

ефективним інструментом у практичній діяльності для інженерно-технічних працівників зварювального виробництва при виготовленні згаданих конструкцій.

#### Література

1. Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстро движущимся линейным источником // Технологические системы. – 2005. – №4. – С. 49–55.

2. Михайлов В.С. Основы технологии правки конструкций. – Л.: Судостроение, 1983. – 204 с.

3. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

4. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.

5. Тальтов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1973. – 278 с.

УДК 621.891

Кіндрачук М.В., Мансур Д.І., Федорчук С.В., Корпієнко А.О.

Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

### ФОРМУВАННЯ МЕТАСТАБІЛЬНОСТІ ТА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИТТІВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

#### Анотація

Проведено комплексне дослідження структури та властивостей плазмових покриттів, після термоциклічної обробки. Показано, що така обробка суттєво підвищує адгезійно-когезійну міцність покриттів. Керуючи величиною дисперсних кристалів фаз проникнення і одночасно станом металевої матриці, можна підібрати режими термоциклічної обробки, при яких покриття отримують оптимальні триботехнічні властивості.

#### Abstract

The complex investigation of structure and properties of plasma coating after thermocyclic treatment are fulfilled. It is shown that such treatment essentially raises adhesive-cohesive durability of coating. Controlling the dispersity of introduction phases and at the same time the conditions of metallic matrix, one can select the regimes thermocyclic treatment, in which the coating receive optimum tribotechnical properties.

#### Вступ

Більшість існуючих підходів в розробці сплавів і зміцнюючих технологій ґрунтуються на одержанні заданих складу і структури у вихідному, зазвичай стабільному стані до експлуатації. При цьому в більшості випадків цілком не враховується еволюція фазово-структурного стану сплаву під дією зовнішніх і внутрішніх впливів, таких як структурні, термічні або механічні напруження і деформації, тертя та зношування, кавітація і ін. Таким впливам піддаються різноманітні деталі та вироби в реальних умовах експлуатації. Разом з тим, адекватне врахування цих факторів дозволяє створювати більш

ефективні метастабільні матеріали, значно краще адаптовані до умов експлуатації.

Кероване і раціональне використання фазово-структурної метастабільності дозволяє досягати аномально високих показників властивостей і особливо їх поєднання, які не вдається одержати в звичайних матеріалах. Це стає можливим завдяки включенню додаткових, скритих резервів і механізмів, якими потенційно володіє матеріал.

#### Сутність проблеми

Евтектичні сплави, так як і сталі, можуть знаходитися в різних нерівноважних станах. Ці стани виявляються у виді нерівноважної структури або появи метастабільних фаз, що має місце при створенні екстремальних умов кристалізації з рідкого стану, наприклад, за великих швидкостей охолодження [1]. Зі зміною швидкості охолодження відбувається зміна механізму евтектичної кристалізації з утворенням трьох типів структур: грубого конгломерату фаз, структур кооперативного росту, тонкого конгломерату фаз [2]. Кожна з перерахованих структур відповідає різному ступеню відхилення від положення термодинамічної рівноваги і контролюється швидкістю роздільної дифузії атомів перед фронтом кристалізації. Найбільш рівноважна структура грубого конгломерату фаз (малі швидкості охолодження), найбільш нерівноважна структура – тонкого конгломерату фаз (максимальні швидкості охолодження). У широкому діапазоні швидкостей охолодження між ними формуються колоніальні структури, обумовлені кооперативним ростом фаз, що складають евтектику. У залежності від ступеня відхилення від термодинамічної рівноваги, ці структури мають різну стабільність – найбільш стабільна структура грубого конгломерату фаз.

За швидкого охолодження з рідкого стану в евтектичних сплавах можлива поява метастабільних фаз. В якості таких фаз виступають хімічні сполуки, що існують на відповідній діаграмі фазових рівноваг, але в іншій температурно-концентраційній області (метастабільні фази I роду), або, сполуки, що не існують на цій діаграмі (метастабільні фази II роду).

Таким чином, змінюючи швидкість охолодження евтектик, з'являється можливість керувати їхніми властивостями: механічними, фізичними, хімічними, експлуатаційними. Це, наприклад, широко використовується на практиці при підборі оптимального поєднання властивостей евтектоїдних сталей і чавунів [3-5].

