

PACS numbers: 46.55.+d, 61.72.Bb, 61.72.Lk, 61.72.S-, 68.43.Bc, 81.40.Lm, 81.40.Pq

## **Концепція механізму та кінетики впливу механохімічних процесів на оброблення різанням**

М. О. Курін, М. В. Сурду

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»,  
вул. Чкалова, 17,  
61070 Харків, Україна*

Працю присвячено вирішенню актуальної задачі пояснення процесів, що перебігають у зоні контакту поверхнево-активних речовин змащувально-охолоджувальних технологічних середовищ (ЗОТС) з ювенільною поверхнею, а також розробці математичного моделю, що уможливило оцінити величину зміни енергії деформування в результаті адсорбції. Представлено міркування стосовно причин зменшення роботи різання металів та енергії пластичної деформації за присутності ЗОТС. Висловлено припущення, що основною причиною є гідрування металу в процесі технологічної операції, а сам водень чинить найзначніший вплив на характер руйнування поверхневого шару деталей, розподіляючись, як і решта поверхнево-активних речовин (ПАР), нерівномірно — накопичуючись у пастиках. Встановлено, що вільний водень у металі знаходиться в йонізованому стані, а його поведінка підкоряється законам руху зарядженої частинки. З використанням електро-дислокаційної аналогії, заснованої на подібності дислокації Вольтерри циліндричному конденсатору, сформульовано феноменологічний модель взаємодії ПАР ЗОТС з ювенільною поверхнею. Одержано залежності, котрі уможливають зв'язати електричну природу ядра дислокації з механічними характеристиками матеріалу. На підставі теорії дисоціативної адсорбції прийнято залежність для розрахунку кількості молекул середовища, які надходять в одиницю часу до

Corresponding author: Maksym Oleksandrovych Kurin  
E-mail: maksimkurin83@gmail.com

*National Aerospace University 'Kharkiv Aviation Institute',  
17 Chkalov Str., 61070 Kharkiv, Ukraine*

Please cite this article as: M. O. Kurin and M. V. Surdu, The Concept of the Mechanism and Kinetics of Influence of Mechanochemical Processes on Edge Cutting Machining, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 3: 401–424 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.03.0401.

ювенільних ділянок поверхні, утворюваних при диспергуванні оброблюваного металу в одиницю часу. Це уможливило розробити математичні моделі для розрахунку співвідношення роботи деформування елементу поверхневого шару оброблюваного матеріалу з адатомами та ювенільної поверхні, а також густини дислокацій.

**Ключові слова:** адсорбція, дислокація, гідрування, електро-дислокаційна аналогія, сольватований електрон, енергія Фермі, ювенільна поверхня, робота деформування.

This work is dedicated to solution of actual problem of explaining processes taking place in the contact zone between the cutting fluid and the juvenile surface. This one is also dedicated to development of a mathematical model allowing estimating the changes of deformation energy due to adsorption. The arguments are presented concerning the reasons for reducing work metal cutting and plastic deformation energy in the presence of cutting fluid. As hypothesized, the main reason is the process of hydrogenation of metal during processing, and the hydrogen itself has the most significant effect on the nature of the destruction of the surface layer of parts, being distributed, as other surfactant, unevenly by means of the accumulation in traps. As found, the free hydrogen in the metal is ionized, and its behaviour is subject to the laws of motion of a charged particle. The phenomenological model of the interaction between the cutting fluid and the juvenile surface are formulated using the electro-dislocation analogy based on similarity of Volterra dislocation and cylindrical condenser. It has the dependences, which allow connecting the electrical nature of the dislocation core with the mechanical characteristics of the material. On the basis theory of dissociative adsorption, the dependence is accepted for calculating the number of molecules of the medium reaching per unit of time the juvenile surface portions formed by dispersing the treated metal in a unit time. It allows the development of a mathematical model to calculate the ratio of the work of deformation of elements both the surface layer of treated material with adatoms and the juvenile surface as well as the dislocation density.

**Key words:** adsorption, dislocation, hydrogenation, electro-dislocation analogy, solvated electron, Fermi energy, juvenile surface, deformation energy.

Работа посвящена решению актуальной задачи объяснения процессов, протекающих в зоне контакта поверхностно-активных веществ смазывающе-охлаждающих технологических сред (СОТС) с ювенильной поверхностью, а также разработке математической модели, позволяющей оценить величину изменения энергии деформирования в результате адсорбции. Представлены рассуждения о причинах уменьшения работы резания металлов и энергии пластической деформации в присутствии СОТС. Высказано предположение, что основной причиной является наводороживание металла в процессе технологической операции, а сам водород оказывает наиболее значительное влияние на характер разрушения поверхностного слоя деталей, распределяясь, как и прочие поверхностно-активные вещества (ПАВ), неравномерно — накапливаясь в ловушках. Установлено, что свободный водород в металле находится в ионизированном состоянии, и его поведение подчиняется законам движения заряжен-

ной частини. С использованием электро-дислокационной аналогии, основанной на подобии дислокации Вольтерры цилиндрическому конденсатору, сформулирована феноменологическая модель взаимодействия ПАВ ЗОТС с ювенильной поверхностью. Получены зависимости, которые позволяют связать электрическую природу ядра дислокации с механическими характеристиками материала. На основании теории диссоциативной адсорбции принята зависимость для расчёта количества молекул среды, поступающих в единицу времени к ювенильным участкам поверхности, образуемым при диспергировании обрабатываемого металла в единицу времени. Это позволило разработать математические модели для расчёта соотношения работы деформирования элемента поверхностного слоя обрабатываемого материала с адатомами и ювенильной поверхности, а также плотности дислокаций.

**Ключевые слова:** адсорбция, дислокация, наводороживание, электро-дислокационная аналогия, сольватированный электрон, энергия Ферми, ювенильная поверхность, работа деформирования.

*(Отримано 27 січня 2017 р.; після доопрацювання — 28 лютого 2017 р.)*

## 1. ВСТУП

Застосування корозійностійких, високо- і жароміцних матеріалів та стопів для виготовлення найвідповідальніших деталей у машинобудуванні нерозривно сполучене з розвитком методів їх високопродуктивного оброблення. Одним із шляхів підвищення ефективності обробки різанням важкооброблюваних матеріалів є направлена активація ефектів дії компонентів змащувально-охолоджувальних технологічних середовищ (ЗОТС) у зоні різання. Розуміння та вичерпне пояснення всього комплексу явищ і процесів, що перебігають на межі взаємодії ювенильної поверхні оброблюваного матеріалу з поверхнево-активними речовинами (ПАР) ЗОТС, можливе лише на стику таких наук, як фізична та колоїдна хемія, трибологія, спінова мікрохемія тощо, а також фізики міцності, пластичності та теорії дислокацій, що є одними з фундаментальних розділів фізики твердого тіла та фізичного металознавства. Розкриття фізичної суті явищ, а також розробка математичних моделей найважливіших аспектів дії компонентів ЗОТС на зону різання є міждисциплінарною проблемою, яка має важливе прикладне значення в області механічної оброблення важкооброблюваних матеріалів.

## 2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботі [1] зазначено, що проблема інтенсифікації оброблення різанням важкооброблюваних матеріалів сполучена з рішенням цілої

низки задач, серед яких найзначущими є створення математичних моделей найважливіших аспектів дії середовища та методів активації ефектів дії середовища на процеси механічного оброблення.

Раніше у працях [1–4] викладено гіпотези, що уможливають пояснити адсорбційне пониження міцності внаслідок «внутрішньодислокаційної адсорбції» поверхнево-активних атомів контактного середовища, що приводить до нейтралізації електричного заряду порожнини ядра, а саме ядро вважати при цьому утвореним кластеризацією електронів і носіїв позитивного заряду. Таким чином, виникає необхідність у створенні математичного моделю, що описує процес взаємодії поверхнево активних йонів або атомів ЗОТС із порожнинами ядер дислокацій.

