УДК 621.9
Верба І. І., к.т.н., Даниленко О. В., к.т.н.
Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена проблемам, які виникають у разі необхідності обгрунтованого вибору нових конструкційних матеріалів або придбанні на ринку готових мехатронних вузлів чи обладнання в цілому, в яких застосовані ці матеріали. Для цього конструктор повинен орієнтуватися у властивостях і у технологіях застосування нових, переважно полімер-композитних, матеріалів, бути здатним здійснити їхнє порівняльне оцінювання (на якісному рівні). Попри наявність чималої кількості інформаційних джерел та досліджень (на рівні дисертацій на присудження наукових ступенів) з вказаної тематики й явну доцільність та технічний ефект використання нових матеріалів, інформація про наслідки їхнього застосування розпорошена й не є чітко структурованою. Стандартні пакети прикладних програм (зокрема й такі популярні, як ANSYS, NASTRAN та ін.) не адаптовані для розрахунку динамічних характеристик несучих систем, тим більш з врахуванням обраного полімер-мінерального матеріалу, а існуючі розробки у цьому напрямі не є всеохоплюючими та універсальними. Отож задача системного аналізу й прийняття рішення з обгрунтованого вибору як матеріалу, так і технології його застосування, є на часі, як і розробка відповідних методик розрахунку отриманих показників працездатності.

Ключові слова: *конструкційні матеріали, мехатронні вузли, нові матеріали, порівняльне оцінювання, системний аналіз, вибір матеріалів, технології застосування.*

Вступ. Для будь-якого високотехнологічного машинобудівного підприємства необхідною запорукою успішності є постійне вдосконалення процесів і технологій та пильна увага до інновацій з метою поліпшення якості власної продукції.

Традиційні матеріали (чавуни та сталі) не можуть забезпечити вимоги до вібростійкості й теплової стабільності базових деталей верстатів, деталі рухомих з’єднань з металів (як чорних, так і кольорових) і сплавів не задовольняють вимоги, які висувають до машин різного призначення, зокрема сільськогосподарських (наприклад, комбайнів), що характеризуються напруженими умовами експлуатації: наявність вологи, абразивного забруднення, температурних коливань, знакозмінних навантажень, динамічних напружень.

Як для металорізальних верстатів і іншого технологічного обладнання, так і для сільськогосподарської техніки придатним є шлях вдосконалення застосовуваних матеріалів: покращення експлуатаційних якостей традиційних матеріалів і технологічних процесів їхнього використання або використання сучасних принципово нових матеріалів, наприклад, мінерал-полімерних композитів, але вимоги до них значно різняться. Наприклад, у сільськогосподарській техніці застосовують антифрикційний полімерний композиційний матеріал сухого тертя Оксафен, в основі якого є суміш полімерних смол та синтетичних волокон. Трибологічні властивості Оксафена перевищують властивості більшості полімерних композитів, які використовують у машинобудуванні (вуглепластиків, текстоліту та ін.) [19], але, наприклад, у верстатобудуванні його практично не застосовують, що зайвий раз доводить необхідність враховувати вимоги до показників працездатності машин та умови їхньої експлуатації.

Постановка проблеми. Для сучасного металообробного обладнання є важливим виконання вимог точності обробки на ньому (тобто тривалої точності і вібросталості самого верстата, забезпечення його жорсткості, параметричної надійності, гнучкості – навіть у противагу продуктивності, тощо). Проблема забезпечення надійності є актуальною хоча б через те, що старіння парку машин відбувається швидше, ніж технічне переозброєння шляхом модернізації.

Характерно застосування високошвидкісних приводів (15000-36000 об/хв та вище), комбінованих приводів та мотор-шпинделів, лінійних двигунів з швидкостями лінійних переміщень 120-360 м/хв (навіть до 500 м/хв – двигуни 1FN3 фірми Siemens). Значно зросли вимоги до часу й точності позиціонування виконавчих органів. Все це вимагає компоновок верстатів, які забезпечують суттєве зниження моментів інерції, і відповідної оптимізації динамічної системи верстату, компоновок відкритої архітектури (із здатністю до

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.,

реконфігурації), які дозволяють змінювати функціональність верстату, тобто забезпечують гнучкість. Цілком логічно, що зросли вимоги й до конструкційних матеріалів та потреба у нових матеріалах з легких сплавів з широким спектром властивостей, у неметалевих і композиційних матеріалах.

Вдосконалення в області матеріалів з метою покращення їхніх експлуатаційних якостей принципово можливо двома шляхами:

− покращення експлуатаційних якостей традиційних матеріалів і технологічних процесів їхнього використання;

− створення принципово нових матеріалів (наприклад, конструкційна кераміка, композиційні матеріали на основі різних наповнювачів чи високомодульних волокон тощо).

Для композиційних матеріалів властиві висока питома міцність, жорсткість, зносостійкість, стабільність розмірів, мала вага, але одночасно висока вартість (з огляду на наукоємність виробництва і умову наявності спеціального вартісного обладнання), анізотропія властивостей тощо. Висока вартість, наприклад, стримує використання композитних матеріалів там, де потрібні значні обсяги матеріалів, зокрема у будівництві. Проте розробка нових композитів на основі багаточисельних можливих компонентів створює спокусливі перспективи. Наприклад, пропонується [14] використовувати стиснений газ у якості твердого наповнювача, що дозволить створити перспективний напрочуд легкий конструкційний та будівельний матеріал. Композитні матеріали мають широке розповсюдження при ремонті й відновленні технічних об’єктів.

