

Особливості механічних та трибологічних властивостей інтерметалідів на основі алюмінію, нікелю та титану за умов локального навантаження

Ю. В. Мільман, К. Е. Грінкевич, Л. В. Мордель, Д. В. Козирєв,
І. В. Ткаченко, В. В. Купрін

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: kozyrev86@yandex.ru

Визначено комплекс механічних властивостей інтерметалідів з використанням розроблених авторами методик та методів мікро- та нанотвердості. Особливості поведінки в залежності від хімічного складу та методів отримання інтерметалідів (зокрема, при терті з індентором ШХ15) вивчено за умов статичного та динамічного навантажень.

Ключові слова: інтерметалід, трибологічні властивості, твердість, пластичність.

Вступ

Ще у 2500 р. до н. е. інтерметаліди використовувались як матеріали домашнього побуту. Найбільш популярним було покриття Cu_3As , яке дає чудовий блиск срібла, воно було відоме ще у стародавній Анатолії та стародавньому Єгипті.

Деякі з відомих інтерметалідів вже стали основою аерокосмічних матеріалів, а інші є потенційними кандидатами на цю роль. Такі інтерметаліди (ІМ), як TiAl та Ni_3Al , є унікальними тому, що мають здатність зберігати упорядковану структуру аж до температури плавлення, тобто температура плавлення та упорядкування співпадають. Це, в свою чергу, забезпечує дальній порядок та, як наслідок, більш сильний міжатомний зв'язок [1]. Тому саме інтерметаліди завдяки своїй унікальній природі викликають інтерес, пов'язаний з вирішенням як технологічних, так і фундаментальних проблем фізики міцності. Для досягнення успіхів в цих напрямках необхідне глибоке розуміння характерних рис поведінки ІМ при дії різних зовнішніх чинників.

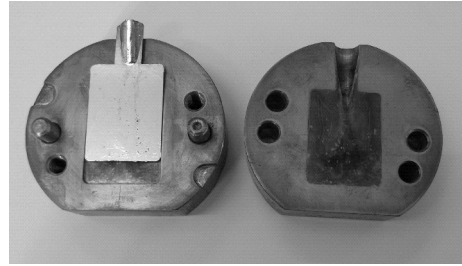
У даній роботі проведено дослідження особливостей механічної поведінки ІМ на основі Al , Ni та Ti , отриманих за різними технологіями, а задіяно як стандартні, так і розроблені авторами принципово нові методи вивчення механічних властивостей інструментальним індентуванням та методики визначення трибологічних характеристик за умов статичного та динамічного навантажень.

Матеріали та методи дослідження

Для дослідження обрано інтерметаліди, що мають самостійне значення як конструкційні жароміцні матеріали (Ni_3Al , Al_3Ni , Al_3Ti , TiAl), які отримані за технологією швидкого твердіння з рідкого стану (Rapid Solidification — RS) та аргонно-дуговою плавкою (Arc Melting — AM), а також

© Ю. В. Мільман, К. Е. Грінкевич, Л. В. Мордель, Д. В. Козирєв,
І. В. Ткаченко, В. В. Купрін, 2013

Рис. 1. Мідна виливниця та інтерметалід Ni₃Al у вигляді пластини.



задіяно розроблені авторами принципово нові методи вивчення механічних властивостей при локальному навантаженні матеріалів жорстким індентором та методики визначення трибологічних характеристик при статичному та динамічному навантаженнях контртіла у вигляді індентора.

В якості вихідних матеріалів використано чистий алюміній (99,99%) та йодидний титан і нікель. У відповідності до подвійних діаграм станів металічних сплавів [2] обрано склади інтерметалідів на основі Al, Ni та Ti та підготовлено шихту.

Плавку проводили в інертній атмосфері гелію при температурі розплаву 1300—1600 °С. Попередньо камеру відкачували до вакууму 10^{-3} — 10^{-4} Па. Зливки розплавляли струмом високої частоти в кварцевій трубці і розливали при температурі на 100—200 °С вище температури плавлення обраних інтерметалідів, визначених по двійним діаграмам стану. За допомогою цієї технології із застосуванням мідної виливниці (рис. 1) отримано інтерметаліди у вигляді пластин розміром 40 x 30 мм та товщиною 1,85 та 2,35 мм. З пластин виготовлено зразки для подальшого дослідження фазового складу та структури отриманих інтерметалідів.