### 3. ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

#### 3.1. Центри адсорбції

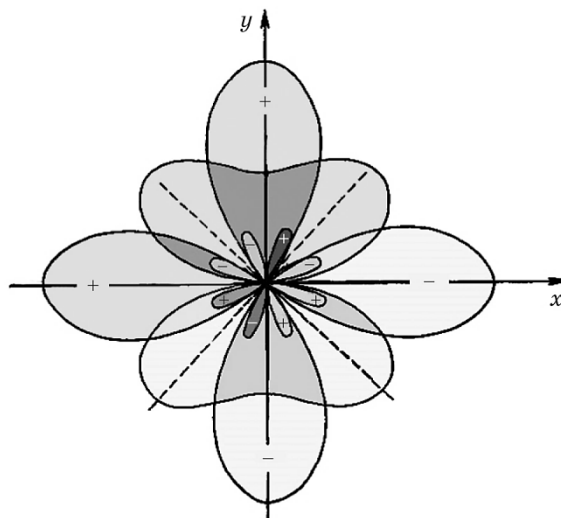
Як відомо, центрами адсорбції на ювенільній поверхні є місця порушення регулярності кристалічної ґратниці (структурних недосконалоостей), до яких можна віднести межі зерен, ядра дислокацій, вакансії, атоми заміщення і втілення тощо. Саме на таких «пастках» адсорбуються молекули поверхнево-активних речовин ЗОТС. Серед усього різноманіття ЗОТС найбільшу тенденцію до адсорбції виявляють полярні речовини, молекули котрих мають електричний дипольний момент. Разом з тим, і деякі оливи, що складаються з повнонасичених рядів  $C_nH_{2n}$  або  $C_nH_{2n+2}$  з неполярними інертними молекулами, можуть утворювати на металічній поверхні тонку плівку з орієнтованих по нормалі до поверхні вуглеводневих молекул [5], що пояснюється їх поляризацією електричним полем поверхні металу. Однією з основних причин зменшення роботи різання металів та енергії пластичної деформації у присутності ЗОТС, за всіма ознаками, є гідрування металу в процесі технологічної операції [5]. Дійсно, водень більшою чи меншою мірою взаємодіє практично з усіма металами [6] та чинить найзначніший вплив на характер їх руйнування, розподіляючись, як і решта ПАР, нерівномірно — накопичуючись у пастках [7, 8]. Джерелами водню при різанні можуть бути сполуки як органічної, так і неорганічної природи, головною з яких є вода. Причиною гідрування поверхні металу в процесі оброблення є синергетична дія таких поверхневих явищ як екзоелектронна емісія, трибодеструкція й адсорбція, котрі приводять до послідовного розкладу молекул води, вуглеводнів, інших поверхнево-активних речовин, а також до виділення водню з наступним його поглинанням металічною поверхнею [5, 9, 10]. Окрім того, деякі хемічні елементи та їх сполуки, що входять до ЗОТС, можуть сприяти дифузії водню в метал (наприклад, Сульфур, Стибій, Арсен, а

також їх сполуки). Гідрування металів практично завжди призводить до водневої крихкості, для пояснення котрої були розроблені різні механізми й теорії [11]. Різноманітність феноменології проявів водневої крихкості, за всіма ознаками, пов'язана з тим, що водень у метал-водневих системах може знаходитись у різних станах [11, 12]: протона  $H^+$ , атома, молекули, йона  $H^-$ . Можлива також адсорбція водню на поверхні мікронесуцільностей і частинках інших фаз, концентрація в мікропорах і колекторах (блістерінг) та інше [12–16]. В цілому, щодо зарядового стану водню в металах немає єдиної думки, і це питання донині залишається предметом дискусій [15–17]. Поруч с цим, більшість дослідників вважають, що водень знаходиться в металі як заряджений йон — протон, можливе також існування гідрид-йона  $H^-$  у гідридних зв'язках із легувальними елементами матриці; водночас, згідно з Ю. А. Хрустальовим, водень у металі повністю не йонізується [18].

Досить детально етапи адсорбції водню викладені у роботі [9], де автори пояснюють наявність у металі молекулярного водню, як наслідок перетворення протонів у атоми з наступною їх молізацією. На підставі представленого моделю адсорбції можна зробити висновок, що водень проникає в метал переважно у вигляді протона [9], це також підтверджується експериментальними даними ряду авторів [5, 9]. Узагальнюючи все вище сказане, можна припустити, що вільний водень у металі знаходиться в йонізованому стані, а його поведінка підкоряється законам руху зарядженої частинки, що узгоджується з даними праць [5, 7]. Крім цього, йонізований стан водню в металі добре пояснює підвищену його концентрацію поблизу ядер дислокацій, котрі подібні до електричного диполя. Дійсно, якщо розглянути крайову дислокацію, то можна відзначити, що вище краю екстраплощини міжатомові віддалі менші нормальних, а нижче — більші, отже, вище краю знаходиться зона стиску, а нижче — розтягу. Згідно з даними праці [9] електрони провідності дрейфують із області стиску в зону розтягу, таким чином, зона стиску набуває позитивного заряду, а зона розтягу — негативного. В цьому випадку для одержання наочної картини розподілу умовного електричного заряду ядра, наприклад, крайової дислокації (рис. 1) достатньо застосувати інверсію до відомого графічного зображення контурів постійних напруг [19, 20]. Точніша картина розподілу заряду можлива за умови визначення інтегральної (вислідної) напруги з використанням функції Ері або принципу суперпозиції.

### 3.2. Електро-дислокаційна аналогія

Розглянемо дислокацію Вольтерри. Якщо врахувати, що центральна порожнина такого ядра циліндру має заряд, то такий дислокаційний модель можна зрівняти з циліндричним конденсатором. За-



**Рис. 1.** Графічне зображення контурів умовних зарядів навколо ядра дислокації.

**Fig. 1.** Graphic representation of contours of conditional charges around the dislocation nucleus.

стосувавши принцип подібності, ми можемо представити енергію дислокації як енергію зарядженого циліндричного конденсатора.

Як відомо з курсу загальної фізики, енергію зарядженого циліндричного конденсатора можна визначити за формулою:

$$W = q^2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (1)$$

де  $q$  — модуль заряду конденсатора, Кл,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  — електрична стала, Ф/м,  $l$  — висота циліндричного конденсатора, м,  $R$  і  $r_0$  — радіуси зовнішнього та внутрішнього порожнистих коаксіальних циліндрів відповідно, м.

У цьому випадку енергія дислокації буде пропорційна квадрату заряду ядра. На користь висловленого припущення можна навести наступні міркування. Відомо, що для утворення нової поверхні необхідно здійснити роботу проти сил когезії, яка запасється в поверхневому шарі у вигляді надлишкової енергії (якщо процес ізотермічний). Згідно зі Щукіним [21], такі величини, як внутрішній тиск, модуль пружності, питома енергія сублимації та інші, є нанорівневими характеристиками взаємодій між молекулами і являють собою ніщо інше, як сили зчеплення, а також мають одну й ту ж природу. В основі цих сил — взаємодія ефективних електричних зарядів, близьких за порядком величин до заряду електрона  $e$  і таких, що

знаходяться на віддаль порядку міжатомових. Таким чином, згідно зі Шукінім, енергія когезії може бути представлена у вигляді:

$$W_k = 2\gamma \approx \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 b^3}, \quad (2)$$

де  $\gamma$  — питома вільна поверхнева енергія, Дж/м<sup>2</sup>,  $q$  — ефективний заряд частинок, Кл,  $b$  — віддаль між частинками, сумірна з міжмолекулярною (міжмолекулярною), м.

Як відомо, потенціальна енергія утворення циліндричної поверхні одиниці довжини дислокації визначається за формулою:

$$A = 2\pi r\gamma b, \quad (3)$$

де  $b$  — період кристалічної ґратниці, м.

Виразивши з рівняння (2) значення питомої поверхневої енергії та підставивши його у рівняння (3), одержимо:

$$A = \frac{q^2 r}{4\epsilon_0 b^2}. \quad (4)$$

Зіставляючи вирази (1) і (4) можна відзначити, що обидві енергії пропорційні квадрату заряду, що утворює ядро.

Енергія пружно-пластичних сил утворення дислокації визначається залежностями:

$$E = L \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} \text{ (крайова дислокація),}$$

$$E = L \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} \text{ (гвинтова дислокація),} \quad (5)$$

де  $G$  — модуль зсуву, Па,  $\nu$  — Пуассонів коефіцієнт,  $b$  — модуль вектора Бюргерса, м,  $L$  — довжина дислокації, м,  $r_0$  — радіус ядра дислокації, м,  $R$  — радіус коаксіального циліндра з порожниною ядра дислокації (для одиничної дислокації обмежений відстанню до вільної поверхні), м.