Застосування подібних матеріалів є непростою технічною задачею й до того ж потребує економічного обгрунтування. У промислово розвинених країнах реалізуються національні програми з проблем застосування перспективних конструкційних матеріалів у верстатобудуванні.

Аналіз досліджень та рекомендацій. Підвищення точності верстатів без суттєвих конструкційних змін зумовлює зростання трудомісткості їхнього виготовлення чи оновлення, особливо в разі вимоги довготривалої мікрометричної точності та якщо наявні специфічні складальні операції, передбачені операції підгонки, наприклад, для напрямних ковзання (за деякими джерелами [4], трудомісткість пригоночних робіт у 1988 р. на підприємствах Мінстанкопрому становила 24 % від загальної трудомісткості складання верстатів, а 68 % від неї припадало на складання базових деталей з напрямними ковзання). Тому вдосконалення технології трудомістких та малопродуктивних методів обробки, зокрема, виготовлення базових деталей верстатів, має велике значення. Іншим шляхом є конструктивні зміни (наприклад, заміна тих же напрямних ковзання рейковими напрямними кочення, якщо це дозволяють компоновка, конструктивне виконання, габарити, технічні характеристики верстату), вибір сучасних матеріалів і відповідних технологій.

Одним з основних параметрів, які визначають точність і, до речі, параметричну надійність металообробного обладнання, є жорсткість технологічної системи верстат-пристосування-інструмент-деталь, підвищення якої є головною задачею забезпечення якісної механічної обробки.

Жорсткість верстату є суттєвим фактором загальної жорсткості технологічної системи, визначає точність форми та розмірів і якість поверхні оброблюваних на верстаті деталей, а також вібросталість процесу різання і, відповідно, граничні режими різання та продуктивність верстату. Базові деталі й елементи верстатного обладнання повинні мати жорсткість, яка характеризується деформацією до 0,03 мм/м від навантаження власною вагою та вагою додаткового обладнання, та точністю поверхонь встановлення біля 0,001 мм/0,2 м довжини поверхні. Звісно, кожен з вузлів верстату вносить у загальну жорсткість системи свою частку, яка при тому не лишається постійною протягом експлуатації верстату. Наприклад, жорсткість підшипника змінюється при обертанні та деформаціях згину його кілець силами, які діють з боку тіл кочення, наслідком чого є так звана структурна вібрація підшипника. Частка шпиндельного вузла в загальному балансі точності обробки в процесі експлуатації верстата зростає до 80 % через зношення деталей вузла, що перебувають у контакті, зокрема, на думку багатьох дослідників, через фретинг-корозійне зношення контактуючих поверхонь підшипникових з’єднань [3, 20].

Фретинг-корозія, як відомо, є руйнацією спряжених поверхонь деталей, які номінально є нерухомими одна відносно одної, внаслідок відносних зворотно-поступальних переміщень з дуже малою амплітудою та високою частотою. Існують і конструктивні особливості, що сприяють процесу фретинг-корозії, наприклад, посадки підшипників із зазором, які значно збільшують пружні коливання зовнішнього кільця [1], сприяють зношенню з’єднання „зовнішнє кільце-посадковий отвір корпусу“.

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.,

З цієї точки зору доцільними є керамічні підшипники, тобто знову постає проблема застосування нових матеріалів.

Для відновлення зношених деталей застосовують технологічні процеси, які грунтуються на використанні наноструктурованих покриттів із сучасних полімерних матеріалів. При тому це стосується не лише верстатів, а й тракторів та інших сільськогосподарських машин, автомобілів тощо. Однак застосування сучасних матеріалів при ремонті зношених деталей, зокрема підшипників кочення, зумовлює необхідність забезпечити точність не лише відновлюваного з'єднання, а й точність ланок, які замикають розмірний ланцюг.

Отже треба розрізняти кілька напрямків, для кожного з яких має суттєве значення обгрунтований вибір матеріалу і при тому мова йде про нові сучасні матеріали з якісно новими властивостями. Отож сучасні матеріали застосовують:

- при створенні нового обладнання для несучих систем верстату і корпусних деталей, оскільки традиційні для верстатобудування матеріали не задовольняють вимоги у першу чергу до жорсткості деталей та вузлів, яка, як відомо, не залежить від міцності, та до здатності демпфірувати коливання і теплової стабільності;
- у складі покупних деталей та вузлів, які застосовують як для нових верстатів, так і для оновлення, реконфігурації і ремонту;
- при оновленні й ремонті металообробного обладнання, яке знаходиться в експлуатації і є морально й фізично застарілим, тобто не дозволяє забезпечити високі вимоги за точністю й якістю механічної обробки.

В усіх випадках необхідно знати властивості матеріалів, рекомендації щодо сфери застосування, технологічні процеси, переваги, які отримаємо, й проблеми, з якими можемо зустрітися. Наприклад, технологічні закономірності формування відхилень форми й взаємного розташування напрямних елементів поверхонь базових деталей верстата, що виготовлені з полімерних матеріалів або виникнення напружено-деформованого стану внаслідок усадки полімерного шару, що зумовлює відхилення форми у поздовжньому перерізі [4].