Дослідження механічних властивостей інтерметалідів проводили методами трибології та індентування. При трибологічних дослідженнях визначали силу тертя та знос, а при індентуванні — твердість та такі характеристики матеріалу, як пластичність δ_A та модуль нормальної пружності E (модуль Юнга). Мікротвердість виміряли при кімнатній температурі на приладі Micron-Gamma з використанням пірамідального алмазного індентора Берковича при навантаженні 2 Н.

Визначення комплексу механічних характеристик із застосуванням локального індентування [3] дає змогу більш швидко встановити механічні характеристики матеріалу, такі як твердість, модуль нормальної пружності E та характеристику пластичності δ_A . Характеристика пластичності δ_A може бути розрахована при інструментальному (локальному) індентуванні за співвідношенням площин під кривими навантаження і розвантаження (рис. 2) за формулою [4]

$$\delta_A = \frac{A_p}{A_t} = \frac{A_p}{A_p + A_e} = 1 - \frac{A_e}{A_t}, \quad (1)$$

де A_p , A_e та A_t — робота, що витрачається відповідно на пластичну, пружну і загальну деформації при індентуванні.

Характеристика пластичності δ_A , визначена методом безперервного вдавлювання, за своєю фізичною сутністю є аналогом характеристики пластичності δ_H [5]. Теоретичні та експериментальні дослідження [4, 6, 7] засвідчили, що, незважаючи на різні методи випробувань, значення характеристик δ_H і δ_A співпадають між собою з достатньою точністю. Перевагою характеристики δ_A є те, що її визначення не потребує відомостей щодо

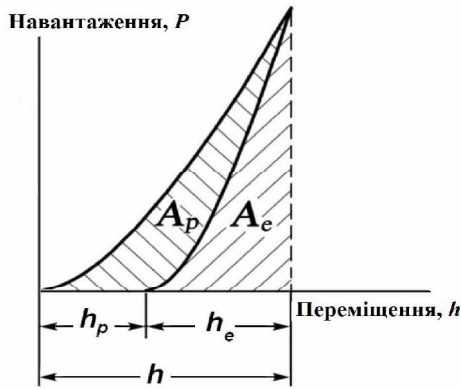


Рис. 2. Діаграма заглиблення пірамідального індентора в координатах навантаження P — переміщення індентора h : h_e та h_p — пружне і пластичне зближення індентора і зразка; A_e та A_p — пружна і пластична робота деформації при інструментальному індентуванні.

значень інших механічних характеристик (твердості по Віккерсу HV , модуля Юнга E , коефіцієнта Пуассона ν).

Також по діаграмі заглиблення пірамідального індентора можна розрахувати невідновлену твердість за Мейером HM та модуль нормальної пружності E (модуль Юнга) за методом Олівера і Фара [8].

Твердість за Мейером та модуль нормальної пружності визначали за формулами

$$HM = \frac{P_{\max}}{F} = \frac{P_{\max}}{24,56h_c^2}, \quad (2)$$

де P — навантаження на індентор; F — площа проекції відбитка твердості на поверхні зразка; h_c — контактна глибина впровадження індентора; та

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}, \quad (3)$$

де E^* — ефективний модуль Юнга контактної пари індентор—зразок; E_i , E и ν_i , ν — модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона індентора та зразка відповідно.

Контактний модуль Юнга розраховується з формули

$$E^* = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{F}}, \quad (4)$$

де S — значення контактної жорсткості, розраховане за формулою $S = dP/dh$ по нахилу кривої розвантаження на її початковій стадії.