Прирівнявши праві частини виразів (1) і (5) та виразивши значення заряду, одержимо:

$$q = Lb \sqrt{\frac{G\epsilon_0}{(1-\nu)}} \text{ (крайова дислокація),}$$

$$q = Lb \sqrt{G\epsilon_0} \text{ (гвинтова дислокація).} \quad (6)$$

Одержані таким чином залежності (6) уможливають зв'язати

воєдино електричну природу ядра дислокації з механічними характеристиками матеріялу, в котрому утворено розглядуваний топологічний дефект. Із виразів (6) випливають такі наслідки: енергія дислокацій, з огляду на кратність заряду ядра елементарному заряду електрона, квантується; варіюванням заряду ядер дислокацій можна керувати процесами зародження, розвитку й анігіляції їх ансамблів, а, отже, й міцністю твердого тіла; величина заряду ядра прямо пропорційна довжині дислокації й залежить від здатності матеріялу сприймати пружну деформацію; поле пружних механічних напруг навколо дислокації є еквівалентом заряду ядра.

Ці наслідки лише підтверджують міркування, викладені в праці [1], а також дослідження інших авторів [22–24]. З практичної точки зору становить інтерес можливість розрахунку зміни енергії пластичного деформування та границі міцності матеріялу в процесі оброблення у результаті дії конкретних марок ЗОТС на активну зону. Рішення цієї задачі, що має важливе прикладне значення, можливе на основі методики визначення кінетики механохімічних реакцій в умовах контактної зони [2].

Для опису механохімічних реакцій, що протікають у контактній зоні при механічному обробленні, скористаємося кінетичною схемою за Бутягіним [25] та введемо наступні допущення [26]:

- стружкоутворення оброблюваного металу супроводжується виникненням ювенільних ділянок поверхні, котрі складаються з площі  $S_{ю}$  поверхні розділу «оброблюваний метал–середовище» та площі  $S_{я}$  поверхні порожнини ядер дислокацій, що генеруються при розвитку пластичних деформацій;

- зародження дислокації починається з поверхні поділу «тверде тіло–середовище» та супроводжується утворенням елементарної сходинки нової поверхні та циліндричної поверхні порожнини ядра дислокації з радіусом  $r_0$ , що визначається, наприклад, за формулою

$$r_0 = \frac{\mu b^2}{8\pi^2 \gamma (1 - \nu)} + \frac{Q_{\Sigma}^2}{2\pi^2 \gamma \epsilon_0 a^2},$$

де  $\mu$  — модуль зсуву, Па,  $b$  — модуль вектора Бюргерса, м,  $\gamma$  — питома поверхнева енергія твердого тіла, Дж/м<sup>2</sup>,  $Q_{\Sigma}$  — сумарний заряд дислокації, Кл,  $a$  — період кристалічної ґратниці, м;

- активні центри адсорбції локалізовані на ювенільних ділянках поверхні;

- швидкість утворення центрів пропорційна швидкості утворення площі  $S_{ю}$  ювенільної поверхні розділу «оброблюваний метал–середовище» та швидкості утворення площі  $S_{я}$  поверхні порожнистих ядер дислокацій, при цьому число центрів на одиниці нової поверхні постійне для даного твердого тіла;

- всі центри енергетично рівноцінні, а процеси за їх участю мож-



на описати в межах моделю однорідної поверхні;

- елементарний акт адсорбції відбувається при співударі молекули газоподібного середовища з ювенільною поверхнею оброблюваного металу, а число молекул, що адсорбуються за одиницю часу на одиниці поверхні, пропорційне числу співударів молекул середовища з плоскою поверхнею, котре згідно з [27]:

$$n_{\text{ад}} = \frac{p}{\sqrt{2\pi M k_B T}},$$

де  $p$  — тиск газоподібного середовища, Па,  $M$  — маса молекули, кг,  $T$  — температура, К,  $k_B = 1,38045 \cdot 10^{-23}$  — Больцманова стала, Дж/К;

- атоми, що адсорбуються на циліндричній поверхні порожнистих ядер дислокацій, що генеруються, захоплюються з поверхні розділу «тверде тіло–середовище» у момент генерації (переважно гвинтових) дислокацій, тому площа потоку адсорбції дорівнює площі  $S_{\text{ю}}$  ювенільної поверхні розділу «оброблюваний метал–середовище»;

- процес самовільної загибелі центрів, що характеризується часом їх життя  $\tau_0$ , ототожнюється з релаксацією надлишкової енергії розкривної ювенільної поверхні;

- активні короткоживучі центри у вакуумі гинуть самовільно, а в хемічних активних середовищах їх загибель супроводжується взаємодією з молекулами або атомами, що адсорбуються;

- будемо вважати, що процес різання металу стаціонарний, тобто величина швидкості утворення центрів адсорбції постійна.

Для складання кінетичного рівняння зміни кількості центрів адсорбції при диспергуванні металів використаємо теорію дисоціативної адсорбції [27], згідно з якою густина потоку молекул має вигляд

$$J = \frac{\alpha_x p}{\sqrt{2\pi M k_B T}} - \xi \theta^2 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right),$$

де  $\alpha_x$  — ймовірність хемічної реакції при співударі,  $\xi$  — коефіцієнт пропорційності,  $\theta$  — істинне (або поточне) значення ступеня покриття поверхні речовиною, що адсорбується,  $Q$  — енергія активації процесу десорбції, кал/моль.

Кількість молекул середовища  $\dot{N}_{\text{ад}}(\tau)$ , яка надходить в одиницю часу до ювенільних ділянок поверхні, котрі утворюються при диспергуванні оброблюваного металу в одиницю часу, буде

$$\dot{N}_{\text{ад}}(\tau) = J \dot{S}_{\text{ю}} = \left[ \frac{\alpha_x p}{\sqrt{2\pi M k_B T}} - \xi \theta^2 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \right] \dot{S}_{\text{ю}}, \quad (7)$$

де  $\dot{S}_{ю}$  — швидкість утворення площі ювенільної поверхні,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для обчислення загальної довжини дислокацій в об'ємі, що деформується (рис. 2), яка необхідна для визначення заряду, можна скористатися залежністю

$$L = S_{ю} \int_0^t \rho(x) dx, \quad (8)$$

де  $\rho(x)$  — густина дислокацій на поточній глибині (закон зміни густини з глибиною),  $\text{м}^{-2}$ ,  $t$  — глибина поверхневого шару,  $\text{м}$ .

Прийmemo допущення, що в межах товщини хемосорбційного шару густина дислокацій залишається постійною, тоді молекули середовища є джерелами адатомів та йонів, котрі адсорбуються на поверхні порожнистих ядер, утворюючи просторово-локалізовані зв'язки, що зменшують і/або нейтралізують електричний заряд ядра. Заряд ядра елемента об'єму поверхневого шару з площею поверхні  $S_{ю}$  може бути визначений за формулами (6).

Відомо, що робота деформування визначається площею поверхні та питомою поверхневою енергією, згідно з залежністю [28]

$$A = F_d \gamma.$$

Але питома поверхнева енергія пропорційна квадрату ефективних електричних зарядів (2). Таким чином, співвідношення роботи деформування елемента з адатомами  $A_{ад}$  та ювенільної поверхні  $A_{ю}$  можна виразити формулою

$$\frac{A_{ад}}{A_{ю}} = \frac{(\langle q \rangle - q(\Sigma N_R))^2}{\langle q \rangle^2}, \quad (9)$$

де  $\langle q \rangle$  — середньостатистичний заряд дислокацій у зрізаному шарі,  $q(\Sigma N_R)$  — сумарний заряд адсорбованих йонів.