Викладення основного матеріалу. А власне про які саме неметалеві матеріали йдеться?

Інтерес до полімерних напрямних у Радянському Союзі виник у 70-80 р. р. минулого сторіччя, коли були проведені відповідні дослідження, зокрема у ЭНИМСі під керівництвом Д.М. Решетова.

Одним з перших неметалевих матеріалів для базових деталей з'явився залізобетон, але зараз його використовують обмежено у важких верстатах: зменшує вібрації, металоємність знижується на 50-60 %, одночасно збільшується товщина стінок для збереження жорсткості (при цьому вага не збільшується понад норму, деформація конструкції зменшується на 35-45 % порівняно із чавунною за однакових навантажень [15]).

Останніми десятиріччями спостерігається зростаюче зацікавлення полімербетоном та аналогічними матеріалами як можливою заміною металу для виготовлення станин верстатів та корпусних деталей.

Полімербетон (мінерал-полімерний композит [13]) розроблювався як альтернатива сталевим, чавунним, бетонним та залізобетонним станинам металообробного обладнання, є багатокомпонентним, принципово відрізняється від традиційного цементо-бетону синтетичним в'яжучим матеріалом (епоксидні, акрилатні, поліефірні смоли тощо), який твердішає у холодному стані. Епоксидні смоли в порівнянні з акрилатними та поліефірними мають меншу об'ємну усадку (не вище 0,03 % [11]) при полімеризації та довший час перед початком полімеризації. Полімербетон містить також наповнювач з різного розміру силікатних зерен твердих порід (базальт, кварц, граніт), можуть додаватись немінеральні речовини, такі як сталь чи скло (у формі дрібнодисперсного порошку), або речовини у вигляді волокон. Чітких критеріїв з оптимізації вмісту різних компонентів немає. Областю використання є станини й стійки прецизійних верстатів, великі виливки простої конфігурації, корпуси коробок передач та шпиндельних бабок, деталі вимірювальної та спеціальної техніки (замінює натуральний граніт з одночасним зниженням трудомісткості механічної обробки). На форму відливок майже немає обмежень, відливки можуть бути склеєні між собою. Забезпечує [11]: збільшення демпфіруючої здатності (логарифмічний декремент згасання коливань вдвічі вищий, ніж у залізобетону, в 5 разів, ніж у чавуна, у 10 разів, ніж у сталі, корпусні деталі мають покращені акустичні характеристики) і жорсткості (завдяки високому, порівняно з бетоном, модулю пружності – ≈40 кН/мм^2), зменшення теплопровідності при збільшеній теплоємності, вище розмірна точність (для відливок – 0,1-0,3 мм/1000 мм) та якість поверхні, навіть можна відмовитись від деяких операцій механічної обробки (за умови високої точності і якості поверхні форм), антикорозійність (зумовлює

економію корозійностійкої сталі). Станини з полімербетону мають значно меншу вагу (0,03-5,0 т порівняно з 0,1-200 т станин із сталі чи чавуну), але стінки в середньому товщі у 3-4 рази порівняно із сталевими і чавунними відлитими станинами (80-1000 мм проти 5-300 мм). Додатковою перевагою є можливість завдяки холодному литтю інтегрувати в несучу систему значну кількість датчиків та комунікацій, наприклад, таких, як система труб для підтримання стабільної температури станини, канали для кабелів та рідин, датчики напружень в станині та інше.

Деталі, що вмонтовані в станину під час заливки (різьбові та транспортні анкери, труби, датчики, баки) повинні бути точно закріплені на формі для лиття та не перешкоджати потоку рідкого матеріалу або виходу повітря з форми. Мінімальна товщина стінки має перевищувати 5-8 діаметрів найбільшої фракції наповнювача. Вагу можна зменшити встановленням легких або пустотілих тіл всередину відливки.

Необхідно брати до уваги коефіцієнти теплового розширення різних матеріалів деталей, що знаходяться у відливці, оскільки при значному тепловому розширені можливе руйнування відливки.

Як недолік, можна назвати зростання вартості на 10-15 % (особливо за ускладнення конструкції станини) за рахунок значної кількості закладених елементів і вартості виготовлення модельного оснащення, але за серійного виробництва цей недолік втрачає актуальність. До того ж полімербетон може бути непридатним в умовах потреби значного тепловідведення (сталий при температурах до 100°С), є чутливим до органічних розчинників (типу ацетону), а залишки від полімербетонного литва не утилізуються.

Полімербетон застосовують для виготовлення прецизійних верстатів токарної й шліфувальної груп, а також для важких верстатів фрезерно-розточувальної групи. Його використано, наприклад, у токарних верстатах фірм Emag, Index (Німеччина), Oerlikon-Boehringer (Швейцарія), Ernaul-Tojota (Франція-Японія), Manurhin (Франція), у фрезерних – Hermle (Німеччина), у шліфувальних – Studer (Швейцарія), Elb-Schliff (Німеччина), у багатоцільових – Turchan (США) та інш..