У литих евтектичних сплавах на основі перехідних металів з тугоплавкими фазами проникнення, унаслідок малої взаємної розчинності, практично, поєднуються вихідні властивості фаз, що утворюють її [6-8]. Фази проникнення мають високу температуру плавлення, твердість, міцність, пружність, хімічну та термодинамічну стійкість і зносостійкість. Поєднання фаз проникнення з менш твердою, але більш пластичною металевою матрицею додає таким евтектикам унікальні властивості. Так, сплави на основі заліза з тугоплавкими карбідами і боридами в литому стані мають високу зносостійкість у поєднанні з високою корозійною стійкістю, міцністю, технологічністю [9]. Вони не містять дефіцитних або дорогих компонентів. Ці властивості відкривають широкі можливості для використання зазначених евтектик у вузлах тертя машин і механізмів.

Використання триботехнічних матеріалів у литому стані має обмежене застосування, оскільки при терті працюють поверхні і приповерхневі шари. Одним із найбільш ефективних способів захисту деталей і механізмів від різного виду спрацювання є нанесення на робочі поверхні захисних газотермічних покриттів.

При газотермічному напиленні таких порошкових матеріалів, коли кристалізація протікає зі швидкостями  $10^4$ - $10^6$ °C/с, утворюються покриття з евтектикою, мікрокристалічною або аморфною структурою [2]. Утворені при таких швидкостях охолодження фази і структури перебувають у метастабільному, незрівноваженому стані, що повинно сприяти їхній структурній самоорганізації при терті [8].

Однак, стійкість таких покриттів, особливо в умовах динамічних навантажень, а також роботи за високих

температур у режимі теплосмін, як правило, невисока в результаті їхньої крихкості, пористості, низької адгезійної міцності, великого градієнта властивостей, протікання дифузійних процесів на границі "покриття-підкладка".

Існує багато способів підвищення адгезійної міцності газотермічних покриттів. З метою підвищення міцності зчеплення плазмового покриття із основою широко використовують дифузійне відпалювання при 1000-1100°С, що пов'язане із великими енерговитратами і небажаним перегрівом сталі. Ефективного підвищення адгезійних властивостей можна досягнути дифузійним відпалюванням плазмових покриттів у режимі термоцикування. Термоциклічна обробка в інтервалі температур, що охоплюють поліморфні перетворення, призводить до інтенсифікації фазових перетворень. Ультразвукова обробка внаслідок протікання дифузійних процесів суттєво підвищує когезійну міцність покриттів. У роботі [10] досліджували процеси, що протікають в газотермічних покриттях при високотемпературному відпалюванні, а також при оплавленні.

При цих способах підвищення адгезійної міцності покриттів, однак, втрачаються такі сприятливі у відношенні тертя властивості, як незрівноважений стан структури (метастабільні фази, перенасичені тверді розчини фаз проникнення у матриці). В той же час відомо [11], якщо структура за даних умов навантаження нестабільна, тобто здатна перебудовуватися, то енергія деформації тертям розсіюється на сприятливі релаксаційні процеси і стійкість проти спрацювання підвищується. Використання при ізотермічному, а також термоциклічною відпалі пічного об'ємного нагріву, якому властива інерційність нагріву та охолодження, не дозволяє одночасно забезпечувати підвищення адгезійної міцності зі збереженням певного рівня вихідного незрівноваженого стану плазмового покриття.

У зв'язку з цим в роботі використовували термоциклічну обробку (ТЦО) покриттів з використанням лазера.

#### Методика досліджень

Для нанесення покриттів використовували порошки евтектичних сплавів систем 12X18H9T-TiB<sub>2</sub>-VC (ВТН) і 12X18H9T-TiB<sub>2</sub>-CrB, (ХТН), хімічний і фазовий склад яких наведений в роботі таблицях 1, 2.

Напилення здійснювали на підкладки із мало- і середньовуглекових сталей і сталі 12X18H9T.

