

П.П. Мельничук, д.т.н., проф.

В.Ю. Лосєв, к.т.н., доц.

Є.В. Салогуб, пров. інж.

Житомирський державний технологічний університет

**ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ
ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ЇЇ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ**

Стаття присвячена удосконаленню процесів механічної обробки деталей використанням енергії поверхневого шару у релаксаційний період.

Вступ. Однією з найважливіших проблем сучасного машинобудування є підвищення якості продукції, її надійності і довговічності без значних збільшень трудомісткості та собівартості. Ефективним вирішенням цієї проблеми, як наполягає д.т.н., проф. Ящерицин П.І., має стати управління технологічними процесами виготовлення деталей машин і механізмів. Саме свідоме формування необхідних властивостей поверхневого шару деталей забезпечує їх високі експлуатаційні характеристики. Всі операції та їх технологічні переходи з виготовлення деталей і машин в цілому, а також стадії експлуатації слід розглядати у взаємозв'язку, тому що властивості оброблених поверхонь деталей, а також характеристики складених з них машин і механізмів формуються протягом всього комплексу технологічного впливу і змінюються в процесі експлуатації. Утворення поверхневого шару деталей пов'язане з високоінтенсивною обробкою, що призводить до поглинання значної кількості енергії за короткий час. В поверхневому шарі акумулюється надлишок енергії і нерівноважні структури. Нестійкі структури, які володіють високою енергією, мимоволі прагнуть до стану з меншою вільною енергією, яка забезпечує підвищення міцності, зносостійкості та інших експлуатаційних характеристик поверхневого шару. В ньому відбуваються незворотні процеси спадковості та самоорганізації, які шляхом сумісних дій, внесених і трансформованих потоків енергії та речовин, утворюють комплексні структури. Інженерія поверхневого шару деталей зі створенням необхідних в експлуатації структур передбачає управління процесами поглинання енергії та речовин при пошаровому проходженні високоінтенсивних впливів.

В роботі [6] наведена загальна картина побудови поверхневого шару металу у вигляді зон після завершення всіх короткотривалих релаксаційних процесів.

Зона 1 представляє собою плівку товщиною $1...10^2$ Нм з адсорбованих з навколишнього середовища молекул і атомів органічних та неорганічних речовин.

Зона 2 товщиною $10^{-3}...1$ мкм з продуктів хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем (як правило, оксидів).

Зона 3 – гранична, товщиною у декілька міжатомних відстаней. Метал в цій зоні має іншу, ніж у всьому об'ємі, кристалічну і електронну структури.

Зона 4 товщиною 0,01...0,1 мм зі зміненою структурою, фазовим і хімічним складом, яка виникає в процесі виготовлення та експлуатації деталі.

В той же час поверхневому шару притаманні залишкові напруження, пов'язані з умовами (технологією) виготовлення деталей.

Вони, як правило, класифікуються за протяжністю силового поля:

– **напруження I роду** – макронапруження, які охоплюють області сумірні з розмірами деталі і мають певну орієнтацію, пов'язану з її формою;

– **напруження II роду** – мікронапруження, які розповсюджуються на окремі зерна металу або групу зерен;

– **напруження III роду** – субмікроскопічні, які відносяться до спотворення атомної ґратки кристала з орієнтацією, пов'язаною з її структурою.

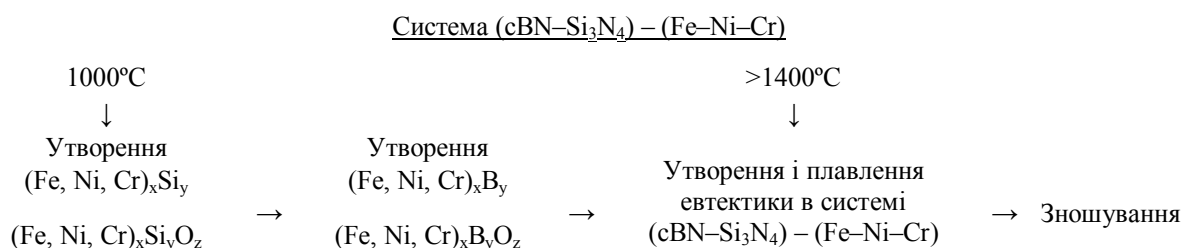
До останнього часу пошук шляхів підвищення якості поверхневого шару з метою покращення експлуатаційних властивостей, як правило, обмежується дослідженням методів і умов здійснення фінішної операції обробки поверхні. Як стверджується в роботі [1], особливо яскраво спадковість проявляється в разі застосування комбінованих методів обробки, коли технологічні фактори послідовно, один за одним або сумісно, паралельно впливають на оброблювану деталь. Однакова точність і шорсткість поверхонь деталей не можуть характеризувати фізичний стан поверхневого шару матеріалу. Вони можуть мати різний ступінь наклепу, різного знаку залишкові напруження, по-різному спотворені кристалічні ґратки і порушену цілісність поверхні за рахунок мікротріщин, задирав, розпушувачів тощо. Різноманітними можуть бути і хімічний склад та структура поверхневого шару металу. Однією з найважливіших характеристик експлуатаційних властивостей оброблених поверхонь є поверхнева енергія. Фізика твердого тіла передбачає ряд особливостей свого внутрішнього устрою порівняно з

поверхнею. Будь-який атом, розташований усередині тіла з ідеальною кристалічною ґраткою, знаходиться у стані рухомої стійкої рівноваги, тому що для нього в усіх напрямках інтенсивність силового поля однакова. Зовсім в іншому становищі знаходяться атоми, які розташовані на поверхні. Вони мають лише односторонню дію з боку твердого тіла і тому володіють надлишковою енергією. Саме тому поверхня має підвищену хімічну активність, що призводить до адсорбції атомів з навколишнього середовища.

Викладення основного матеріалу. Відомо, що інструмент з надтвердих матеріалів (НТМ) в основному застосовується при обробці залізобуглецевих, твердих і титанових сплавів, а також оксидних матеріалів, які відрізняються фізико-хімічними властивостями і хімічним складом.