Різновидом полімербетону є високонаповнений композиційний матеріал синтегран (аналоги − гранітан, мікрограніт) [2, 11, 12, 13, 16], що містить часточки й порошок (менше за 60 мкм) граніту й не більш за 10-11 % полімерного в'яжучого: велика частка в'яжучого (взагалі може складати 7-25 %) зумовлює зниження модулю пружності та теплостійкості, збільшує схильність до жолоблення. За фізико-механічними і експлуатаційними властивостями аналогічний до натурального граніту, відрізняється технологічно – можливістю формувати деталі складної форми. Фізико-хімічні й фізико-механічні та технологічні властивості епоксидного в'яжучого наведені [11]. Вироби із синтеграну (базові деталі практично всіх типів верстатів) виготовляють за безвідходною технологією віброущільненням у формах, практично з нульовою усадкою.

Використання 1 т синтеграну замінює 0,8-0,9 т чавуну, дозволяє зекономити 2 т ливарних пісків, 0,5 тис кВт×год електроенергії, знизити трудомісткість виготовлення деталей на 20-30 людино×год [5].

Загалом вивченню статичних і динамічних характеристик станин верстатів, виготовлених з мінерал-полімерних композитів присвячена певна кількість наукових робіт, але низка теоретичних та практичних питань їхньої працездатності потребує докладнішого вивчення, структурування, узагальнення і розробки практичних технологічних та експлуатаційних рекомендацій до використання.

Із синтеграну виготовляють також ріжучі інструменти (фрези, різці, пили, напилки тощо), елементи пристосувань та спеціальне оснащення, вимірювальні інструменти та відповідальні деталі вимірювальних комплексів і прецизійного обладнання (зокрема верстатів з точністю обробки 0,001 мкм), елементи будівельних конструкцій, вироби військового призначення, сантехнічні й побутові вироби, засоби екологічного захисту, тощо. При виробництві високоточного обладнання у таких країнах, як США, Швейцарія, Франція, Німеччина, Велика Британія, Японія застосовують матеріали, що є аналогами синтеграну.

На даний момент відпрацьовані технології виготовлення виробів із синтеграну та конструкції оснащення, є конструкторська документація. Існує багаторічний досвід експлуатації виробів.

Літієві смоли DWH (фірма «DIAMANT», Німеччина) [10] містять понад 80 % металу (чавун/сталь, алюміній) або мінеральних наповнювачів у суміші із спеціальними епоксидними смолами. Використовують для відновлення пошкоджених або зношених відливків та деталей машин, валів, підшипників, турбін та ін., виготовлення інструментів, моделей, пристосувань тощо, тонкого юстирувального ковзного покриття для напрямних супортів, стойок, повзунів і т. д., що тривалий час працюють із значним навантаженням (Діамант DWH-745: точна форма без додаткової обробки, коефіцієнт тертя < 0,05 мкм (близький до тефлону), зносостійкість – < 0,003 мм/100 км

(як у твердої сталі), добре демпфірування). Придатні для усунення каверн у відливках, надійного з'єднання будь-яких металів, скла, бетону, деревини, кераміки і т. д. Може бути рідким чи у вигляді пасти. Для отвердіння не потрібні ні спеціальні умови (тиск, температура), ні спеціальне устаткування. Придатні для подальшої інструментальної обробки. Матеріал теплостійкий, холоднотвердіючий, не має усадки, не поглинає вологу

Волокнисті композиційні матеріали (вугле-, склопластики тощо) застосовують у рухомих вузлах – столи, бабки, салазки, шпинделі деяких верстатів, можуть бути у комбінації – станина з полімербетону, а стіл з волокнистого пластику. Деталі міцні й легкі: вага, наприклад, шпинделя з вуглепластику зменшується у 6 разів. Зменшення маси і, відповідно, моментів інерції дає можливість підвищити швидкість робочих рухів. Забезпечується висока зносостійкість, малий коефіцієнт теплового розширення, є можливість вплинути на властивості матеріалу розташуванням волокон. Недоліком є зменшення модуля пружності порівняно зі сталлю, що накладає певні конструктивні обмеження.

Але вуглепластики можна використати не лише для виготовлення корпусних деталей: наприклад, розроблені конструкції двошарових підшипників ковзання з металу та антифрикційного вуглепластика і змащуванням водою для гідротурбін, відцентрових насосів тощо [17], які ще й забезпечують амортизаційні властивості.

Склопластики мають високу міцність, легко оброблюються, сталі до теплових і знакозмінних навантажень, корозійностійкі. Склотекстоліти (склопластики на основі тканин для армування) широко застосовують у авіації, суднобудуванні, автомобілебудуванні).

Конструкційна кераміка на основі карбіду кремнію і бору, нітриду кремнію (з легуючими складовими), оксиду алюмінію є твердим, міцним (за температур вище 1000°С є міцнішою за будь-який сплав), зносостійким, антикорозійним матеріалом, з малим коефіцієнтом лінійного розширення та сталим до перепадів температури, з низьким коефіцієнтом тертя. Є матеріали, які за експлуатаційними характеристиками можуть замінювати жароміцні сплави. Властивості керамічних матеріалів значним чином залежать від параметрів і технології виготовлення.