Кількість йонів, що беруть участь в нейтралізації зарядів ядер

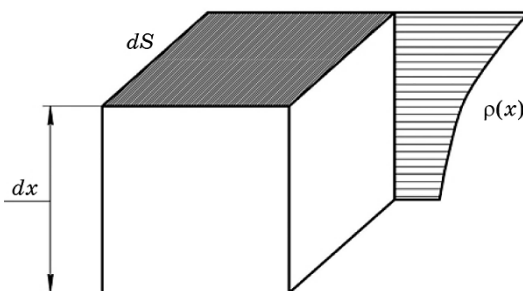


Рис. 2. Елемент об'єму, що деформується.

Fig. 2. Element of deformable volume.

дислокацій, буде набагато меншою за кількість молекул середовища, які надійшли до ювенільної поверхні за певний проміжок часу ( $N_R \ll N_{ад}$ ), оскільки лише частина молекул, зазнаючи сильного збудження при контакті з металом, перейдуть в інший поляризований стан з наступною дисоціацією на окремі фрагменти. Отже, лише обмежена кількість новоутворених, а також від самого початку існуючих у середовищі йонів, візьмуть участь в обміні електронами з атомами металу, реалізуючи локалізовану хемічну взаємодію з ядрами дислокацій. Частина йонів і молекул середовища, які залишилися і не взяли участь у хемосорбційній взаємодії з ядрами дислокацій, будуть адсорбуватися на поверхні з утворенням подвійного електричного шару.

Як бачимо, знаючи інтегральний заряд адатомів, що надходять в одиницю часу до ювенільної поверхні, можна оцінити величину зменшення енергії деформування в результаті адсорбції. Вихідною величиною, необхідною для визначення заряду, є густина дислокацій. Цей параметер можна визначити на основі законів механізму деформаційного зміцнення або скориставшись рівнянням виду [28]:

$$\rho(h) = (\rho_{\max} - \rho_0)(1 - x / h_{\text{упр}})^\chi + \rho_0, \quad (10)$$

де  $\rho_0$  — густина дислокацій вихідного стану,  $\text{м}^{-2}$ ,  $\rho_{\max}$  — густина дислокацій верхнього поверхневого шару деталю,  $\text{м}^{-2}$ ,  $\chi$  — показник зміцнення,  $x$  — глибина поверхневого шару (поточна координата),  $\text{м}$ ,  $h_{\text{упр}}$  — товщина зміненого шару,  $\text{м}$ .

Є різні моделі механізму деформаційного зміцнення, розроблені Тейлором, Зегером, Кульманом-Вільсдорф, Басинським та ін. Найточніше характер зв'язку між напругою плинності та деформацією описує Тейлорова теорія, що підтверджується експериментальними даними для більшості стопів на основі заліза, нікелю, титану та інших металів [29]. На основі цієї теорії Старковим одержано залежність напруги плинності матеріялу від густини дислокацій

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_{0,2} + (Gb\sqrt{\rho}) / 2\pi. \quad (11)$$

Ліва частина рівняння (11) представляє собою формалізовану форму кривої зміцнення, а права частина є ніщо інше як рівняння плинності матеріялу в залежності від поточного значення густини дислокацій, тобто від ступеню зміцнення (наклепу) матеріялу.

Згідно з енергетичною теорією пластичності перехід від пружного стану до пластичного відбувається у випадку, коли інтенсивність напруг досягає границі плинності матеріялу, тобто коли виконується умова

$$\sigma_i = \sigma_T.$$

Погляд з цього боку на рівняння (11) дозволяє висловити припущення, що ліва частина рівняння представляє ніщо інше, як інтенсивність напруг. Дійсно, якщо покласти  $\rho = 0$ , що можливо у випадку відсутності лінійних дефектів та джерел утворення нових дислокацій і, як наслідок, зміцнення у процесі деформування, то одержимо залежність  $\sigma_i = \sigma_{0,2}$ , що характерно для ідеально пластичного тіла [30]. Інтенсивність напруг для різних середовищ, що деформуються, представляє складну математичну залежність від інтенсивностей деформацій, швидкостей деформацій, температури тощо.

Згідно з Ю. М. Алексєєвим [30], інтенсивність напруг можна розглядати як простішу залежність функції однієї змінної — інтенсивності деформацій:

$$\sigma_i = \sigma_T e_i^n. \quad (12)$$

Подібного виду залежністю добре апроксимуються криві зміцнення, побудовані за результатами випробувань матеріалу на стиснення термічно оброблених, вуглецевих, легованих, конструкційних та інструментальних сталей, більшості високолегованих сталей, алюмінієвих і титанових стопів, а також інших матеріалів [31, 32]. Прирівнявши праві частини рівнянь (11) і (12) та перейшовши до однієї з двох границь плинності (фізичної або умовної), після перетворень одержимо формулу для густини дислокацій

$$\rho = \left[ \frac{2\pi}{Gb} \sigma_{0,2/T} (e_i^n - 1) \right]^2.$$

### 3.3. Адсорбція води на металічній поверхні

Вивчення адсорбції води на металічній поверхні становить великий практичний інтерес в сучасній науці і техніці як для дослідження впливу цього явища на процеси, що протікають у поверхневому шарі металу, так і для встановлення характеру взаємодії базової основи водяних ЗОТС на зону різання.

Розглянемо взаємодію води з механічною поверхнею з точки зору розробленої гіпотези внутрішньодислокаційної адсорбції. Контакт молекул води з металами, так чи інакше, приводить до виділення водню [33], що пояснюється наявністю за  $T > 0$  К вільних електронів, здатних до емісії. Відомо, що електрони зазнають сольватації у всіх рідинах [33], а особливо у полярних. Це сприяє зменшенню роботи виходу і в остаточному підсумку приводить до того, що частина електронів з енергіями  $W = P^2/(2m)$ , які перевищують енергію Фермі, буде переходити у зовнішнє середовище.

У зоні сольватованого електрона вода розпадається на наступні частинки:  $H$ ,  $H_3O^+$ ,  $OH^-$ ,  $OH$ ,  $H_2$ ,  $e_{ад}$  та ін.; крім того, від самого по-

чатку у дистильованій воді містяться йони  $H^+$  та  $OH^-$ , концентрація котрих визначається водневим показником рН. Як буде показано нижче, водневий показник не чинить впливу на реакційну здатність гідратованого електрона, у достатньо широкому діапазоні значень. На наш погляд, слід розглянути вплив водневого показника на адсорбцію йонів Гідрогену детальніше. Отож, процес переходу електрона з металу в розчин, згідно з принципом Франка–Кондона, можливий тільки за рівності енергій електрона в металі та в атомі Гідрогену [33]. Два можливих механізми переходу електрона в розчин детально викладені у праці [33], де автор виділив домінуючий, найімовірніший механізм, суть котрого зводиться до наступного. Серед Максвеллових електронів, завжди присутніх за  $T > 0$  К, знайдуться такі, енергія котрих дорівнює енергії електрона в середньостатистичному атомі Гідрогену, і наскільки більшою мірою енергія в середньостатистичному атомі Гідрогену буде відрізнятись від енергії Фермі, настільки меншою буде кількість електронів, здатних вступити у реакцію.

Таким чином, якщо кількість реакційноздатних електронів буде набагато меншою за кількість середньостатистичних протонів, то швидкість реакції не буде залежати від рН, що й спостерігається на практиці. Найімовірніше, з цієї ж причини у не дуже концентрованих розчинах сильних кислот до 0,1 М, що не містять сторонніх електролітів, перенапряга водню не залежить від концентрації кислоти, тобто від рН [34], а швидкість такого процесу як корозія заліза не залежить від рН [35] у середній області рН 4–9.

Відносно характеру адсорбції води на металічній поверхні немає єдиної думки [36]. У більшості праць вказується на можливість протікання адсорбції трьох типів у залежності від природи металу, а також характеру поверхні: дисоціятивної, молекулярної, змішаної. Разом з тим, авторами для більшості металів встановлена енергетична перевага дисоціятивної адсорбції порівняно з молекулярною на основі термодинамічної оцінки. Випадки спостереження виключно молекулярної адсорбції на поверхні металів можна пояснити, за всіма ознаками, малою концентрацією електронів, що знаходяться у збуджених станах, та чистотою проведення експерименту. Самі ж автори пояснюють молекулярну адсорбцію існуванням енергетичного бар'єру дисоціації. У випадку таких металів як Fe, Ti, Mo, W, Cr, котрі застосовуються для виготовлення важкооброблюваних сталей та стопів, встановлено, що адсорбція води відбувається у дисоціятивній формі, а для Ni являє собою пограничний випадок і є предметом дискусії.