Трибологічні випробування на знос проведено на автоматизованому трибологічному комплексі з модулем динамічного навантаження (АТКД) (рис. 3), який дозволяє оцінювати триботехнічні властивості та контактну взаємодію матеріалів за умов квазістаціонарних та динамічних режимів навантаження. Вибір параметрів АТКД здійснювали, виходячи із вимог

максимальної уніфікації та прискорення умов випробування за схемою сфера—площина. Контактна поверхня контртіла-індентора являє собою півкулю з радіусом 8 мм зі сталі ШХ-15. Зворотньо-поступальне ковзання інден-

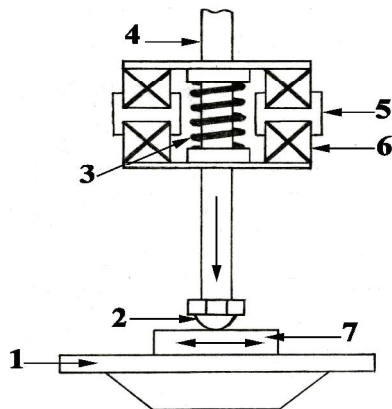


Рис. 3. Принципова схема модуля динамічного навантаження: 1 — станина; 2 — індентор; 3 — пружина; 4 — стовп навантаження; 5 — осердя; 6 — котушка; 7 — зразок.

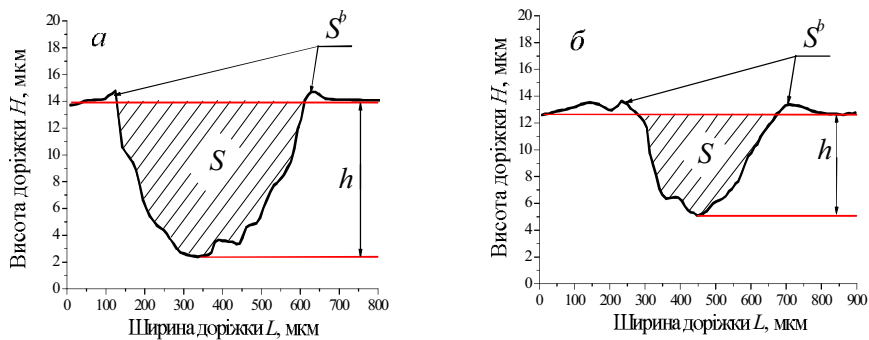


Рис. 4. Типові профілограми доріжок тертя інтерметаліду Ni_3Al в парі з індентором ШХ-15, отриманих при квазістатичному (а) та динамічному (б) режимах випробувань: h, S — глибина та площа доріжки тертя; S^b — площа витисненого матеріалу.

тора проводили по поверхні плоских зразків з локальним герцівським контактом і постійною амплітудою динамічної складової навантаження $P = 20$ Н (далі — квазістаціонарний режим навантаження (СР)). В динамічному режимі навантаження (ДР) при середньому значенні навантаження $P_{\text{ef}} \sim 20$ Н динамічну складову сили нормального тиску задавали у вигляді цуга коливань. Амплітуда динамічної складової навантаження складала $\Delta P = 5$ Н, частота — 25 Гц. Навантаження $P = 20$ Н обирали, виходячи із умов забезпечення максимальної відтворюваності результатів в обох режимах навантаження. Для отримання максимальної точності реєстрації сили тертя прийнята швидкість ковзання дорівнювала 0,013 м/с. Тривалість випробування 900 с відповідає стабілізації сили тертя для СР.

За одержаними на профілографі-профілометрі Калібр К-201 профілограмами поверхні, яка зазнала зносу, обчислювали показник зносу (глибину доріжки тертя), коефіцієнти пластифікування та варіації зносу, відповідно, при статичному та динамічному режимах. Силу тертя F визначали за даними трибограм самописця.

Для схеми випробування сфера—площина розроблено спосіб оцінки трибологічних властивостей матеріалів одночасно при квазістаціонарному та динамічному навантаженнях і запропоновано наступні критерії оцінки механізму руйнування поверхонь трибоконтакту:

I_c, I_d — показники зносу плоского зразка на ділянках, відповідно, квазістатичного і динамічного навантажень, що, як видно на рис. 4, визначаються глибиною доріжки тертя h ;

$K_c^{\text{пл}}, K_d^{\text{пл}}$ — показники пластифікування, що визначаються за відношенням сумарної площі витисненого матеріалу S^b до площі доріжки тертя S за формулою

$$K^{\text{пл}} = \frac{S^b}{S}. \quad (5)$$

Результати дослідження

Досліджено механічні властивості виготовлених зразків інтерметалідів $\text{AlTi}, \text{Al}_3\text{Ti}, \text{Al}_3\text{Ni}, \text{Ni}_3\text{Al}$ за умов локального індентування. Отримані результати експерименту представлені на рис. 5. Зразки, одержані за технологією швидкого твердіння з рідкого стану, мають більшу зносостійкість,