Таблиця 1

Хімічний склад евтектичних сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, мас. %									
	Cr	Ni	Ti	V	Al	Cu	B	C	Mn	Fe
ВТН	15,0	7,7	3,2	7,9	5,6	-	1,4	1,9	-	56,8
ХТН	20	8,0	2,5	-	5,6	-	2,6	-	-	61,3

Таблиця 2

Фазовий склад евтектичних сплавів

Фазовий склад		Кількість фаз в евтектиці, мас. %
Матриця	Зміщуюча фаза	
12X18H9T	TiB <sub>2</sub> +VC	TiB <sub>2</sub> -4,6; VC-9,8
12X18H9T	TiB <sub>2</sub> + CrB <sub>2</sub>	TiB <sub>2</sub> -4,4; CrB <sub>2</sub> -7,5

Мікроструктуру покриттів вивчали металографічне, мікротвердість визначали на приладі М-400 фірми "Leco Corporation" з автоматичним навантаженням. Розподіл елементів у покритті досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопу-аналізатора "Camscan-4DV" з програмно-математичним забезпеченням. Триботехнічні випробування проводили на машині торцевого тертя при навантаженнях 1–3 МПа, швидкостях ковзання 0,1–1,9 м/с, температурах 20–800°С. За контртіло був обраний сплав ЖС6К.

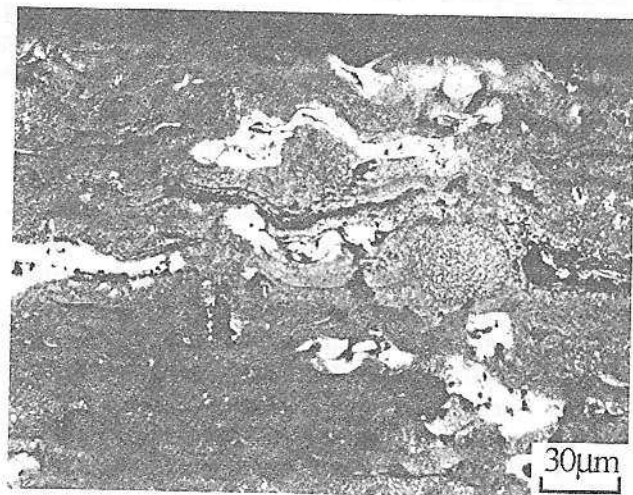
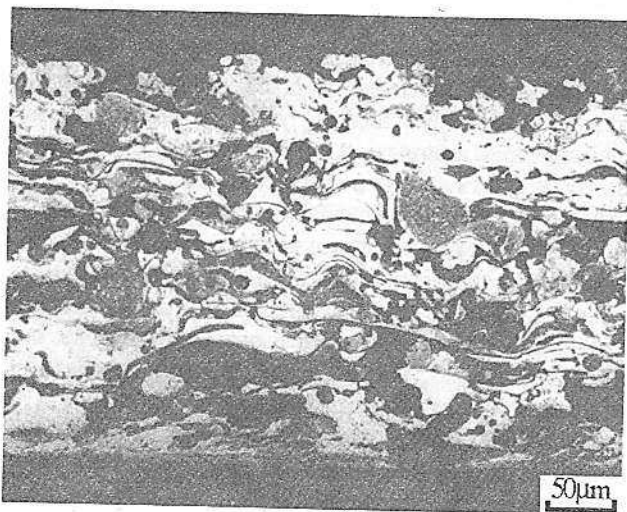
ТЦО у діапазоні температур 900–500°С проводили на лазерній установці "ЛАТУС-31". Температуру верхньої границі циклу обирали, виходячи із побудованих раніше діаграм фазових рівноваг; вона становила 0,75 Тпл. Така температура допускає відсутність морфологічних змін в евтектичних кристалах фаз проникнення, але може істотно вплинути на розпад мегалевої основи матриці, коагуляцію дисперсних кристалів фаз проникнення, що містяться у білих шарах, а також на дифузійні процеси в зоні покриття-сталь. Кількість термоциклів обирали з урахуванням отримання рівнів структурного стану, що наближуються до зрівноваженого. Таким чином, вибраний температурний і кількісний режим ТЦО дозволяв впливати на дифузійні процеси на границі покриття з підкладкою, структурний стан і термодинамічну рівновагу білих шарів.