Основні сфери використання: ріжучий інструмент, деталі двигунів внутрішнього згорання, газотурбінних, авіаційних, дизельних поршневих тощо. У високошвидкісних шпиндельних вузлах отримали широке розповсюдження керамічні шарикопідшипники кочення (наприклад, з нітриду кремнію) та гібридні, в яких керамічними є лише кульки. Ці підшипники забезпечують приблизно вдвічі більшу швидкохідність, зменшений в ~1,8 рази нагрів, нижчі коефіцієнти тертя та лінійного розширення (~ на 75%).

Зараз сформульовані основні вимоги, які враховують при проектуванні керамічних деталей [18]: в навантажених зонах керамічна деталь не повинна мати концентратори напруги, найкраще працює на стискання; щоб уникнути мікротріщин, в цих деталях не роблять уступи й проточки, не свердлять отвори; металеві й керамічні деталі одного виробу повинні мати однакові коефіцієнти лінійного розширення, в місцях контакту з металом передбачають компенсаційні чи демпфірувальні прокладки (кераміка має теплоємність вдвічі більшу за метал, що зумовлює теплові деформації, бажано, щоб температура керамічної деталі по всьому об'єму була однаковою).

Недоліки кераміки – крихкість та складність обробки, погане сприйняття механічних або термічних ударів, циклічних навантажень, чутливість до надрізів.

Не слід забувати й про використання нетрадиційних для конкретного виробу металевих матеріалів. Наприклад, корпус шпиндельної головки, виготовлений з алюмінієвого сплаву з низьким коефіцієнтом теплового розширення, дозволяє збільшити жорсткість та зменшити масу на 20-30%.

Перспективним матеріалом у машинобудуванні, кораблебудуванні, будівництві та інших галузях техніки є пінистий алюміній. Це алюміній або сплав алюмінію, що має пористу (чарункову) будову, яку насичено воднем (85-90 %), тобто складається із заповнених газом закритих металевих чарунок. Мала питома вага (0,23-0,75 г/см^3) поєднується з низькою теплопровідністю й порівняно високим модулем пружності. Легкий, теплостійкий матеріал, який має демпфіруючі властивості, не утворює тріщини за перепадів температур, не горить. Технічний ефект використання: підвищення жорсткості порожнистих профілів; демпфірування та енергопоглинання; захист від ударів.

На даний час є дуже перспективним для автомобілебудування: кузов з тришарових алюмінієвих листів з середнім шаром з піноалюмінію на 50 % легший за сталевий, у 10 разів стабільніший і жорсткіший.

До речі, як уже згадувалось, існує розробка [14], яка передбачає використання стисненого газу, наприклад, у тонкостінних сталевих трубках, в якості твердого наповнювача у композитах. Газ складає основний об'єм цього матеріалу, чим забезпечуються гарні масогабаритні характеристики.

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.,

Окрім пінистого алюмінію, застосовують також близький за властивостями пористий алюміній з відкритими чарунками, який отримують методом литва з використанням наповнювача, що потому видаляється, або гальванічним покриттям пінополіуретаном, який потім також видаляється. Щільність становить 0,9-1,2 г/см^3. Має високу жорсткість.

Якщо казати про осучаснення, оновлення та ремонт металообробного обладнання у зв'язку із сучасними матеріалами, то в першу чергу це стосується

- використання покупних вузлів, найчастіше мехатронних (шпиндельних вузлів з керамічними підшипниками, напрямних кочення, лінійних підшипників, керамічних дроселів у системах живлення аеростатичних підшипників тощо), показники працездатності яких повинен уявляти собі конструктор для обгрунтованого вибору;
- ремонту окремих вузлів та відновлення зношених поверхонь, в першу чергу – напрямних, здебільшого напрямних ковзання у важких верстатах;
- виготовлення окремих деталей.

Застосування ЧПК у верстатах підвищує вимоги до покриттів ковзних поверхонь, бо вимагає забезпечення точності й сталості переміщень та стабільності положення вузлів. Для напрямних ковзання проблемними завжди були малі переміщення: малі за швидкістю й за шляхом. Нерівномірність повільних рухів визначається в основному різницею тертя спокою й тертя руху, а також жорсткістю привода та рівнем демпфірування коливань.

Значна різниця коефіцієнтів тертя спокою і руху у парах тертя чавун-чавун викликає відносно велику похибку позиціонування(до 0,01…0,02 мм), що неприпустимо для ряду верстатів, зокрема – верстатів з ЧПК. Певний час властивості напрямних ковзання покращували термообробкою, додаванням у матеріал легуючих складових (нікель, хром, молібден), зносостійкими покриттями (хромування, покриття напилом молібдену тощо).

З часом все ширшого розповсюдження набрали накладні напрямні ковзання (наприклад, пара бронза-чавун), які потребували оцінки доцільності, бо були дорожчі за рахунок складання й забезпечення кріплення. Але з часом необхідність забезпечити потрібні властивості з'єднань тертя переважила міркування вартості виготовлення, до того ж були розроблені й досліджені відповідні технологічні процеси. Для накладних напрямних рухомих вузлів у парі з напрямними станини з чавуну чи сталі почали використовувати антифрикційні матеріали на полімерній основі, які мають низький коефіцієнт тертя й мінімальну різницю між тертям спокою та руху.