Одним із сучасних напрямків підвищення працездатності інструментів, оснащених ПНТМ на основі кубічного BN, який очолює д.т.н., проф. Клименко С.А., є управління хімічною взаємодією інструментального матеріалу з оброблюваним і елементами навколишнього середовища в зоні різання, що реалізується зміною хімічного складу інструментального матеріалу в усьому об'ємі полікристала, нанесенням на поверхні різального елемента шару захисного покриття або зміною складу і структури (модифікуванням) тонкого поверхневого шару ПНТМ [7]. В роботі відмічається, що в зоні різання на контактних ділянках утворюється з'єднання типу Me_xB_y , $Me_xB_yO_z$, які формують на їх основі і контактному плавленню евтектики типу $Me \cdot Me_x \cdot B_y$, $Me \cdot Me_x \cdot B_yO_z$ з наступним видаленням рідкої фази з зон контакту. Автори роботи [7] раніше довели можливість управління інтенсивністю взаємодії інструментального на основі кубічного BN і оброблюваного на основі Fe і Ni матеріалів за рахунок введення в зону різання азоту. Це сприяє утворенню боридів Fe і Ni з виділенням вільного азоту у більш високотемпературну область. Крім того, наявність азоту в зоні різання знижує інтенсивність окислювання інструментального матеріалу. Подальше підвищення працездатності різального інструмента з ПНТМ на основі кубічного BN автори передбачають за рахунок введення в склад композиту складових, які без зміни механічних властивостей матеріалу під дією термобаричних умов процесу обробки забезпечують формування в зоні різання підвищеного парціального тиску азоту. Як добавку запропоновано нітрид кремнію Si_3N_4 .

При обробці загартованих сталей і нікелевого сплаву ВЖЛ найкращих результатів одержують за рахунок цієї добавки в кількості 2–4 % [7]. Процеси відбуваються за схемою:



Наведена система і проведені дослідження стосуються тільки підвищення працездатності інструмента, не розглядаючи питання стану поверхневого шару обробленої поверхні, що є головною метою обробки в машинобудуванні. Якщо підвищення працездатності інструмента не погіршує фізико-хімічні і механічні характеристики обробленої поверхні, то воно має право на впровадження. Саме такий підхід до вирішення проблеми вважається позитивним. Розгляд процесів, що відбуваються в зоні різання, дослідження активності поверхні, свідоме втручання у формування якісних показників поверхневого шару в найбільш сприятливий момент його формування – ось напрямок, який, на нашу думку, може стати перспективним.

Тепер, після того, як достатньо повно досліджені процеси, що відбуваються в інструментальному матеріалі, буде корисним розглянути питання стосовно хімічних і структурних перетворень, що відбуваються в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу при обробці інструментом з ПНТМ на базі кубічного BN.

В першу чергу розглянемо взаємодію інструмента з залізобуглецевими сплавами, з переважної більшості яких виготовляються деталі машин і механізмів.

Як стверджується в роботі [2], найбільш ймовірними реакціями, які можуть відбуватися між зернами НТМ і залізобуглецевими сплавами, є:



Високий тиск в результаті взаємодії між вуглецем і межами групи заліза (Fe, Co, Ni) призводить до утворення, як правило, карбідів.

Реакція взаємодії нітриду бору з залізом можна записати у вигляді:



Для оцінки можливості здійснення реакцій (1) і (2) необхідно використати, як і для інших реакцій, метод хімічної термодинаміки.

Головним рівнянням термодинаміки, яке пов'язує вільну, загальну і зв'язану енергію, є вираз:

$$\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - \Delta S_{298}^0 T, \tag{3}$$

де значення ΔG_{298}^0 – зміна вільної енергії Гіббса;

ΔH_{298}^0 – зміна ентальпії;

ΔS_{298}^0 – зміна ентропії

беруть для чистих компонентів при нормальному атмосферному тиску (стандартні умови).

Якщо $\Delta G_{298}^0 < 0$ – реакція можлива, то $\Delta G_{298}^0 > 0$ – реакція неможлива.

Але нас цікавить можливість здійснення реакції не при 298 °К, а при температурах, які виникають в зоні різання в процесі обробки того чи іншого матеріалу інструментом з НТМ.

Залежність ΔH_T^0 і ΔS_T^0 від температури визначається наступними співвідношеннями:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT; \quad \Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT. \tag{4}$$

Зміну вільної енергії Гіббса (ΔG_T^0) реакцій (1) і (2) можливо знайти, якщо відомі термодинамічні функції вихідних реагентів і кінцевих продуктів реакцій, що розглядаються. За винятком бориду заліза, значення ΔS_{298}^0 , ΔH_{298}^0 і $\Delta C_p = f(T)$ для вказаних елементів і з'єднань протабульовані в різних хімічних і термодинамічних довідниках.

Для наближеного розрахунку ΔG_{298}^0 дибориду заліза скористаємося відомими значеннями ΔG_{298}^0 диборидів тугоплавких металів (TiB₂, ZrB₂, HfB₂, NbB₂) і оксидів цих самих елементів (TiO₂, ZrO₂, HfO₂, Nb₂O₅). Якщо зміну вільної енергії Гіббса при утворенні оксиду перерахувати на гама-еквіваленти, то між ΔG_{MeO}^0 і $\Delta G_{MeB_2}^0$ буде мати місце прямо пропорційна залежність (рис. 1), відповідно при 300, 800 і 1300 °К, яка виражається наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \Delta G_{MeB_2}^0 &= -1,95\Delta G_{MeO}^0 + 40; \\ \Delta G_{MeB_2}^0 &= -1,95\Delta G_{MeO}^0 + 30; \\ \Delta G_{MeB_2}^0 &= -1,95\Delta G_{MeO}^0 + 20. \end{aligned} \tag{5}$$

Підставляючи в отримані рівняння ΔG_{MeO}^0 для оксиду заліза, знаходимо шукане значення $\Delta G_{MeB_2}^0$ для бориду заліза.