Контакт води з металічною поверхнею приводить до виділення водню з подальшою його йонізацією в потенціальному полі металу та, в підсумку, закінчується утворенням гідрид-йонів ( $H^-$ ) або протонів ( $H^+$ ), що погоджується з вище викладеними міркуваннями та

даними праці [37].

Наявність поблизу межі поділу «метал–вода» різноманітних йонів та інших частинок викликає труднощі опису всього комплексу процесів та хемічних реакцій, тому в першому наближенні ми використовуємо прості феноменологічні уявлення.

Оскільки адсорбція йонів Гідрогену є основною причиною зменшення міцності поверхневого шару металу, зупинімося на детальному розгляді виключно цього явища, прийнявши низку припущень: нехтуємо рекомбінацією йонів; вважаємо, що кожний електрон з енергією  $W \geq W_F$  сольватується і бере участь в утворенні одного йона Гідрогену.

За температури металу  $T > 0$  К електронами буде заповнена частина станів з енергіями  $W \geq W_F$  (більше енергії Фермі) з імовірністю, описуваною розподілом Фермі–Дірака.

Концентрацію електронів  $\Delta n$ , що знаходяться у збуджених станах з енергіями  $W_F + 2k_B T \geq W \geq W_F$ , можна визначити, скориставшись залежністю [38–41]:

$$\Delta n = \int_{\mu}^{\mu+2k_B T} \rho(W) f(W) dW, \quad (13)$$

де  $\rho(W)$  — густина станів,  $f(W)$  — функція розподілу Фермі–Дірака.

За низьких температур  $k_B T \ll W_F$  межа заповнення енергетичних станів розмивається симетрично відносно значень  $f(\mu) = 1/2$  на величину  $\pm 2k_B T$ . При цьому  $\mu$  практично збігається з  $W_F$ . Таким чином, вираз (13) набуде наступного вигляду:

$$\Delta n = \frac{\rho(W_F)}{2} \int_{W_F}^{W_F+2k_B T} \left( 1 - \frac{W - W_F}{2k_B T} \right) dW = \frac{1}{2} \rho(W_F) k_B T. \quad (14)$$

У кінцевому підсумку одержимо

$$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} m_0^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{W_F} k_B T,$$

де  $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$  — маса електрона, кг,  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  — Планкова стала, Дж·с.

Енергію Фермі металу основи стопу можна визначити з довідникових даних або скориставшись формулою

$$W_F = \frac{\hbar^2}{2m_0} (3\pi^2 n_0)^{2/3},$$

де  $n_0$  — концентрація вільних електронів,  $\text{м}^{-3}$ .

Концентрація електронів  $n_0$  визначається на підставі властивостей атома та густини речовини за формулою [42–44]:

$$n_0 = N_A \frac{z\rho}{A},$$

де  $z$  — кількість електронів на зовнішньому рівні металу,  $A$  — відносна атомна маса металу, г/моль,  $\rho$  — густина металу, г/м<sup>3</sup>,  $N_A$  — число Авогадро, моль<sup>-1</sup>.

Для підтвердження вищевикладених міркувань розглянемо процедуру визначення ступеня активності йонів середовища (в нашому випадку, йонів гідроксонію [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] або, в спрощеному випадку, Гідрогену [H<sup>+</sup>]). Як відомо, для оцінки активності найчастіше використовують водневий показник рН, а коефіцієнти активності йонів H<sup>+</sup> у розчинах можна визначити на основі теорії Дебая–Гюккеля [45].

Для чистої води за 25°C нейтральний рН = 7, але зміна температури впливає на йонний добуток, а отже, і значення нейтрального рН. З метою дотримання строгости у математичних обчисленнях, концентрацію йонів Гідрогену визначимо через йонний добуток води  $K_w$ , який є функцією температури. Існує достатня кількість емпіричних залежностей для визначення шуканої величини, скористаємось однією з формул Г. Харнеда та Б. Оуена, наведених у праці [46]:

$$\lg K_w(T) = -6013,79 / T - 23,6521 \lg T + 64,7013. \quad (15)$$

З використанням формули (15) легко визначити  $pH = -\lg \sqrt{K_w}$ . Оскільки коефіцієнт активності для недисоційованих молекул у випадку нескінченно розведених розчинів  $f = 1$ , то можна прийняти, що активність йонів буде дорівнювати фактичній концентрації ( $a_{H^+} = C_{H^+}$ ), таким чином, концентрація йонів Гідрогену H<sup>+</sup> (протонів) у чистій нейтральній воді обчислюється за формулою  $a_{H^+} = \sqrt{K_w}$ .

Розглянемо конкретний приклад.

Скориставшись рівнянням, оцінимо зміну роботи деформування елементу з адатомами порівняно з ювенільною поверхнею при круглому врізному шліфуванні виробу зі сталі ( $G = 8 \cdot 10^{10}$  Па, модуль вектора Бюргерса приймемо рівним періоду кристалічної ґратниці заліза  $b = 2,27 \cdot 10^{-10}$  м) діаметром  $d = 0,06$  м за наступних режимів шліфування: швидкість шліфування  $V_k = 35$  м/с, лінійна швидкість колового обертання деталю  $V_d = 0,65$  м/с, радіальна подача на врізання  $S_r = 2 \cdot 10^{-5}$  м/с, середня товщина стружки, що знімається різальним зерном за один прохід  $a_z = 4,45 \cdot 10^{-6}$  м, абразивний круг ПП 600×40×305 24A40НСМ15К1 [4]. Знехтуємо десорбцією та розглянемо варіант, коли  $\theta \cong 0$ , а  $\alpha_\chi = 1$ . Будемо вважати, що в контактній зоні здійснюється охолодження водяною парою  $M(H_2O) = 2,99 \cdot 10^{-26}$

кг при тискові  $p = 101325$  Па. Середня температура контактної зони  $T \cong 400$  К. Енергія активації десорбції хемосорбованих молекул середовища [4]  $Q = 570$  кДж/моль. Середня початкова густина дислокацій  $\rho_0 = 2,71 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>, а максимальна —  $\rho_{\max} = 7,9 \cdot 10^{15}$  м<sup>-2</sup>,  $\chi = 1,45$ ,  $\alpha = 1,0$ ,  $\tau = 2,86 \cdot 10^{-3}$  с (час  $\tau$  вибраний з умови утворення хемосорбційного моношару на ювенільній поверхні).

Визначимо відсотковий вміст йонів  $H^+$  у водяній парі контактної зони за кімнатної температури 25°C (298,15 К). Знайдемо йонний добуток води, скориставшись формулою (15):

$$\lg K_w(T) = -\frac{6013,79}{298,15} - 23,6521 \lg(298,15) + 64,7013 \cong -14. \quad (16)$$

Послідовно потенціуючи (16) та добуваючи корінь, одержимо концентрацію йонів:

$$a_{H^+} = 10^{-7} \text{ моль/л.}$$

Знайдемо густину водяної пари:

$$\rho_{H_2O} = \frac{pM}{RT} = \frac{101325 \cdot 18}{8,31 \cdot 298,15} = 736,128 \text{ г/м}^3.$$

Перейдемо до масової частки (відсоткової концентрації)

$$\omega = \frac{1000C_M M}{\rho_{H_2O}} = \frac{1 \cdot 10^{-7} \cdot 18 \cdot 1000}{736,128} = 2,446 \cdot 10^{-6};$$

отже, у водяній парі вміст йонів  $H^+$  не перевищує 0,0002446%.