У напрямних ковзання застосовують:

a) пластини або закладені напрямні з наповненого фторопласту (наповнювач – бронза, кокс, графіт, дисульфід молібдену, що одночасно відіграють роль мастила). Пластини встановлюють у спеціально оброблені заглиблення в напрямних, приклеюють епоксидним клеєм та іноді додатково закріплюють гвинтами від зміщення, а захист бічних кромок пластин від мастила та охолоджуючої рідини забезпечують антифрикційними пастоподібними епоксидними компаундами. Потребують остаточної підгонки. Чистий фторопласт не використовують, бо має великі пружні залишкові деформації під навантаженням та швидко зношується. Коефіцієнт тертя у парі з чавуном – 0,09…0,12, у парі із загартованою сталлю – 0,04…0,06, практично не залежить від швидкості ковзання і мало змінюється в області низьких швидкостей. Характерні висока зносостійкість, точність та чутливість позиціювання (зона нечутливості порівняно з традиційними напрямними «чавун-чавун» зменшується у 3-6 разів); достатні жорсткість та рівномірність руху; добрі антистрибкові властивості. Напрямні з матеріалу Ф4К15М5 мають менші релаксаційні автоколивання, ніж напрямні кочення, та збільшену несучу здатність.

b) Композиційні матеріали на полімерній основі (у формі пасти) для створення покриттів товщиною 0,4-6 мм і площею 2×2 м та більше

c) Літієві компаунди

Розроблені технології застосування різних полімерних композицій:

- на основі анаеробних герметиків, але треба забезпечити спеціальні умови тривалого процесу (не менш за 12 год) полімеризації композицій, використовувати високоточне спеціальне калібрувальне оснащення значної вартості. Характерна значна технологічна усадка;
- на основі двокомпонентних композицій (так звані клей-компаунди), полімеризація яких відбувається за кімнатної температури на повітрі. Отриманий матеріал є високоміцним водо-, масло-, бензиностійким, добре оброблюється різанням.

В інформаційних джерелах є інформація про дослідження технологічних процесів створення напрямних з полімерними композиціями. Наприклад, [4] встановлено зв'язок між конструктивними особливостями базових деталей з напрямними, товщиною полімерного шару,

способом виготовлення та геометричними відхиленнями форми і взаємного розташування напрямних з полімеру. Впровадження запропонованих і досліджених та обмежено досі впроваджених методів [4] дозволяє скоротити час твердіння полімеру у 3-8 разів, а тривалість виробничого циклу на 75 %

Для оновлення, ремонту та й в нових верстатах, особливо у верстатах з ЧПК і великогабаритних, використовують напрямні у вигляді покриття товщиною 1,5…2,5 мм, які формують з антифрикційних епоксидних компаундів (АЕК) з використанням спеціальної системи подачі компаунда безпосередньо на оброблених металевих напрямних станини чи рухомого вузла.

Засоби нанесення:

- заливання (спеціальна марка АЕК у вигляді рідини);
- намазування (шпаклювання) передбачає застосування АЕК у вигляді пасти;
- запресовування (також пастоподібний АЕК).

Заливання використовують для напрямних великої площі важких та унікальних верстатів, переважно розташованих горизонтально.

Пастоподібні АЕК дуже технологічні: дозволяють виготовити напрямні без механічної обробки: форма напрямних станини копіюється пастоподібним шаром при рухові вузла по напрямних станини. Ці напрямні мають коефіцієнт тертя ≈ 0,03, тобто 1/7 відносно пари «чавун-чавун».

За необхідності після затвердіння подібне покриття може бути оброблене різанням (наприклад, нанесені канавки для мастила).

Окрім експлуатаційних характеристик, важливими є технологічні властивості, які визначають можливість формування деталі (зокрема, текучість суміші, швидкість твердіння полімерного шару чи придатність до обробки, межа міцності з'єднання полімерного покриття з гладкою чи рифленою поверхнею).

Треба також розуміти і враховувати, що фізико-механічні властивості матеріалів поверхонь деталей, які контактують, в разі , коли мова йде про залізно-вуглецеві сплави й полімерні композиції, відрізняються значним чином. Жорсткість полімерного покриття знижується під дією робочих температур при експлуатації. Цю особливість треба враховувати при виборі матеріалу. Є два шляхи вирішення цієї проблеми:

1) на розмір поверхні, яку виготовляють з полімерних матеріалів або відновлюють з їхнім використанням, жорстко задати допуски з врахуванням можливих додаткових деформацій полімерного шару. Наслідок − підвищення собівартості технологічного процесу через використання високоточних методів обробки й вартісного технологічного оснащення;

2) обрати полімерні матеріали з певною межею деформативності. Результат − збереження існуючих норм точності на виготовлення чи відновлення деталі. Проблема: необхідність додаткових теоретичних та експериментальних досліджень і моделювання поведінки деталі в умовах експлуатації. Прикладом розв'язку подібної задачі є [6], але розглянуто конкретний випадок, наведена методика, якою можна скористатися, але кожного разу задачу треба розв'язувати заново, враховувати особливості деталі і вузла, для якого її призначено, специфіку навантаження й умов експлуатації, це ще без врахування відповідної кваліфікації фахівця.