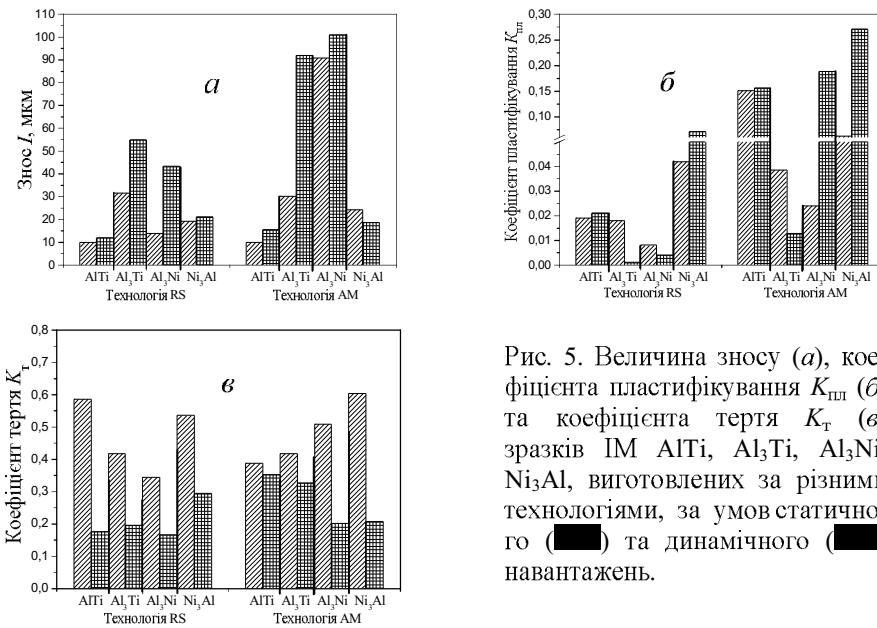


Рис. 5. Величина зносу (а), коефіцієнта пластифікування $K_{пл}$ (б) та коефіцієнта тертя K_T (в) зразків ІМ AlTi, Al₃Ti, Al₃Ni, Ni₃Al, виготовлених за різними технологіями, за умов статичного (■) та динамічного (▨) навантажень.

ніж відповідні зразки, отримані аргонно-дуговою плавкою. Така різниця в поведінці ІМ обумовлена особливостями структури, яка утворюється за різних умов їх виготовлення: технологія RS забезпечує більш дрібний розмір зерна ($d < 15$ мкм), на відміну від методу АМ. Інтерметаліди, отримані за методом АМ, мають більш високий коефіцієнт пластифікування.

Зразки Al₃Ti, Al₃Ni за умов тертя в парі з ШХ-15 при відносно більшій твердості показали найменшу зносостійкість, що, вочевидь, зумовлено меншою пластичністю (таблиця) та крихким механізмом руйнування, майже до розтріскування. На користь цього також свідчить найменший показник коефіцієнта пластифікування $K_{пл}$. Зразки ІМ Al₃Ti, Al₃Ni, виготовлені за технологією АМ, мають найвищу твердість серед інших ІМ, що також підтверджує наявність крихкого механізму пластифікування (рис. 5, б, в та таблиця). Найбільш зносостійким серед ІМ виявився матеріал AlTi (за показниками зносу).

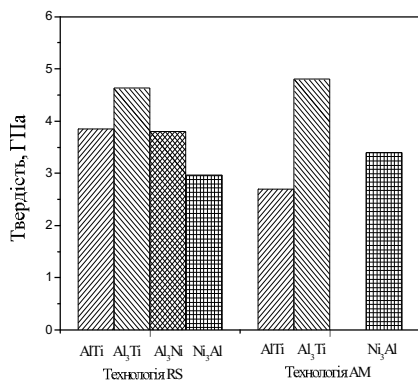


Рис. 6. Залежність твердості по Мейсеру зразків ІМ AlTi, Al₃Ti, Al₃Ni, Ni₃Al, виготовлених за різними технологіями.