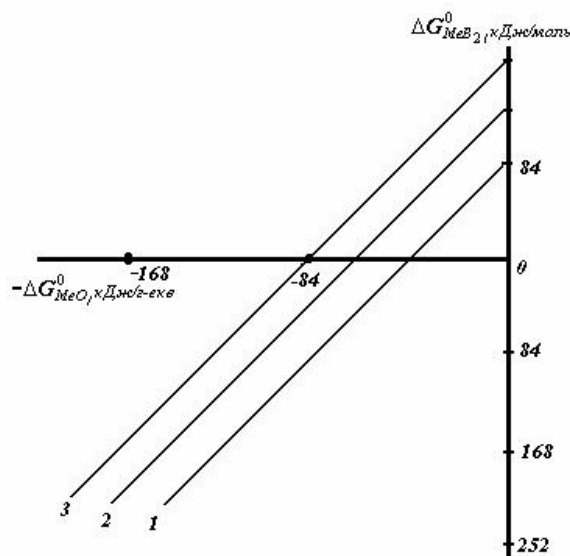


Рис. 1. Залежність ΔG_{MeO}^0 від $\Delta G_{MeB_2}^0$ при температурах 300 (1), 800 (2) і 1300 (3) °К

З врахуванням зміни термодинамічних функцій в залежності від температури формула для розрахунку ΔG_T^0 буде мати вигляд:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT. \quad (6)$$

Використовуючи прискорений метод Тьомкіна – Шварцмана, розрахуємо ΔG_T^0 для реакцій (1) і (2).

З рис. 2 випливає, що якщо температура в зоні різання вище 700 °С, то можлива взаємодія заліза з вуглецем, тобто буде спостерігатись інтенсивний знос алмазного зерна.

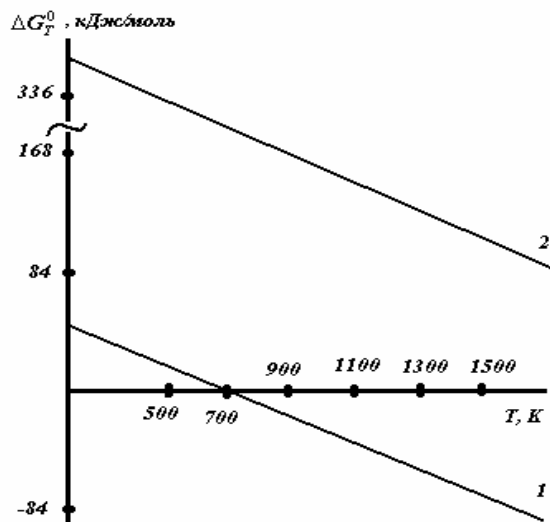


Рис. 2. Залежність ΔG_T^0 реакцій

$\text{Fe} + \text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ (1) і $\text{BN} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeB}_2 + \text{Fe}_2\text{N}$ (2) від температури

З рис. 2 також видно, що ΔG_T^0 реакції (2) більша нуля, тобто реакція між залізом і нітридом бору неможлива в усьому діапазоні досліджуваних температур.

Знаючи хімічний склад того чи іншого матеріалу, можна розрахувати для нього ΔG_T^0 реакцій з різальними зернами і оцінити його оброблюваність при використанні інструмента з НТМ.

Від'ємна величина ΔG_T^0 не означає, що при обробці неможливо використовувати НТМ. В цьому випадку слід зосередити зусилля на зниженні температури в зоні різання. Знизити контактну температуру можливо введенням в робочий шар інструмента речовин, які, розкладаючись в зоні різання, поглинають тепло і, додаючи у зв'язку корозійно-активних речовин, які інтенсивно діють на оброблюваний матеріал, сприяють його диспергуванню.

Дослідження процесів зношування деталей машин і механізмів багатьма вченими [3, 4, ...] із застосуванням структурно-енергетичного підходу показали, що є можливість досягти оптимального спрацювання поверхонь тертя узгодженням активування і пасивації поверхневих шарів матеріалу та створення вторинних структур з певним мікрорельєфом і фізико-механічними властивостями. Наявність в поверхневому шарі легуючих елементів призводить при терті до його трансформації з утворенням вторинних структур, що запобігають інтенсивному зношуванню основного матеріалу. Вже в перші хвилини роботи в парах тертя відбувається процес припрацювання, тобто явище структурного пристосування матеріалів.

Всі взаємодії локалізуються у тонкоплівковому об'єкті – вторинних структур, новій метастабільній фазі, утвореній в результаті структурно-термічного активування поверхонь, їх адсорбційно-хімічної взаємодії з середовищем і пасивації.

Розрізняють [2, 3] два основних типи вторинних структур:

– **ВС₁** – вторинні структури першого типу, що представляють собою тонкоплівковий об'єкт, який є пересиченим твердим розчином кисню або інших активних елементів середовища в металі і має бездислокаційну структуру і орієнтовану будову.

– **ВС₂** – вторинні структури другого типу, що є хімічними сполуками металу з активними елементами середовища (зокрема з киснем).

Вторинні структури мають поверхневу локалізацію, ультрадискретну будову, здатність мінімізувати руйнування поверхневого шару та екранувати фізико-хімічні перетворення і руйнування нижніх шарів металу.

В роботі [5] стверджується, що ефективність керування пасивацією базується на створенні вторинних структур з високою міцністю і пластичністю, при відсутності різкого переходу від структури

трансформування плівки до основного матеріалу, що можливо здійснити як шляхом зміни складу і властивостей матеріалів пар тертя, так і складу і властивостей робочих середовищ.

Саме вибіркова дифузія легуючих елементів у активовані поверхневі шари металу змінює тип і властивості вторинних структур, суттєво зменшуючи спрацювання сталей.