При розробці нових конструкцій і ремонті металообробного обладнання є розповсюдженим матеріал Моглайс (фірма «Діамант», Німеччина) як покриття систем ковзання із властивістю самозмащування, що за умови точного формування твердішає без усадки. Випускають у рідкому стані або у вигляді пасти. Економічність застосування забезпечується за товщини шару матеріалу не більш за 1,5 мм. У верстатах застосовують для відновлення поверхонь напрямних, в першу чергу у важкому обладнанні, для вертикальних напрямних тощо.

З метою зменшення коефіцієнту тертя і, відповідно, зношення, запропоновано [7] вкладень підшипника ковзання, який містить вставки з твердого наповнювача на основі композитного матеріалу «Моглайс» та з додатковим вмістом 33% консистентного мастила і має здатність самозмащуватися. Площа поверхні композитних вставок становить 10-15 %. Подібними підшипниками у важконавантажених вузлах з не дуже досконалим змащуванням, зокрема у металургічному виробництві, можна замінити традиційні підшипники ковзання з вкладнями з бронзи, яким властиве значне зношування і як виготовлення, так і ремонт яких вимагають значних витрат.

Висновки. Таким чином, інформаційне дослідження, матеріали якого наведені у даній роботі, підтвердило широке розповсюдження сучасних неметалевих матеріалів із значним

технічним ефектом. Конструктор повинен орієнтуватися у властивостях цих матеріалів та можливих наслідках їхнього використання, притому незалежно від того, чи він застосовує цей матеріал (тоді, відповідно, треба мати спеціальні знання щодо технологічних особливостей використання у кожному конкретному випадку), чи планує застосувати покупний вузол. На жаль, попри досить широке використання нових конструкційних матеріалів, інформація про наслідки їхнього застосування розпорошена й не є чітко структурованою. Стандартні пакети прикладних програм (зокрема й такі популярні, як ANSYS, NASTRAN та ін.) не адаптовані для розрахунку динамічних характеристик несучих систем, тим більш з врахуванням обраного полімер-мінерального матеріалу, а існуючі розробки у цьому напрямі (наприклад, [9]) не є всеохоплюючими та універсальними. Отож паралельно із розробкою нових матеріалів та технологій їхнього використання необхідно досліджувати наслідки цього використання, обгрунтовувати доцільний вибір як матеріалу, так і технології для конкретних умов на базі методів системного аналізу й прийняття рішення (багатокритеріальний аналіз альтернатив), і розраховувати отримані показники працездатності, що потребує також розробки відповідних методик розрахунку. До того ж треба враховувати перспективність 3D-друку, зокрема й для елементів станин без спеціального оснащення й шліфування напрямних. Розробка й впровадження подібних принтерів не за горами, але то вже тема дещо іншої розмови.

Інформаційні джерела

1. Альбер А.Я., Бочаров Н.Ф., Минаев А.А., Семенов В.М. Упругие волны в наружном кольце подшипника качения при радиальном нагружении // Известия ВУЗов. Машиностроение. -1989. – №5. – С.32-37

2. Барт В.Е., Санина Г.С., Шевчук С.А. Опыт применения синтеграна в машиностроении // Станки и инструмент − 1993. − №1. − с. 15-17.

3. Воронкин В.А., Евланов В.В., Горбунов А.Г. Эксплуатационные отказы подшипниковых узлов электродвигателей // Станки и инструмент − 1993. − №5. − с. 13.

4. Джафаров Шукуф Исфендияр кызы Технологическое обеспечение качества изготовления направляющих элементов металлорежущих станков с использованием полимера автореф. канд. дис. спец 05.02.08 – М. (МГТУ им. Н.Э.Баумана), 2000 – URL: http://tekhnosfera.com/tehnologicheskoe-obespechenie-kachestva-izgotovleniya-napravlyayuschih-elementov-metallorezhuschih-stankov-s-ispolzovanie#ixzz4bQemOzgG

5. Елин А.В. Повышение эффективности и качества обработки полимербетонов шлифованием: на примере синтеграна. автореф дис. канд. техн. наук, / 05.03.01 – М, 2008. – URL: http://tekhnosfera.com/povyshenie-effektivnosti-i-kachestva-obrabotki-polimerbetonov-shlifovaniem

6. Ефанов С. А. Обеспечение параметрической надежности ремонтно-технологического оборудования восстановлением шпиндельных узлов полимерными композиционными материалами :). автореф. дис канд. техн наук.; 05.20.03/ Мордовский гос. университет им. Н.П. Огарева. – Саранск, 2015. – 17 с. – URL: http://vak2.ed.gov.ru

7. Ищенко А.А., Радионенко А.В., Антоненко А.В. Исследование антифрикционных подшипников скольжения со вставками из композитных материалов – URL: https://docplayer.ru/36764664-Issledovanie-antifrikcionnyh-podshipnikov-skolzheniya-so-vstavkami-iz-kompozitnyh-materialov.html

8. Кирилин Ю. В., Титов Д., А. Применение синтеграна для изготовления базовых деталей тяжелых фрезерных станков // Станки и инструмент − 1993. − №1. − С. 18-19.