**Результати дослідження**

У напилених евтектичних покриттях спостерігаються слабо протравлені області, названі білими шарами, нерозплавлені або частково розплавлені порошинки, а також незначна кількість пор (рис.1, а). Необхідно відзначити відносно невелику пористість покриттів (близько 10%). Білі шари, напевно, виникають внаслідок швидкої кристалізації рідких крапель на холодній підкладці. Такі шари мають високу хімічну стійкість, вони практично не взаємодіють із реактивом, який виявляє структуру сплаву до напильника, що й визначило їхню назву.

В обох системах евтектичних покриттів ВТН і ХТН, починаючи з трьох термоциклів, спостерігається помітне зменшення границь між білими шарами і їх розпад (рис.1, б). В покритті ХТН після триразової ТЦО збільшується кількість сірих шарів, тобто білих шарів, що частково розпалися. В результаті збільшення кількості термоциклів до п'яти має місце більш повний розпад білих шарів з виділенням в них дисперсних частинок фаз проникнення. Одночасно із цим відбуваються процеси коагуляції, коалесценції, що призводить до збільшення розмірів виділених частинок і появи твердого розчину із значно меншою кількістю фаз проникнення.

Кінетика зміни властивостей структурних складових покриттів в залежності від кількості термоциклів наведена в табл. 3. Спостерігається зменшення мікротвердості для



а

б

Рис. 1. Структура плазмового евтектичного покриття ВТН. а – вихідний (напильний) стан з великою кількістю областей тонкого конгломерату фаз ("білі шари"); б – термоцикування (4 термоцикли)

Таблиця 3

Мікротвердість і об'ємний вміст структурних складових плазмового покриття порошком евтектичного сплаву ВТН

Структурна складова	Об'ємний вміст структурної складової, %	Мікротвердість H <sub>100</sub> , МПа					
		до ТЦО	Кількість циклів ТЦО				
			2	4	6	8	10
Евтектичні області	12–14	9750	9100	8740	7800	7150	7175
Білі шари	70–80	1340	10250	9100	7750	6800	6780

всіх структурних складових, що пов'язано із розпадом перенасиченого твердого розчину основи. Необхідно відзначити, що мікротвердість евтектичних областей знижується тільки після чотирьох термоциклів. Можна припустити, що вказане зниження мікротвердості викликане розпадом металеві матриці, а протікання процесів коагуляції із збільшенням кількості термоциклів не призводить до суттєвого зниження мікротвердості. Для білих шарів характерним є постійне зниження мікротвердості із збільшенням кількості термоциклів. При цьому після шести циклів твердість білих шарів і евтектичних областей стає приблизно рівною. Мікротвердість покриття після такої обробки децю нижча, від напиленого без ТЦО, але вища, від оплавленого лазером. Подальше збільшення кількості обробок призводить до зменшення мікротвердості білих шарів порівняно з евтектичними складовими. Це, напевно, обумовлено коагуляцією фаз проникнення в білих шарах, що призводить до зниження їхньої міцності.

ТЦО супроводжується розвитком релаксаційних процесів, які підвищують пластичність напилених покриттів, що прямо підтверджується відсутністю тріщин на відбитках від замірювання мікротвердості і узгоджується з даними інших досліджень. Так, в роботі [10] показано, що відпал газотермічних покриттів підвищує модуль пружності білих шарів і пластичність як білих шарів, так і евтектичних складових.

Виходячи з цього, має певний сенс дослідження пористості, міцності зчеплення із підкладкою дифузійних процесів у плазмовому покритті після 2–6-разової ТЦО, коли зберігається відносно висока мікротвердість білих шарів і покриття в цілому.

Як видно із результатів, наведених в табл. 4, термоциклювання знижує пористість і підвищує міцність зчеплення плазмового покриття порівняно з вихідним без ТЦО. Підвищення адгезійно-когезійних властивостей напиленого покриття зумовлене інтенсифікацією дифузійних процесів при ТЦО. При дослідженні мікроструктури, отриманої в режимі "фазовий контраст", була виявлена сіра зона товщиною 1,5–2 мкм, прилегла збоку підкладки до границі розділу з матрицею. Для виявлення стану, в якому знаходяться хімічні елементи в цій зоні, були проведені дослідження по програмі "Digimap - M". Встановлено, що покриття містять досить велику кількість ванадію. Він дифундує на границю "покриття–підкладка" і взаємодіє із залізом та хромом одночасно.