Відомо, що легуючими елементами, що розширюють γ -область твердих розчинів, є Ni, Cu, Sn, а елементами, що звужують γ -область, є Ti, V, Cr, Mo. За здатністю утворювати карбіди легуючі елементи поділяють на карбідоутворюючі і некарбідоутворюючі. До перших відносяться Mn, Cr, Mo, V, Ti, а до других – Ni, Cu, Sn. Mn і Cr створюють складні карбіди, а Mo, V і Ti – спеціальні.

Легування Mn, Cr, Mo, V значно підвищує міцність і стійкість сталі проти спрацювання. Представляють інтерес наведені в роботі [5] результати експериментів.

Таблиця 1

*Вплив складу легуючих елементів на характеристики
поверхонь тертя відновлених деталей*

Легуючий елемент	Механічні характеристики поверхонь тертя					Мікроструктура поверхонь тертя			
	вміст по масі, %	мікротвердість, МПа	пластичність, %	пружність, %	повзучість, %	тертя без змащення		тертя змащення	
						BC ₁ , %	BC ₂ , %	BC ₁ , %	BC ₂ , %
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
Нікель	1,97	1920	66	34	6,9	20	80	20	80
	3,95	1990	69	31	7,2	35	65	40	60
	7,99	2210	65	35	6,6	60	40	90	10
Мідь	0,57	1720	62	38	6,0	70	30	80	20
	0,95	1820	60	40	3,0	80	30	80	20
Марганець	1,44	2250	53	47	6,4	20	80	10	90
	2,92	2330	50	50	6,0	–	100	100	100
	4,68	2480	52	48	6,2	–	100	–	100

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Хром	0,88	1960	56	44	7,1	40	60	20	80
	2,45	2010	54	46	7,2	20	80	5	95
	5,96	2160	50	50	7,0	–	100	–	100
Молібден	1,07	1980	63	37	7,0	60	40	30	70
	2,88	2060	61	39	7,0	20	80	20	80
	5,05	2190	55	45	6,0	5	95	5	95
Ванадій	2,83	1720	60	40	6,3	20	80	20	80
	4,90	1830	55	45	6,0	10	90	5	95
Титан	2,65	2730	65	35	5,1	80	20	5	95
	4,51	2900	68	32	4,7	90	10	10	90
Вуглецева сталь		1780	68	32	7,9	20	80	30	70

Як видно з табл. 1, легування марганцем має найбільший ефект. Далі йдуть Cr, Mo, V і Ti. Марганець значно збільшує кількість евтектики та його дисперсність, розчиняючись як в α -залізі, так і в цементиті. Діючи на процеси пасивації, він значно підвищує кількість вторинної структури другого типу. Вже при концентрації 1,44 % Mn BC₂ складає 80–90 %.

В той же час аналіз вивченого спектра процесів та інтенсивності зношування поверхонь тертя в різних умовах показав залежність від різних значень енергії структурного активування і наявність різноманітних варіантів пасивації і виключає однозначність оцінки впливу легуючих елементів на поверхневу міцність сталей. Лише залежності від конкретних умов і видів зношування можуть визначати параметри легування, тому що в різних умовах значення енергії трибоактивування і можливих варіантів пасивації виникають нормальні як механо-хімічні процеси, так і різні види пошкодження поверхонь.

З метою визначення оптимальних методів зміцнення поверхневих шарів металу деталей машин і механізмів розглянемо властивості цих поверхонь після їх механічної обробки.

1) Ця поверхня гетерогенна в атомному масштабі. Найпростішу модель дефектної поверхні монокристалу зображено на рис. 3. Для неї характерні неупорядковані розподілені тераси, сходинки, петлі, адсорбовані та мігруючі атоми тощо.

Дефекти атомної структури поверхні є хімічно-активними центрами, тобто місцями переважної адсорбції атомів і молекул з газового середовища, а також атомів, які дифундують з об'єму матеріалу [11]. Ймовірність адсорбції на поверхні експоненціально збільшується в разі зростання щільності активних центрів, наприклад, сходинок, і може змінюватись в межах трьох і більше порядків. Вздовж поверхні атоми можуть переміщуватись відносно вільно, в результаті чого можливе часткове розупорядкування структури адсорбованого шару.

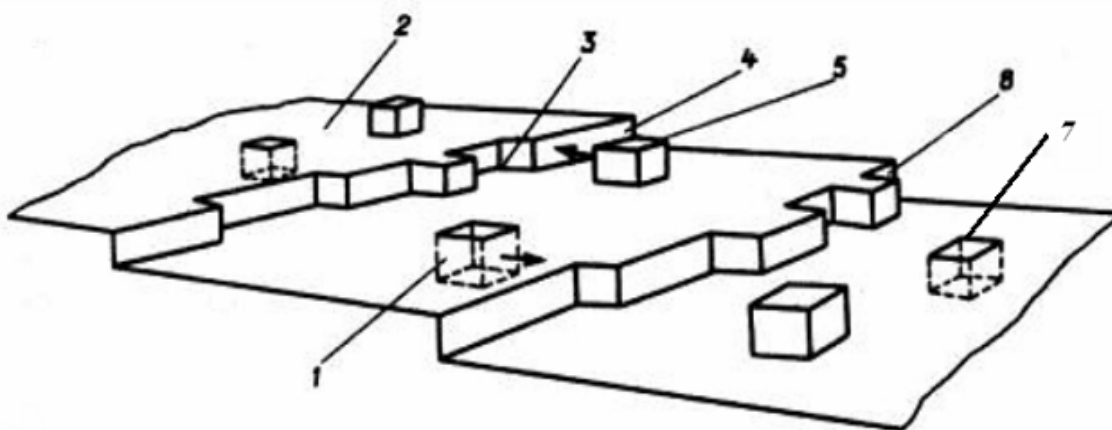


Рис. 3. Гетерогенна природа поверхні кристалу:
 1 – мігруюча вакансія на терасі; 2 – тераса; 3 – петля; 4 – сходинка;
 5 – адатом; 6 – адатом біля сходинки; 7 – вакансія

Джерелом поверхневих дефектів інших типів можуть бути недосконалість кристалічної ґратки об'єму монокристалу. Для металевих кристалів найбільш типовими мікроскопічними недосконалістями в об'ємі є дислокації і дефекти упакування.