Для того щоб можна було скористатися запропонованою методикою розрахунку, необхідно виразити площу ювенільної поверхні  $S_{ю}$ , котра розкривається різальними абразивними зернами за проміжок часу  $\tau$  через значення режимних параметрів:

$$S_{ю} = \frac{2\pi d S_{\Pi} B}{a_z} \tau = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,06 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,04}{4,45 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,86 \cdot 10^{-3} = 1,938 \cdot 10^{-4} [\text{м}^2].$$

Проміжну величину з розмірністю погонної густини та кількісно рівну довжині дислокацій в елементарному циліндричному стовпчику висотою  $a_z$ , обмеженому зверху і знизу одиничними площинками, вирахуємо, використовуючи залежності (8) та (10). Після математичних перетворень, пропустивши тут і далі за текстом громіздкі вираховування, одержимо

$$\int_0^{a_z} \rho(x) dx = \rho_0 a_z + \frac{(\rho_m - \rho_0) \left[ (a_z - h) \left( \frac{h - a_z}{h} \right)^\chi + h \right]}{\chi + 1} = 2,795 \cdot 10^{10} [\text{м}^{-1}].$$



Загальна довжина дислокацій у шарі стружки, що знімається, згідно з залежністю (8):

$$L = S_{\text{ю}} \int_0^{a_z} \rho(x) dx = 1,938 \cdot 10^{-4} \cdot 2,795 \cdot 10^{10} = 5,417 \cdot 10^6 \text{ [м]}.$$

Визначаємо сумарний заряд ядер гвинтових дислокацій за формулою (6):

$$q = Lb\sqrt{G\varepsilon_0} = 5,417 \cdot 10^6 \cdot 2,27 \cdot 10^{-10} \cdot \sqrt{8 \cdot 10^{10} \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} = 0,001035 \text{ [Кл]}.$$

Кількість йонів  $\text{H}^+$ , що надійшла до ювенільних ділянок поверхні за проміжок часу  $\tau$ , обчислимо за допомогою формули (7):

$$N_{\text{ад}} = \left[ \frac{\alpha_x p}{\sqrt{2\pi M k_B T}} - \xi \theta^2 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \right] S_{\text{ю}} \omega \tau =$$

$$= \left[ \frac{1 \cdot 101325}{\sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 2,99 \cdot 10^{-26} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 400}} - 0 \right] \times$$

$$\times 1,938 \cdot 10^{-4} \cdot 2,446 \cdot 10^{-6} \cdot 2,86 \cdot 10^{-3} \cong 4,19 \cdot 10^{15}.$$

Сумарний заряд йонів Гідрогену:

$$q(N_{\text{ад}}) = N_{\text{ад}} e = 4,19 \cdot 10^{15} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 0,000671 \text{ [Кл]}.$$

Концентрація валентних електронів  $n_0$ :

$$n_0 = N_A \frac{z\rho}{A} = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot \frac{2 \cdot 7,874 \cdot 10^6}{55,845} = 1,698 \cdot 10^{29} \text{ [м}^{-3}\text{]}.$$

Визначаємо енергію Фермі для заліза як основного елементу металічної матриці стопу

$$W_F = \frac{\hbar^2}{2m_0} (3\pi^2 n_0)^{2/3} = 11,183 \text{ [эВ]}.$$

Обчислюємо густину електронів у збуджених станах  $[\text{м}^{-3}]$ :

$$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} m_0^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{W_F k_B T} = 3,925 \cdot 10^{26}.$$

Для розрахунку кількості сольватованих електронів та йонів Гідрогену, а також їх сумарного заряду, необхідно знати граничну товщину шару металу, який є донором Максвеллових електронів, що відповідає глибині проникнення позитивного фону йонної ґрат-

ниці, утвореного електронними вакансіями.

Розглянемо поверхню металу. Якщо вісь  $z$  напрямлена по нормалі до поверхні у вакуум, то для Максвеллових електронів, завжди присутніх у металі за  $T > 0$  К, розподіл концентрації в області  $z > 0$  буде мати вигляд [47] (рис. 3):

$$n(z) = n_0 \left( 1 + \frac{z}{\sqrt{2D}} \right)^{-2}, \quad (17)$$

де  $D = \varepsilon_0 k_B T / (e^2 n_0)$  — довжина Дебайового екранування.

Оскільки межа заповнення енергетичних станів розмивається симетрично відносно рівня Фермі, приймемо допущення, що глибина проникнення позитивного фону ґратниці не перевищує величини  $Z_{\max}$  — граничної віддалі виявлення електрона від поверхні металу, що визначається за формулою (17) з умови  $n(z) = 1$ . Розв'язуючи рівняння відносно  $z$ , знаходимо  $Z_{\max} = 6,536 \cdot 10^{-9}$  м.

Визначимо кількість йонів Гідрогену, утворених в результаті контакту молекул води та вільних електронів, а також їх заряд:

$$\begin{aligned} N_R &= \Delta n S_{\text{ю}} Z_{\max} = 3,925 \cdot 10^{26} \cdot 1,938 \cdot 10^{-4} \cdot 6,536 \cdot 10^{-9} = \\ &= 4,973 \cdot 10^{14}, \\ q(\sum N_R) &= \Delta n e S_{\text{ю}} Z_{\max} = N_R e = 4,973 \cdot 10^{14} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = \\ &= 7,968 \cdot 10^{-5} \text{ [Кл]}. \end{aligned}$$

Розрахуємо співвідношення роботи деформування елемента з атомами  $A_{\text{ад}}$  та ювенільної поверхні  $A_{\text{ю}}$ , використовуючи формулу (9):

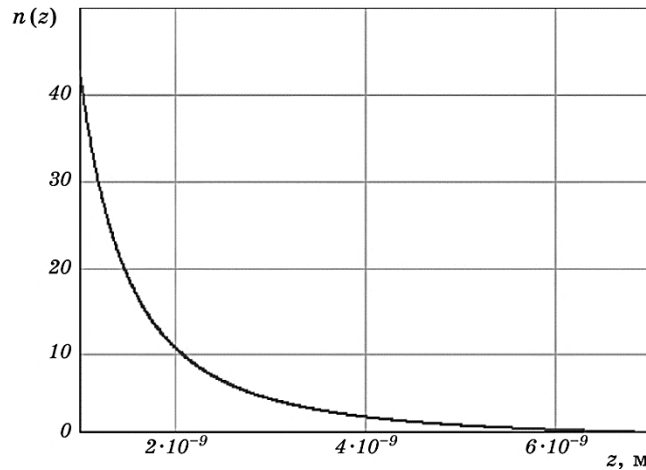


Рис. 3. Залежність електронної густини від віддалі до металічної поверхні.

Fig. 3. The dependence of electron density on the distance to the metal surface.

$$\frac{A_{\text{ад}}}{A_{\text{ю}}} = \frac{(\langle q \rangle - q(N_R))^2}{\langle q \rangle^2} = \frac{(0,001035 - 7,968 \cdot 10^{-5})^2}{0,001035^2} \cong 0,852.$$

Проаналізуємо одержані результати. Адсорбція дистильованої води на сталій поверхні сприяє зменшенню роботи деформування до 15% порівняно з обробкою у вакуумі. Кількість йонів Гідрогену, що надійшла до ювенільної поверхні ( $N_{\text{ад}} = 4,19 \cdot 10^{15}$ ), більша на порядок кількості реакційноздатних електронів та адсорбованих йонів  $N_R = 4,973 \cdot 10^{14}$ , при цьому слід враховувати, що реальна кількість Максвеллових електронів буде ще меншою. З цього випливає, що більшість йонів Гідрогену, які знаходяться від самого початку у воді, інертні та не беруть участі у хемосорбційній взаємодії, що підтверджує основні положення нашої гіпотези та узгоджується з результатами дослідження інших авторів, розглянутими вище. Крім того, заряд йонів Гідрогену  $q(N_{\text{ад}}) = 0,000671$  Кл настільки значний, що у випадку участі всіх йонів Гідрогену  $N_{\text{ад}}$  у нейтралізації заряду ядер дислокацій, міцність металічної поверхні мала б зменшитися на  $\cong 90\%$ , що суперечить практичним спостереженням.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. З метою побудови феноменологічного моделю взаємодії ПАР ЗОТС з ювенільними ділянками поверхні запропонований новий методологічний підхід електро-дислокаційної аналогії, заснований на подібності дислокації Вольтерри циліндричному конденсатору.
2. Одержала подальший розвиток гіпотеза «внутрішньодислокаційної адсорбції», суть котрої зводиться до нейтралізації заряду ядер дислокацій (які є продуктами взаємодії молекул ЗОТС та сольватованих електронів) йонами Гідрогену.
3. Розроблено математичну модель, яка зв'язала воедино електричну природу ядра дислокації з механічними характеристиками матеріалу і яка уможливило виконувати розрахунок густини дислокацій та давати оцінку величині зміни роботи деформування в результаті адсорбції.
4. З позиції запропонованої концепції кінетики механохімічних процесів, котрі перебігають у зоні різання, розглянуто адсорбцію водяної пари на металічній поверхні.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. А. Курин, *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, вып. 61: 82 (2013).
2. Н. В. Сурду, *Вестник НТУ «ХПИ». Технології в машинобудуванні*, вип. 34 (2008).
3. М. А. Курин, *Исследование технологии планетарного глубинного*