Для визначення кількісного складу хімічних елементів у системі "покриття–підкладка" був проведений мікрорентгеноспектральний аналіз. Аналіз проводився в п'яти точках по довжині відрізка, перпендикулярного до зони розділу покриття з підкладкою; відстань між точками становила 20 мкм. Локальність зонду –  $O = 2,5$  мкм, глибина  $h = 1,5$  мкм. Для прищільного попадання зондом у досліджувані фази використовували режим SEM - фазовий контраст. Хімічний склад точок аналізу при цьому визначався за допомогою EOM.

Згідно з даними кількісного аналізу побудовані гістограми розподілу елементів (рис. 2). Аналіз розподілу елементів на границі "покриття–підкладка" показує, що ТЦО викликає взаємне масоперенесення ванадію, титану, хрому, бору в підкладку і заліза та марганцю з підкладки в покриття. Межа між покриттям і підкладкою стає розмитою і являє собою тверді розчини цих легуючих елементів у залізі, про що свідчать дані хімічного складу і мікротвердості.

Таким чином, обраний режим ТЦО (4–6 термоциклів) дозволяє підвищити адгезійні властивості та пластичність покриття, знизити його пористість і одночасно зберегти відносно високу мікротвердість.

Випробування на тертя та зношування плазмових покриттів у вихідному стані і після ТЦО показало їхню різну стійкість до спрацювання (рис. 3). ТЦО дозволяє змінювати структурний стан і термодинамічну рівновагу білих шарів, підвищуючи при цьому кількість ділянок із більш пластичною евтектичною структурою. Така структура може сприймати значну долю енергії і в більшій мірі релаксувати напруження при терті. Зниження крихкості і підвищення пластичності покриття після ТЦО збільшує його здатність до утворення вторинних структур, що свідчить про його сприятливі реологічні властивості.

На поверхнях тертя покриттів, яким було надано ТЦО, утворюються суцільні оксидні плівки, в той час як на покриттях без ТЦО утворюються плівки у вигляді окремих ділянок. Передумовою цього може бути зниження корозійної стійкості білих шарів при їхньому розпаданні. Стійкість проти спрацювання покриття ХТН після ТЦО підвищується більше порівняно з ВТН, спостерігається зниження коефіцієнта тертя.

Триботехнічні випробування при високих температурах показали, що стійкість проти спрацювання вихідних плазмових покриттів і після ТЦО приблизно однакова. Це пояснюється повним розпадом твердих метастабільних структур та інтенсивним окисленням покриттів через їхню пористість.

Таблиця 4

Залежність мікротвердості, пористості і міцності зчеплення з підкладкою 12X18H9T від обробки плазмового покриття ВТНВІН

Обробка	Мікротвердість $H_{100}$ , МПа	Пористість, %	Міцність зчеплення з підкладкою, МПа
Плазмове напilenня	12400	10–12	16–20
Плазмове напilenня + 4ТЦО	10050	7–9	90–100