Крім того, в момент утворення ювенільної поверхні спостерігається емісія електронів, енергія яких іноді досягає великих значень ($10^3 \dots 10^4$ eV). Це явище пояснюється зміною розподілення електронів на поверхні та існуванням у мікротріщинах високих градієнтів потенціалу.

У зв'язку з тим, що механічна або термічна обробка поверхні визначає відносну концентрацію кожного з наведених вище положень атомів, властивості поверхні повністю залежать від деталей методики її обробки.

2) Частіше всього моношар адсорбату покриває гетерогенну поверхню (рис. 4).

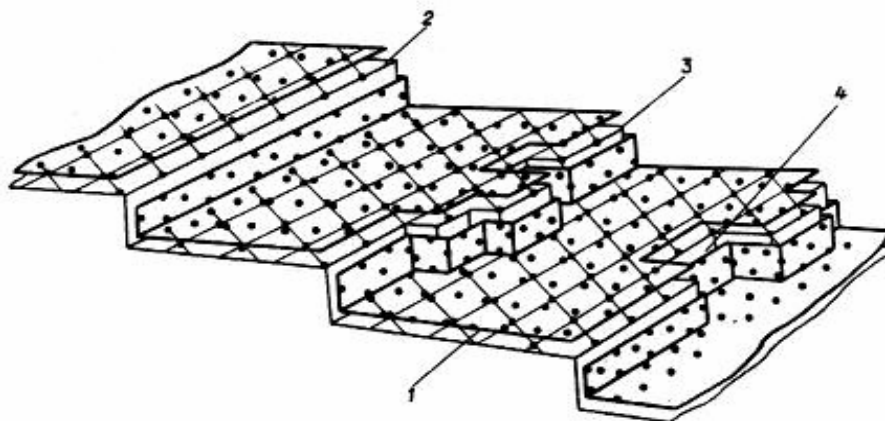


Рис. 4. Адсорбція моношару на гетерогенній поверхні:
1 – впорядкований або невпорядкований шар, що покриває;
2 – тераса; 3 – сходинка; 4 – петля

Особливі хімічні і механічні властивості поверхні визначаються блокуванням описаних вище положень атомів та зміною окисного стану атомів поверхні. Маніпуляція адсорбційним шаром шляхом осадження хімічно-активних речовин дозволяє керувати такими важливими властивостями, як каталітичні, чи корозійні.

Згідно з теорією дислокацій всі процеси, що відбуваються в металах і сплавах, а також їх властивості, нерозривно пов'язані з характером і щільністю дефектів кристалічної ґратки, які, в свою чергу, викликані порушенням у періодичності розташування атомів у просторі. Дефекти в залежності від подовженості можуть бути точковими (вакансії, домішкові атоми), лінійними (дислокації) і просторовими (границі зерен, двійників, зерен).

Фізичні, механічні та хімічні властивості поверхні кристалічного тіла визначаються ступенем її гетерогенності. Ступінь гетерогенності, в свою чергу, визначається густиною дефектів поверхні (вакансій, петель, адатомів, сходинок та інш.). Так, розібратися із впливом дефектів кристалічної ґратки на міцність як поверхні, так і твердого тіла в цілому дозволяє дислокаційна теорія пластичної деформації.

На поверхні кристала дислокаціями є петлі та сходинки. Адатоми та вакансії є нульмірними дефектами кристалічної ґратки. Деякі з адатомів є дефектами Френкеля або солітонами Френкеля–Конторової [20]. В цій теорії процес ковзання атомних шарів кристала при пластичній деформації (одним з видів якої є різання металів) проходить не по всій площині перерізу кристала, а починається на дислокаціях. Уже при невеликих напруженнях дислокації починають зміщуватись (ковзати) і виходять на поверхню кристала, якщо не зустрічають перешкод на своєму шляху. Швидкість переміщення дислокацій можна розрахувати за формулою [21]:

$$V_d = C_3 \left[(\tau - \tau_i) / \tau_0 \right]^m, \quad (7)$$

де τ_i – напруження опору ґратки переміщенню дислокацій;

τ_0 – постійне напруження, при якому $V_d = 1 \text{ см/с}$;

m – коефіцієнт, який залежить від природи металу;

C_3 – швидкість розповсюдження звуку в металі.

Величина коефіцієнта m залежить від типу кристалічної ґратки і характеру міжатомних зв'язків у кристалі. У найбільш пластичних ГЦК (гранецентрована кубічна ґратка) металів значення m максимальні (у міді ≈ 200), а у ОЦК (об'ємноцентрована кубічна ґратка) металів вони, по крайній мірі, на порядок менші. Вихід крайової дислокації на поверхню кристала еквівалентний зсуву частини кристала на величину, рівну періоду решітки. Якби в кристалі було б дуже мало дислокацій, то в цьому випадку його початкова міцність була б у багато разів менша його ідеальної міцності. Після виходу всіх дислокацій на поверхню він би позбавився дислокацій і став ідеально міцним. В реальних кристалах така

ситуація не спостерігається, тому що густина дислокацій та інших дефектів в них досить значна. Густиною дислокацій називають число дислокацій, які перетинають одиничну, перпендикулярну до них поверхню [11, 22]. Наприклад, в найбільш досконалих кристалах германію та кремнію вона дорівнює $(10^2 \dots 10^3) \text{ см}^{-2}$. Таким чином, ймовірність вільного виходу дислокацій на поверхню кристала досить мала. Суттєву роль відіграє фактор розмноження дислокацій на перешкодах, який призводить до подальшого зниження міцності. Проте зменшення міцності кристала при збільшенні концентрації дефектів відбувається лише до певної межі. Дефекти ґратки заважають руху дислокацій, а це вже є зміцнюючим фактором. На практиці у створенні найбільш міцних матеріалів металознавці йдуть не шляхом створення бездефектних кристалів, а шляхом створення однорідних матеріалів з оптимальною густиною дислокацій та інших дефектів. Це досягається комбінацією таких технологічних операцій, як легування (введення невеликої кількості домішок, які сильно взаємодіють з дислокаціями і заважають їх рухові), ґартування (створюється дрібнозерниста структура, межі зерен досить важко долаються дислокаціями), наклеп (прокатка, волочіння, розтяг, які викликають підвищення кількості дислокацій при деформації, дислокації фактично переплітаються, їх рух ускладнюється, міцність металу зростає).