- шлифования плоских поверхностей деталей авиационных двигателей* (Дисс. ... канд. техн. наук) (Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»: 2011).
4. Н. В. Сурду, *Повышение эффективности шлифования труднообрабатываемых материалов за счёт усовершенствования кинематики процессов* (Дисс. ... канд. техн. наук) (Харьков: Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины: 2005).
  5. Д. Н. Гаркунов, *Триботехника (износ и безызносность)* (Москва: МСХА: 2001).
  6. D. H. Herring, *Wire Forming Technology International*, **13**, No. 4: 24 (2010).
  7. A. Barnoush, *Hydrogen Embrittlement, Revisited by in situ Electrochemical Nanoindentation* (Thesis of Dissert. ... for PhD) (Saarbrücken: Saarland University: 2007).
  8. S. Brahim, *Fundamentals of Hydrogen Embrittlement in Steel Fasteners* (Montreal: IVESA Technologies Corp.: 2014).
  9. Г. И. Суранов, *Водород: разрушение, изнашивание, смазка деталей машин* (Ухта: УГТУ: 2015).
  10. В. Н. Латышев, *Повышение эффективности СОЖ* (Москва: Машиностроение: 1975).
  11. Л. В. Пашкова, *Фрактально-синергетические аспекты локальной микроповреждаемости и разрушения диффузионно-активированной водородом стали* (Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук) (Москва: ОГУ: 2014).
  12. Г. В. Карпенко, Р. И. Крипякевич, *Влияние водорода на структуру и свойства стали* (Москва: Металлургиздат: 1962).
  13. П. В. Гельд, Р. А. Рябов, Е. С. Кодес, *Водород и несовершенство структуры металла* (Москва: Металлургия: 1979).
  14. Б. А. Колачев, *Водородная хрупкость металлов* (Москва: Металлургия: 1985).
  15. Е. Г. Максимов, О. А. Панкратов, *Успехи физических наук*, **116**, вып. 7: 385 (1975).
  16. В. А. Соменков, С. Ш. Шильштейн, *Фазовые превращения водорода в металлах (обзор)* (Москва: Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова: 1978).
  17. П. В. Гельд, Р. А. Рябов, *Водород в металлах и сплавах* (Москва: Металлургия: 1974).
  18. Ю. А. Хрусталёв, *Эффект безызносности и триботехнологии*, № 2: 19 (1997).
  19. Дж. П. Хирт, И. Лотте, *Теория дислокаций* (Москва: Атомиздат: 1972).
  20. П. И. Полухин, С. С. Горелик, В. К. Воронцов, *Физические основы пластической деформации* (Москва: Металлургия: 1982).
  21. Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина, *Коллоидная химия* (Москва: Высшая школа: 2004).
  22. Г. А. Малыгин, *Физика твёрдого тела*, **43**, вып. 5: 822 (2001).
  23. Г. А. Малыгин, *Успехи физических наук*, **169**, вып. 9: 979 (1999).
  24. Р. Б. Моргунов, *Успехи физических наук*, **174**, вып. 2: 131 (2004).
  25. П. Ю. Бутягин, *Успехи химии*, вып. 11: 1769 (1984).
  26. Н. В. Сурду, *Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов*, вып. 24 (1): 139 (2001).

27. В. Н. Чеботин, *Физическая химия твёрдого тела* (Москва: Химия: 1982).
28. Ф. Я. Якубов, *Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов* (Ташкент: Фан: 1985).
29. В. К. Старков, *Физика и оптимизация резания материалов* (Москва: Машиностроение: 2009).
30. Ю. Н. Алексеев, *Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием* (Харьков: Издательство ХГУ: 1969).
31. ГОСТ 25.503–97. *Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие* (Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: 1997).
32. А. И. Долматов, А. А. Кабатов, М. А. Курин, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 3 (100): 12 (2013).
33. Р. Р. Салем, *Теория двойного слоя* (Москва: Физматлит: 2003).
34. И. М. Жарский, Н. Л. Смоляг, А. А. Черник, *Кинетика электролитического выделения водорода* (Белорусский гос. технологический ун-т: 2016).
35. Р. Юхневич, Е. Валашковский, Г. Станкевич, *Техника борьбы с коррозией* (Ленинград: Химия: 1978).
36. А. М. Кузнецов, *Соросовский образовательный журнал*, 6, № 5: 45 (2000).
37. Ю. П. Черданцев, И. П. Чернов, Ю. И. Тюрин, *Методы исследования систем металл–водород* (Томск: Изд. ТПУ: 2008).
38. Л. П. Авакянц, *Электроны в металлах* (Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова: 2010).
39. В. В. Фицак, *Статистика квантовых частиц. Электроны в металле* (Санкт-Петербургский горный ун-т: 2014).
40. В. Н. Глазков, *Свойства электронного Ферми-газа* (Москва: МФТИ: 2016).
41. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Статистическая физика* (Москва: Наука: 1976).
42. А. Д. Андреянов, В. П. Петросян, *Вісник Одеського національного університету. Хімія*, 15, № 12: 54 (2010).
43. А. Д. Андреянов, И. А. Кузнецова, Л. И. Короленко, *Вісник Одеського національного університету. Хімія*, 14, № 11: 45 (2009).
44. Ф. К. Ткаченко, К. И. Ткаченко, В. Г. Гаврилова, *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*, вип. 2: 102 (2010).
45. Л. С. Стерман, В. Н. Покровский, *Физические и химические методы обработки воды на ТЭС* (Москва: Энергоатомиздат: 1991).
46. Е. Н. Бушуев, *Вестник ИГЭУ*, вып. 2: 1 (2007).
47. О. С. Еркочкин, А. В. Курочкин, *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Естественные науки*, № 1: 18: (2012).

## REFERENCES

1. М. А. Kurin, *Otkrytye Informatsionnye i Komp'yuternye Integrirovannye Tekhnologii*, Iss. 61: 82 (2013) (in Russian).
2. N. V. Surdu, *Vestnik NTU 'KhPI'. Tekhnologii v Mashynobuduvanni*, Iss. 34 (2008) (in Russian).
3. М. А. Kurin, *Issledovanie Tekhnologii Planetarnogo Glubinnogo Shlifovaniya Ploskikh Poverkhnostey Detaley Aviatsionnykh Dvigatelye* [Investigation of the