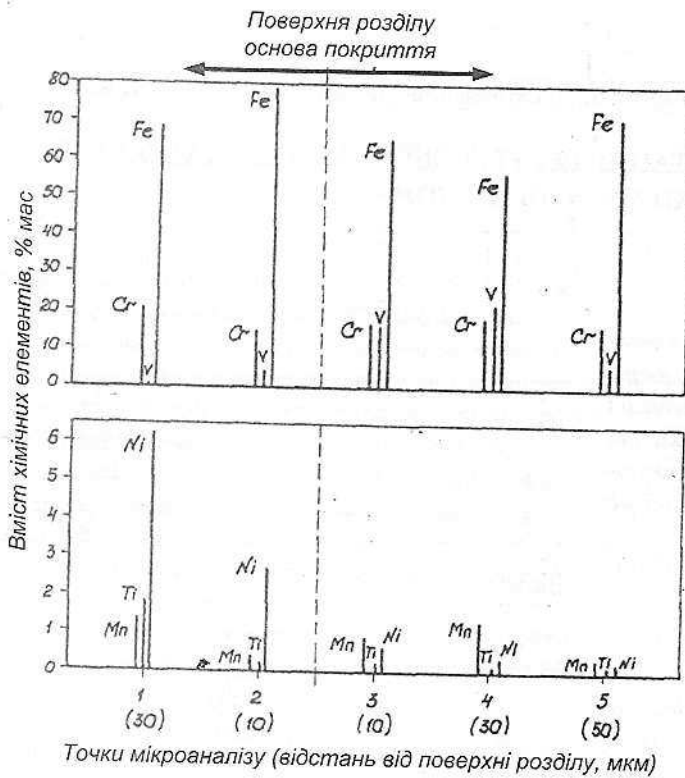


Рис. 2. Структура плазмового евтектичного покриття ВТН. а – вихідний (пашилений) стан з великою кількістю областей тонкого конгломерату фаз ("білі шари"); б – термоцикування (4 термоцикли)

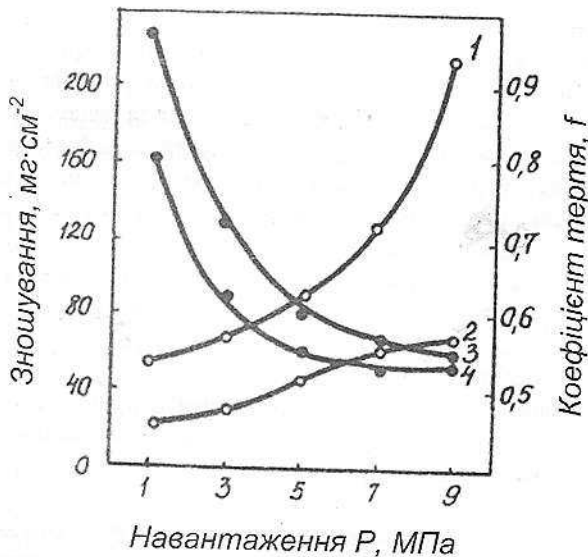


Рис. 3. Залежність триботехнічних властивостей плазмового покриття ВТН без ТЦО (1,3) і з ТЦО (2,4) від навантаження: 1, 2 – приведені спрацювання за 10<sup>3</sup> м, 3, 4 – коефіцієнт тертя

**Висновки**

Таким чином, керуючи величиною дисперсних кристалів фаз проникнення і одночасно станом металевої матриці, можна підібрати параметри ТЦО, за яких плазмові покриття отримуватимуть високу адгезійно-когезійну міцність із одночасним підвищенням триботехнічних властивостей.

**Література**

1. *Мирошниченко І.С.* Закалка из жидкого состояния. - М.: Металлургия, 1982. - 168 с.
2. *Таран Ю.Н., Мазур В.Н.* Структура евтектичних сплавов. - М.: Металлургия, 1978. - 311 с.
3. *Войнов Б.А.* Износостойкие сплавы и покрытия. - М.: Машиностроение, 1980. - 120 с.
4. *Любарский И.М., Палатник Л.С.* Металлофизика трения. (Сер. Успехи современного металловедения). - М.: Металлургия, 1976. - 176 с.
5. *Гуляев А.П.* Термическая обработка стали. - М.: Машиз, 1960. - 496 с.
6. *Шурин А.К.* Жаропрочные эвтектические сплавы. // Жаропрочность и жаростойкость металлических материалов. - М.: Наука, 1976. - С. 64-70.
7. *Шурин А.К., Панарин В.Е.* Некоторые общие закономерности тройных диаграмм состояний металлов с бором. // Металлофизика. - К.: Наукова думка, 1976. - №66. - С. 85-92.
8. *Костецкий Б.И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. - 1985. - Т. 6. - С.850 - 857.
9. *Шурин А.К., Панарин В.Е., Киндрачук М.В.* Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения. // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техника, 1981. - №19. - С. 17-28.
10. *Киндрачук М.В., Панарин В.Е., Микуляк О.В.* Использование высокоцентрированных источников энергии для повышения триботехнических свойств эвтектических покрытий // Защитные покрытия на металлах. - К.: Наукова думка, 1993. - Вып. 27. - С. 50-54.
11. *Шевеля В.В., Гладченко О.Н., Шевеля И.В.* О природе шиков стойкости инструментов при обработке металлов резанием // Трение и износ. - 1990. - Т.11-№1. - С. 136-142.