Найбільше зміцнення металу відбувається при густині дислокацій $\approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Подальше підвищення густини дислокацій викликає різке зменшення міцності металу. Це можна пояснити як втрату стійкості ґратки через внесення в неї великої кількості енергії, пов'язаної з дислокаціями.

Енергію гвинтової дислокації виражають інтегруванням густини енергії пружної деформації [11, 22]. Повну енергію гвинтової дислокації на одиницю довжини знаходять інтегруванням від радіуса ядра r_0 до відстані до осі дислокації R , максимальне значення якої дорівнює радіусу кристала.

$$W_{\text{вг}} = \int_{r_0}^R \frac{Gb^2}{4\pi r} dr = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (8)$$

де G – модуль зсуву;

b – вектор Бюргерса (він задає напрямок та відстань, на яку зсувається одна частина кристала по відношенню до іншої при виході дислокації з кристала (рис. 5).

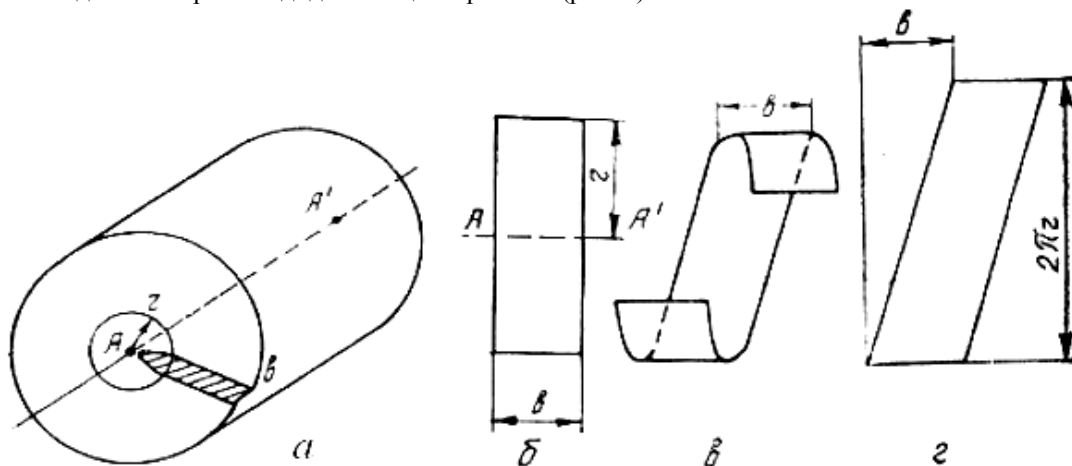


Рис. 5. Гвинтова дислокація AA' (а) та тонкостінний циліндр радіуса r з віссю AA' (б, в, з)

При такому підрахунку не враховується енергія ядра дислокації. Таке наближення виправдане, тому що енергія в ядрі дислокації складає (5–10) % від загальної енергії.

Наведемо приклад розрахунку енергії гвинтової дислокації. Задасмо такими параметрами: $R = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $r_0 = 6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $G = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. Підставимо ці значення у формулу (2), отримаємо значення енергії для гвинтової дислокації: $W_{\text{вг}} = 6,2 \cdot 10^{-9} \text{ Дж/м}$. Такою енергією володіє ділянка довжиною в 1м, що проходить по осі зразка радіусом $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Енергію крайової дислокації підраховують аналогічним чином. Лише у цьому випадку поле навколо дислокації не має простої симетрії, тому що з одного боку від площини ковзання матеріал стиснутий, з іншого – розтягнутий. З урахуванням цього енергія крайової дислокації:

$$W_{\text{кр}} = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (9)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Для більшості металів коефіцієнт Пуассона $\approx 0,3$. Тоді енергія крайової дислокації більша за енергію гвинтової в 1,5 раза.

З формул (8), (9) видно, що як для гвинтової, так і для крайової дислокацій енергія пропорційна квадрату вектора Бюргерса b . Таким чином, вектор Бюргерса характеризує енергетичну здатність дислокації.

Енергію дислокацій в одиниці об'єму наближено можна обчислити за формулою:

$$U_o = Gb^2 \rho. \quad (10)$$

В реальних кристалах густина дислокацій змінюється в діапазоні $\rho = (10^6 \dots 10^{12}) \text{ см}^{-2}$. Цьому буде відповідати енергія $U_o \approx (20 \dots 2 \cdot 10^7) \text{ Дж/м}^3$.

Вихід дислокацій на поверхню кристалічного тіла призводить до того, що поверхня має додаткову поверхневу енергію і, як наслідок, стає більш активною до фізичних та хімічних впливів.

Конкретними фізичними характеристиками міцності є межа міцності на розтяг σ_m , межа міцності на стиск σ_{cm} , межа міцності на зсув τ_{zc} тощо. У багатьох випадках поліпшення одного з цих показників призводить до погіршення інших (рис. 6). Тому поняття міцності слід розглядати у тісному взаємозв'язку з умовами технологічної експлуатації.

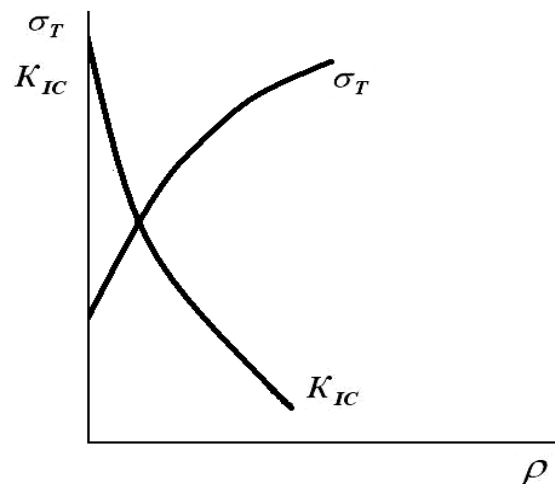


Рис. 6. Дислокаційне зміцнення

На рис. 6 ρ – густина дислокацій; σ_m – границя текучості; K_{IC} – коефіцієнт, який характеризує здатність металу до крихкого руйнування.