- Technology of Planetary Deep Grinding of Plane Surfaces of Aircraft Engine Parts] (Thesis of Dissert. ... for Cand. Techn. Sci.) (Kharkiv: M. E. Zhukovskiy National Aerospace University 'Kharkiv Aviation Institute': 2011) (in Russian).
4. N. V. Surdu, *Povyshenie Effektivnosti Shlifovaniya Trudnoobrabatyvaemykh Materialov za Shchet Uovershenstvovaniya Kinematiki Protsesov* [Enhancement of Grinding Efficiency of Tough-to-Machine Materials by Improving the Kinematics of Processes] (Thesis of Dissert. ... for Cand. Techn. Sci.) (Kharkiv: A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems, N.A.S. of Ukraine: 2005) (in Russian).
  5. D. N. Garkunov, *Tribotekhnika (Iznos i Bezyznosnost')* [Tribological Engineering (Wear and Wearlessness)] (Moscow: MSKhA: 2001) (in Russian).
  6. D. H. Herring, *Wire Forming Technology International*, **13**, No. 4: 24 (2010).
  7. A. Barnoush, *Hydrogen Embrittlement, Revisited by in situ Electrochemical Nanoindentation* (Thesis of Dissert. ... for PhD) (Saarbrücken: Saarland University: 2007).
  8. S. Brahim, *Fundamentals of Hydrogen Embrittlement in Steel Fasteners* (Montreal: IBECA Technologies Corp.: 2014).
  9. G. I. Suranov, *Vodorod: Razrushenie, Iznashivanie, Smazka Detaley Mashin* [Hydrogen: Destruction, Wear, Lubrication of Machine Parts] (Ukhta: UGTU: 2015) (in Russian).
  10. V. N. Latyshev, *Povyshenie Effektivnosti SOZh* [Enhancement of Efficiency of LCL] (Moscow: Mashinostroenie: 1975) (in Russian).
  11. L. V. Shashkova, *Fraktal'no-Sinergeticheskie Aspekty Lokal'noy Mikropovrezhdaemosti i Razrusheniya Diffuzionno-Aktivirovannoy Vodorodom Stali* [Fractal-Synergetic Aspects of Local Microdamaging and Destruction by Diffusion-Activated Hydrogen] (Thesis of Dissert. ... for Dr. Phys.-Math. Sci.) (Moscow: OGU: 2014) (in Russian).
  12. G. V. Karpenko and R. I. Kripyakevich, *Vliyanie Vodoroda na Strukturu i Svoystva Stali* [The Influence of Hydrogen on the Structure and Properties of Steel] (Moscow: Metallurgizdat: 1962) (in Russian).
  13. P. V. Gel'd, R. A. Ryabov, and E. S. Kodes, *Vodorod i Nesovershenstva Struktury Metalla* [Hydrogen and Imperfections of Metal Structure] (Moscow: Metallurgiya: 1979) (in Russian).
  14. B. A. Kolachev, *Vodorodnaya Khrupkost' Metallov* [Hydrogen Brittleness of Metals] (Moscow: Metallurgiya: 1985) (in Russian).
  15. E. G. Maksimov and O. A. Pankratov, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **116**, Iss. 7: 385 (1975) (in Russian).
  16. V. A. Somenkov and S. Sh. Shil'shteyn, *Fazovye Prevrashcheniya Vodoroda v Metallakh (Obzor)* [Phase Transformations of Hydrogen in Metals (Review)] (Moscow: I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy: 1978) (in Russian).
  17. P. V. Gel'd and R. A. Ryabov, *Vodorod v Metallakh i Splavakh* [Hydrogen in Metals and Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1974) (in Russian).
  18. Yu. A. Khrustalev, *Effekt Bezyznosnosti i Tribotekhnologii*, No. 2: 19 (1997) (in Russian).
  19. J. P. Hirth and J. Lothe, *Teoriya Dislokatsiy* [Theory of Dislocations] (Moscow: Atomizdat: 1972) (in Russian).
  20. P. I. Polukhin, S. S. Gorelik, and V. K. Vorontsov, *Fizicheskie Osnovy Plasticheskoy Deformatsii* [Physical Fundamentals of Plastic Deformation]

- (Moscow: Metallurgiya: 1982) (in Russian).
21. E. D. Shchukin, A. V. Pertsov, and E. A. Amelina, *Kolloidnaya Khimiya* [Colloid Chemistry] (Moscow: Vysshaya Shkola: 2004) (in Russian).
  22. G. A. Malygin, *Fizika Tverdogo Tela*, **43**, Iss. 5: 822 (2001) (in Russian).
  23. G. A. Malygin, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **169**, Iss. 9: 979 (1999) (in Russian).
  24. R. B. Morgunov, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **174**, Iss. 2: 131 (2004) (in Russian).
  25. P. Yu. Butyagin, *Uspekhi Khimii*, Iss. 11: 1769 (1984) (in Russian).
  26. N. V. Surdu, *Voprosy Proektirovaniya i Proizvodstva Letatel'nykh Apparatov*, Iss. 24 (1): 139 (2001) (in Russian).
  27. V. N. Chebotin, *Fizicheskaya Khimiya Tverdogo Tela* [Physical Chemistry of Solid State] (Moscow: Khimiya: 1982) (in Russian).
  28. F. Ya. Yakubov, *Energeticheskie Sootnosheniya Protsessa Mekhanicheskoy Obrabotki Materialov* [Energy Relationships of the Process of Mechanical Processing of Materials] (Tashkent: Fan: 1985) (in Russian).
  29. V. K. Starkov, *Fizika i Optimizatsiya Rezaniya Materialov* [Physics and Optimization of Material Cutting] (Moscow: Mashinostroenie: 2009) (in Russian).
  30. Yu. N. Alekseev, *Vvedenie v Teoriyu Obrabotki Metallov Davleniem, Prokathoy i Rezaniem* [Introduction to the Theory of Metal Working with Pressure, Rolling and Cutting] (Kharkiv: Izdatel'stvo KhGU: 1969) (in Russian).
  31. GOST 25.503–97. *Raschety i Ispytaniya na Prochnost'. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Metod Ispytaniya na Szhatie* [Calculations and Strength Tests. Methods of Mechanical Testing of Metals. Compression Test Method] (Minsk: Mezhgosudarstvennyy Sovet po Standartizatsii, Metrologii i Sertifikatsii: 1997) (in Russian).
  32. A. I. Dolmatov, A. A. Kabatov, and M. A. Kurin, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 3 (100): 12 (2013) (in Russian).
  33. P. P. Salem, *Teoriya Dvoynogo Sloya* [The Theory of Double Layer] (Moscow: Fizmatlit: 2003) (in Russian).
  34. I. M. Zharskiy, N. L. Smolyag, and A. A. Chernik, *Kinetika Elektroliticheskogo Vydeleniya Vodoroda* [Kinetics of Electrolytic Release of Hydrogen] (Belarusian State Technological University: 2016) (in Russian).
  35. R. Yukhnevich, E. Valashkovskiy, and G. Stankevich, *Tekhnika Bor'by s Korroziy* [The Technique of Corrosion Control] (Leningrad: Khimiya: 1978) (in Russian).
  36. A. M. Kuznetsov, *Sorosovskiy Obrazovatel'nyy Zhurnal*, **6**, No. 5: 45 (2000) (in Russian).
  37. Yu. P. Cherdantsev, I. P. Chernov, and Yu. I. Tyurin, *Metody Issledovaniya Sistem Metall-Vodorod* [Methods for Studying Metal-Hydrogen Systems] (Tomsk: Izd. TPU: 2008) (in Russian).
  38. L. P. Avakyants, *Elektrony v Metalle* [Electrons in Metal] (M. V. Lomonosov Moscow State University: 2010) (in Russian).
  39. V. V. Fitsak, *Statistika Kvantovykh Chastits. Elektrony v Metalle* [Statistics of Quantum Particles. Electrons in Metal] (St. Petersburg Mining University: 2014) (in Russian).
  40. V. N. Glazkov, *Svoystva Elektronnogo Fermi-Gaza* [Properties of Electronic Fermi Gas] (Moscow: MFTI: 2016) (in Russian).
  41. L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Teoreticheskaya Fizika. Statisticheskaya*

- Fizika* [Theoretical Physics. Statistical Physics] (Moscow: Nauka: 1976) (in Russian).
42. A. D. Andreyanov and V. P. Petrosyan, *Visnyk Odes'kogo Natsional'nogo Universytetu. Khimiya*, **15**, No. 12: 54 (2010) (in Russian).
  43. A. D. Andreyanov, I. A. Kuznetsova, and L. I. Korolenko, *Visnyk Odes'kogo Natsional'nogo Universytetu. Khimiya*, **14**, No. 11: 45 (2009) (in Russian).
  44. F. K. Tkachenko, K. I. Tkachenko, and V. G. Gavrilova, *Visnyk Pryazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universytetu. Tekhnichni Nauky*, Iss. 2: 102 (2010) (in Russian).
  45. L. S. Sterman and V. N. Pokrovskiy, *Fizicheskie i Khimicheskie Metody Obrabotki Vody na TES* [Physical and Chemical Methods of Water Treatment at TPS] (Moscow: Energoatomizdat: 1991) (in Russian).
  46. E. N. Bushuev, *Vestnik IGEU*, Iss. 2: 1 (2007) (in Russian).
  47. O. S. Erkovich and A. V. Kurochkin, *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Estestvennye Nauki*, No. 1: 18: (2012) (in Russian).