Пластичність інтерметалідів, яка при терті якісно характеризується показником $K_{пл}$, має більший вплив на їх зносостійкість, ніж твердість. Так, ІМ AlTi, не маючи найбільшої

Параметр пластичності та модуль Юнга для ІМ, виготовлених методом RS

Матеріал	δ_A	E , ГПа
AlTi	0,85	174
Al ₃ Ti	0,81	196
Al ₃ Ni	0,81	211
Ni ₃ Al	0,86	221

твердості, але при відносно високому для цієї групи матеріалів коефіцієнті пластифікування та параметрі δ_A проявив найкращу зносостійкість, як за умов статичних, так і динамічних навантажень.

Найбільша пластичність δ_A в інтерметалідах, отриманих за обома технологіями, виявлена у Ni_3Al . При цьому матеріал при дослідженні показав відносно високу зносостійкість. Менша відносно АІТі зносостійкість обумовлена особливостями вимірювання показника зносу (лінійний знос), оскільки формування значно глибшої доріжки тертя може відбуватися за рахунок більш інтенсивного витиснення матеріалу із зони тертя, а не за рахунок втрат маси.

Аналіз формозмінення доріжок тертя, а також близькі значення показників зносу в статичних та динамічних умовах дозволяють зробити висновок, що інтерметалід Ni_3Al не є чутливим до умов та типу навантаження. Ця властивість інтерметаліду має особливе значення при експлуатації за умов зміни режимів навантаження. Коефіцієнт тертя складним чином залежить від технології отримання інтерметаліду (рис. 5, *в*). Характер зносу (крихкий або пластичний) також суттєво впливає на коефіцієнт тертя.

Оптимальним з точки зору поєднання зносостійкості та сили тертя визнано ІМ АІТі. Інтерметалід Ni_3Al є основою для створення сучасних жароміцних сплавів. Окрім вивчення зміни структурного стану, механічних властивостей, доцільним було дослідити також зміну його трибологічних характеристик в результаті термічної обробки.

Для зразків ІМ Ni_3Al , які зазнали відпалу при температурах 1150—1250 °С, отримано залежності триботехнічних характеристик від температури (рис. 7, 8). Внаслідок термічної обробки зеренна структура змінюється,

Рис. 7. Вплив температури відпалу на показники зносу I та коефіцієнта тертя K_T зразка ІМ Ni_3Al за умов статичного та динамічного навантажень: 1 — I^c ; 2 — I^d ; 3 — K_m^c ; 4 — K_m^d .

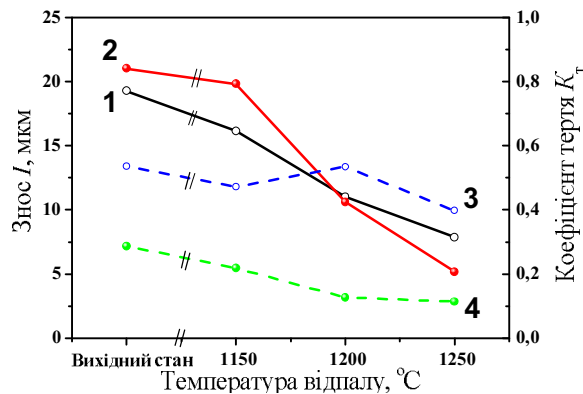
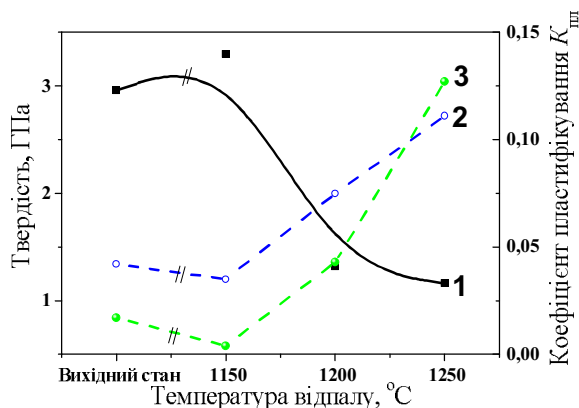


Рис. 8. Вплив температури відпалу на показники твердості HM та коефіцієнта пластифікування $K_{пл}$ зразка ІМ Ni_3Al за умов інструментального (локального) інденування та статичного і динамічного навантажень: 1 — HM ; 2 — $K_{пл}^c$; 3 — $K_{пл}^d$.