9. Кирилин Ю. В. Совершенствование несущих систем фрезерных станков на основе их моделирования и расчета динамических характеристик автореф дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / УлГТУ – Ульяновськ, 2006. – 32 с. - URL: http://www.ulstu.ru/main?cmd=file&object=506

10. Литьевые смолы DWH Типы чугун/сталь, алюминий, минерал – URL: https://docplayer.ru/44424787-Litevye-smoly-dwh-tipy-chugun-stal-alyuminiy-mineral.html

11. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. Т.IV – 7 /, О.И.Аверьянов, Г.А. Адоян и др.; Под ред. Б.И Черпакова – 2002. – 864 с.

12. Оссама Мохамед Ерфан Ахмед Снижение виброактивности корпусных деталей металлорежущих станков путем применения композиционных материалов (синтеграна). автореф. дис канд. техн наук.; 05.03.01/ Российск университет дружбы народов. – М., 2004. –

© **Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.,**

URL: http://tekhnosfera.com/snizhenie-vibroaktivnosti-korpusnyh-detaley-metallorezhuschih-stankov-putem-primeneniya-kompozitsionnyh-materialov-sinteg#ixzz4xlMuPqyE

13. Г.Паскер Применение новых материалов в станкостроении. // Станки и инструмент − 1988. − №10. − с. 29-31.

14. Понятовский С. Новый композит – URL: http://www.i-mash.ru/materials/technology/15610-novyjj-kompozit.html

15. Попов Георги Металорежещи машини част II. Конструиране и пресмятане / Учебникът – Технически университет – София – 2010 г. – Книга първа – 213 с.

16. Шевчук С.А., Смайловская М.С. Минерал-полимерный композит для станкостроения. – URL: http://mirprom.ru/public/mineral-polimernyy-kompozit-dlya-stankostroeniya.html

17. Применение эпоксикаучуковых клеев для изготовления подшипников скольжения из антифрикционных углепластиков / В.А. Сытов, А.Е. Верстаков, А.Е. Воронин и др. – URL: https://docplayer.ru/64546808-Primenenie-epoksikauchukovyh-kleev-dlya-izgotovleniya-podshipnikov-skolzheniya-iz-antifrikcionnyh-ugleplastikov.html

18. Рогов В.А., Соловьев В.В., Копылов В.В. Новые материалы в машиностроении: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 324 с.

19. Фатхуллин А.З. О возможности применения полимерных композиционных материалов в сельскохозяйственном машиностроении – URL: http://www.i-mash.ru/materials/technology/90107-o-vozmozhnosti-primenenija-polimernykh.html

20. Фирсов В.Т., Лебедь В.Т., Бобух И.А., Гречушкин Г.М. Исследование фреттинг-износа крупных деталей, соединенных натягом // Вестник машиностроения. -1991. - №3. -с.14-16.

Верба И. И., Даниленко А. В.
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Статья посвящена проблемам, которые возникают в случае необходимости обоснованного выбора новых конструкционных материалов или приобретении на рынке готовых мехатронных узлов или оборудования в целом, в которых применены эти материалы. Для этого конструктор должен ориентироваться в свойствах и в технологиях применения новых, преимущественно полимер-композитных, материалов, быть способным осуществить их сравнительную оценку (на качественном уровне). Несмотря на наличие большого количества информационных источников и исследований (на уровне диссертаций на присуждение научных степеней) по указанной тематике и явную целесообразность и технический эффект использования новых материалов, информация о последствиях их применения распылена и не является четко структурированной. Стандартные пакеты прикладных программ (в том числе такие популярные, как ANSYS, NASTRAN и др.) не адаптированы для расчета динамических характеристик несущих систем, тем более с учетом выбранного полимер-минерального материала, а существующие разработки в этом направлении не являются полными и универсальными. Следовательно, задача системного анализа и принятия решения обоснованного выбора как материала, так и технологии его применения, является актуально, как и разработка соответствующих методик расчета полученных показателей работоспособности.

Ключевые слова: *конструкционные материалы, мехатронные узлы, новые материалы, сравнительную оценку, системный анализ, выбор материалов, технологии применения.*

Verba I. I., Danylenko O. V.
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

USE OF MODERN MATERIALS AS A MEANS OF ENHANCEMENT EFFICIENCY OF TECHNICAL SYSTEMS

The article is devoted to the problems that arise in the event of the need for a reasonable choice of new structural materials or the purchase of ready-made mechatronic units or equipment in the market in which these materials are used. To do this, the designer should be guided by the properties

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.,

and in the application of new, mainly polymer-composite materials, be able to perform their comparative assessment (at a qualitative level). Despite the large number of information sources and researches (at the level of theses for awarding degrees) on the subject matter and the explicit expediency and technical effect of the use of new materials, the information on the consequences of their use is scattered and not clearly structured. Standard application packages (including popular ones such as ANSYS, NASTRAN, etc.) are not adapted to calculate the dynamic characteristics of carrier systems, especially with regard to the selected polymer-mineral material, and the existing developments in this direction are not comprehensive and universal. So the task of system analysis and decision making on a reasonable choice of both material and technology of its application, is at the time, as well as the development of appropriate methods for calculating the obtained performance indicators.

Key words: *construction materials, mechatronic knots, new materials, comparative evaluation, system analysis, materials selection, application technology.*

Стаття надійшла до редакції 24.10.2018

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.,