P.* Tehnologichni osnovi pidvishhennja efektyvnosti obrobki zabezpechennja jakosti virobiv iz tehnicnih stekol i sitaliv: dis. . dokt. tehn. nauk : 05.02.08 / *Kalafatova Ljudmila Pavlivna*. Harkiv, 2001. – 515 s. 3. *Starkov V.K.* Dislokacionnye predstavlenija o rezanii metallov / *V.K. Starkov*. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 160 s. 4. *Maslov E.N.* Teorija shlifovanija materialov / *E.N. Maslov*. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 320 s. 5. *Rozenberg A.M.* Jelementy teorii processa rezanija metallov / *A.M. Rozenberg, A.I. Eremin*. – M.: Mashinostroenie, 1956. – 319 s. 6. *Ardamackij A.L.* Almaznaja obrabotka opticheskikh detalej / *A.L. Ardamackij*. – L.: Mashinostroenie, 1978. – 232 s. 7. *Rebinder P.A.* Fiziko-himicheskaja mehanika / *P.A. Rebinder*. – M.: Nauka, 1979. – 124 s. 8. *Avadzi M.* Makroskopicheskij kriterij hrupkogo razrushenija v uslovijah slozhnogo narjazhennogo sostojanija / *M. Avadzi* // Trudy amerik. obshh-va inzh-meh. – 1980. – №3. – S. 19-25. 9. *Rebinder P.A.* Adsorbcionnoe ponizhenija prochnosti metallicheskih monokristallov i samoproizvol'noe dispergirirovanie v zhidkikh sredah / *P.A. Rebinder, V.I. Lihman, L.A. Kachanova* // Dokl. AN SSSR. – 1956. – T. 11. – S. 1278-1281. 10. *Vestvud A.* Chuvstvitel'nost' mehanicheskikh svojstv k dejstvuju sredy / *A. Vestvud, N. Stolova*. – M.: Mir, 1969. – 352 s. 11. *Shhukin E.D.* O roli mezhatomnyh vzaimodejstvij v adsorbcionnom ponizhenii prochnosti metallov / *E.D. Shhukin, B.D. Summ, Ju.V. Gorjunov* // Dokl. AN SSSR. – 1966. – № 167. S. 631-639. 12. *Shhukin E.D.* Primenenie sil'no poverhnostno-aktivnyh sred dlja intensivikacii processov mehanicheskij obrabotki tverdyh tel i materialov / *E.D. Shhukin, L.S. Brjuhanova, Z.M. Polukarova, N.V. Percov* // Fiziko-himicheskaja mehanika materialov. – 1976. – N4. – S. 40 - 51. 13. *Shhukin E.D.* O ponizhenii prochnosti stekla pod dejstviem mikroskopicheskikh defektov, nanosimyh na ego poverhnost' / *E.D. Shhukin A.L. Kochanova, Z.M. Zanozina* // Fiziko-himicheskaja mehanika materialov. – 1965. – N2. – S. 127- 133. 14. *Shhukin E.D.* Razvitie issledovanij adsorbcionnogo ponizhenija prochnosti tverdyh tel v rabotah P.A. Rebindera i ego shkoly / *E.D. Shhukin, Ju.V. Gorjunov, N.V. Percov* // Fiziko-himicheskaja mehanika materialov. – 1978. – № 4. – S. 3-9. 15. *Summ V.D.* Fiziko-himicheskie osnovy smachivanija i rastekanja / *V.D. Summ, B.V. Gorjunov*. – M.: Himija, 1976. – 232 s. 16. *Shhukin E.D.* Rol' processov rasprostranjenija adsorbcionno-aktivnoj sredy po poverhnosti tverdyh tel v pojavlenii jeffekta adsorbcionnogo ponizhenija prochnosti / *E.D. Shhukin, B.D. Summ* // Poverhnostnaja diffuzija i rastekanie. – M.: Nauka, 1969. – S. 161 - 185. 17. *Bartenev G.M.* Sverhprochnye i vysokoprochnye neorganicheskie stekla / *G.M. Bartenev*. – M.: Strojizdat, 1974. – 240 s. 18. *Kalafatova L.P.* Povyshenie jeffektivnosti shlifovanija tverdyh splavov i konstrukcionnoj keramiki: monografija / *L.P. Kalafatova, P.G. Matjuha, D.V. Pokolenko* i dr. – Pokrovsk: GVUZ «DonNTU», 2017. – 182 s. 19. *Kalafatova L.P.* Shljahi pidvishhennja efektyvnosti shlifuvannja virobiv iz vazhkoobroblyvanij krihkih nemetalevih materialiv / *L.P. Kalafatova* // Naukovij visnik DonNTU. Vseukr. nauk. visnik. – Krasnoarmijs'k: DonNTU, 2016. – №1 (1'). – C. 72-83. 20. *Kalafatova L.P.* Mehanizmy formirovanija treshhinovatogo sloja pri shlifovanii sitallov / *L.P. Kalafatova, D.V. Pokolenko* // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Har'kov: NTU "HPI", 2016. – Vyp. 86. – S. 26-34.