що суттєво впливає на триботехнічні властивості ІМ Ni_3Al (по відношенню до вихідного стану зносостійкість інтерметаліду покращується). Збільшення розміру зерна в інтервалі температур відпалу $1150\text{—}1250\text{ }^\circ\text{C}$ приводить до зменшення процесів крихкого руйнування і, тим самим, поліпшується зносостійкість матеріалу за умов тертя. Це підтверджується зростанням коефіцієнта пластифікування $K_{\text{пл}}$ (рис. 8).

Висновки

Вперше отримані триботехнічні властивості інтерметалідів дозволили вивчити особливості їх поведінки за умов локального навантаження в статичному та динамічному режимах в залежності від хімічного складу та методів одержання.

При аналізі процесів тертя та зношування необхідно враховувати формозмінення доріжки тертя і здібність матеріалу чинити опір при зміні типу навантаження.

Показано, що триботехнічні характеристики інтерметалідів більш чутливі до показника коефіцієнта пластифікування $K_{\text{пл}}$, ніж до твердості. На прикладі інтерметаліду Ni_3Al при вивченні впливу відпалу на зміну трибологічних характеристик доведено, що існує оптимальне співвідношення твердості та пластичності, при якому досягається найбільша зносостійкість.

- 1 Гринберг Б. А. Интерметаллиды Ni_3Al и TiAl : микроструктура, деформационное поведение / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов. — Екатеринбург : УрО РАН, 2002. — 360 с.
- 2 Хансен М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. — М. : Металлургиздат, 1962.
- 3 Gnatowicz S. R. Control of physical and mechanical properties of solid surfaces by methods of scanning local and micro-, nano indentation / [S. R. Gnatowicz, V. N. Shmarov, I. M. Zakiev, Y. N. Maistrenko] // Nanotechnology: Sat. Reports. Kharkov Nanotechnology Assembly. — Kharkov : KIPT. — 2008. — 1. — S. 243—246.
- 4 Milman Yu. V. Plasticity characteristic obtained by indentation // J. of Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — 41. — 074013 (9 p.).
- 5 Milman Yu. V. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement (overview No. 107) / Yu. V. Milman, B. A. Galanov, S. I. Chugunova // Acta Metall. Mater. — 1993. — 41, No. 9. — P. 2523—2532.
- 6 Byakova A. V. High performance ceramic coatings for cutting tool — perspectives in improvement of coating mechanical properties: Modelling of machining operations / A. V. Byakova, Yu. V. Milman, A. V. Vlasov // Chemnitz: Wissenschaftliche Scripten, 2005. — P. 559—568.
- 7 Milman Yu. Plasticity characteristic obtained through instrumental indentation / Yu. Milman, S. Dub, A. Golubenko // Mater. Res. Symp. Proc. — 2008. — 1049. — P. 734—743.
- 8 Oliver W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation measurements / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. — 1992. — 7, No. 6. — P. 1564—1583.

**Особенности механических и трибологических свойств
интерметаллидов на основе алюминия, никеля и титана
в условиях локального нагружения**

Ю. В. Мильман, К. Э. Гринкевич, Л. В. Мордель,
Д. В. Козырев, И. В. Ткаченко, В. В. Куприн

Определен комплекс механических свойств интерметаллидов с использованием разработанных авторами методик и методов микро- и нанотвердости. Особенности поведения в зависимости от химического состава и методов получения интерметаллидов (в частности, при трении с индентором ШХ15) изучены в условиях статического и динамического нагружений.

Ключевые слова: интерметаллид, трибологические свойства, твердость, пластичность.

**Features of mechanical and tribological properties
of the intermetallic compounds based on aluminum, nickel
and titanium in local loading**

Yu. V. Milman, K. E. Grinkevych, L. V. Mordel,
D. V. Kozyrev, I. V. Tkachenko, V. V. Kuprin

The complex mechanical properties of intermetallic compounds was determined by the original authors methods and the micro-and nanohardness methods as well. The influence of the chemical composition and intermetallic technology on their behaviors (especially friction progress) was studied under static and dynamic loading.

Keywords: intermetallic, tribological properties, hardness, plasticity.