Поверхневий шар деталі після лезової обробки пластично деформований. Тому його фізичний стан, в основному, характеризується деформаційними змінами, наслідком яких є його деформаційне зміцнення [3]. Таке зміцнення суттєво залежить від режимів різання, геометрії інструмента, його зносу, мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) та інших умов обробки.

Якщо зміцнення поверхневого шару деталі безпосередньо після лезової обробки недостатнє, то існують додаткові механізми зміцнення.

Особливу зацікавленість викликає сам процес утворення поверхневого шару в результаті механічного видалення припуску на обробку. Силова взаємодія інструмента з оброблюваним матеріалом викликає утворення стружки, що супроводжується практично миттєвим підвищенням температури, пружно-пластичними деформаціями матеріалу, руйнуванням його зерен і кристалічних ґраток з утворенням короткочасово існуючої ювенільної поверхні.

В роботі [6] акцентується увага на змінах хімічного складу поверхневого шару після обробки різанням, що пояснюється наступним:

- 1) адсорбцією і адсорбцією елементів різального інструмента при його контакті з оброблюваною поверхнею заготовки;
- 2) виникненням температурних градієнтів у поверхневому шарі;
- 3) розрізненням в коефіцієнтах розподілення і дифузії матричних елементів;
- 4) налипанням мікрочасток матеріалу на різальний інструмент і „розмазуванням” їх по поверхні деталі;
- 5) „мікрометалургійними” процесами, що відбуваються при „розмазуванні” мікрочасточек по оброблюваній поверхні при високих локальних температурах;
- 6) адсорбцією елементів, що входять до складу МОР.

Кожен з названих процесів характеризує значну активність утворюваного поверхневого шару металу і відбувається певний час, який називається часом релаксації (час, протягом якого збуджена система

повертається у рівноважний стан). Це стосується також пружних та непружних деформацій, викликаних силовою взаємодією інструмента і оброблюваного матеріалу.

При знятті зовнішнього навантаження пружна деформація також знімається практично миттєво, а непружна (зворотня) – зникає поступово.

Кінетика релаксаційного процесу описується часом релаксації τ , який визначає зміну непружної деформації ε_n з часом t [7]:

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon_n(t_1) \exp \frac{t-t_1}{\tau}, \tag{11}$$

де $\varepsilon_n(t_1)$ – деформація в момент зняття прикладеного напруження t_1 (рис. 7).

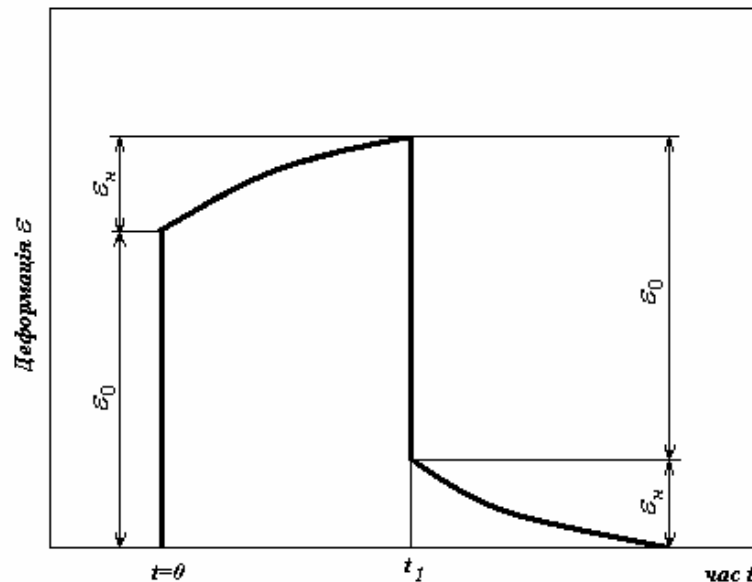


Рис. 7. Залежність деформації від часу при наявності напруженості

Розрізняють наступні релаксаційні процеси, які відбуваються у твердому тілі:

- релаксація Снука (перерозподіл атомів, що проникли в кристалічну ґратку під дією напруження);
- релаксація Зінера (дифузія під напруженням. У твердих розчинах заміщення, в яких розчинені атоми заміщують у вузлах кристалічних ґраток атоми-молекули-розчинника. Цей ефект викликається під дією напруження переорієнтацією не окремих атомів, а їх пар. Максимуми Зінера з’являються при більшій температурі, ніж максимуми Снука);
- зерногранична релаксація (викликана рухом під дією напруження границь зерен і розчинених атомів, які накопичуються на цих границях);
- дислокаційна релаксація (викликана рухом різних типів дислокацій – релаксація Бордоні, дислокація з різноманітними дефектами – релаксація Хасігуті, або з сегрегованими на дислокаціях розчиненими атомами – релаксація Снука–Кестера);
- фазоперетворення (зміна хімічного складу поверхневого шару викликає зміну його фазового складу. Цьому також сприяє пластична деформація, яка завжди супроводжує процес різання металу).

Час релаксації Снука визначається залежністю [7]:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{H}{RT}, \tag{12}$$

де $\tau_0 = \frac{a^2}{\beta D_0}$;

H – енергія активації дифузії (величина енергетичного бар’єру при переході проникнутого атома з одного міжвузілья в сусіднє вільне);

k – стала Больцмана ($k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$);

T – абсолютна температура;

a – період кристалічної ґратки;

β – коефіцієнт, який визначається шляхом дифузійних перескоків атомів в кристалічній ґратці;

D_0 – незалежний від температури передекспоненційний множник, що входить у формулу визначення коефіцієнта дифузії:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{H}{kT}\right).$$

Основні механізми зміцнення. Для того, щоб підвищити опір деформуванню і досягти зміцнення, необхідно зменшити рухливість дислокацій. Основні механізми гальмування дислокацій, які викликають зміцнення як поверхні, так і глибинних шарів матеріалу, наступні.

- 1) Підвищення густини хаотично розташованих дислокацій (утворення лісу дислокацій за рахунок ковзання у вторинних системах), яке призводить до посилення їх взаємодії, в результаті чого поля напружень, що виникають навколо дислокацій, перешкоджають їх взаємному переміщенню. Цей фактор позначається σ_g [15].
- 2) Зміцнення розчиненими атомами при легуванні за рахунок пружної взаємодії дислокацій з дефектами кристалічної ґратки, які виникають при утворенні твердих розчинів, і за рахунок блокування дислокацій сегрегаціями атомів, що отримали назву „атмосфери”. Цей механізм зміцнення іноді називають твердорозчинним. Зміцнення при утворенні твердого розчину визначається за формулою:

$$\sigma_p = G\varepsilon^2 c, \quad (13)$$

де ε – параметр, який залежить від різниці розмірів атомів розчиненої компоненти r і розчинника r_0 , ($\varepsilon^2 = \frac{r-r_0}{r_0}$); c – атомна концентрація розчиненої компоненти.

- 3) Виділення всередині зерен твердого розчину високодисперсних рівномірно розподілених частинок зміцнюючих фаз, які утруднюють рух дислокацій за механізмом Романа (σ_ϕ).
- 4) Створення бар’єрів для рухомих дислокацій у вигляді різного роду меж (межі зерен, субзерен полігонів, двох різних фаз і т.д.). Цей вид зміцнення (позначають σ_{sp}) називають субструктурним.

Використавши ці способи впливу на структуру, можна досягти різкого зменшення рухливості дислокацій, що, в свою чергу, збільшить опір матеріалу пластичній деформації, тобто зміцнить його.

Методи обробки поверхні з метою покращення їх експлуатаційних характеристик можна класифікувати таким чином [10]:

- механічні методи;
- методи фізико-хімічної модифікації матеріалів (іонна імплантація, іонне азотування, цементація тощо);
- методи осадження, що дозволяють отримати поверхневий шар зі складом і мікроструктурою, який відрізняється від складу і мікроструктури матеріалу підкладки (іонне нанесення, хімічне осадження із парів, фізичне осадження із парів, електролітичне осадження тощо).

З металургійної точки зору можливо класифікувати процеси осадження як процеси крапельного і атомного переносу. З відносно нових методів обробки поверхонь слід відмітити лазерну (або обробку електронними пучками), іонну імплантацію та іонне осадження.

Всі наведені вище методи проводяться окремими технологічними операціями і вимагають застосування достатньо складних технічних засобів.

Висновки. Всебічний аналіз процесів, які відбуваються в поверхневому шарі металу при видаленні стружки, значна енергетична активність ювенільної поверхні дають можливість впливу на фізико-хімічні параметри обробленої поверхні в залежності від необхідних експлуатаційних характеристик виробу, свідомо формувати міцнісні і структурні параметри, включаючи і поверхнєве легування, використовуючи найбільш активний період – час релаксації. Введення в адсорбційний простір необхідних легуючих матеріалів з наступним пластичним деформуванням поверхні відразу ж після чистової лезової обробки (після утворення ювенільної поверхні), на нашу думку, забезпечить необхідні якісні параметри оброблених поверхонь. Передбачається створення торцевого багатофункціонального інструмента, що об’єднує в одній операції (одному проходіві) чорнове фрезерування, напівчистове, чистове стругання, легування поверхні та її пластичне деформування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Яцирицын П.П. Технологическое наследование эксплуатационных параметров деталей машин // Процеси обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – 2005. – Вип. 1. – С. 260–267.

2. Шило А.Е. Физико-химическое взаимодействие рабочего слоя инструмента из СТМ с обрабатываемым материалом // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 1. – С. 37–40.
3. Романов В.С. Структурно-энергетический анализ процессов при механо-химическом изнашивании металлов и сплавов: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К., 1981.
4. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караухов и др. / – К.: Техніка. 1976.
5. Смосенко Л.О., Коровайченко Ю.М., Коровайченко В.В. Вплив поверхневого легування на трибологічні характеристики поверхонь відновлених деталей.
6. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
7. Повышение работоспособности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ. / С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, Ю.А. Мельничук./Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (Серія Г. „Процеси механічної обробки. Верстати та інструменти”) НАН України ІНМ ім. В.М. Бакуля. – Київ, 2006. – 240 с.
8. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
9. Яцерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск, 1977. – 254 с.
10. Бурке Дж., Вайс Ф. Обработка поверхности и надежность материалов. – М.: Мир, 1985. – 192 с.
11. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела. – Луганск: ВУГУ, 2000. – 624 с.
12. Блантер М.С. Что такое внутреннее трение // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Том 8. – № 1. – С. 80–85.
13. Дударев Ю.И., Казаков А.В., Максимов М.З. К вопросу оценки времени релаксации локальных деформаций на поверхности металлов // Журнал технической физики. – 1998. – Том. 68. – № 6. – С. 138–139.
14. Фролов В.В. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1988. – 560 с.
15. Бушманов Б.Н., Хромов Ю.А. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1971. – 224 с.
16. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 246 с.
18. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
19. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.
20. Дьяченко С.С., Рабухин В.Б. Физические основы прочности металлов. – Харьков: Вища школа, 1982. – 200 с.
21. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.

МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем, ректор Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування.

ЛОЄВ Володимир Юхимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;
– комплексні та комбіновані методи обробки плоских поверхонь деталей машин;
– конструювання металообробних верстатів та інструментів.

САЛОГУБ Євген Вікторович – магістр інженерної механіки, провідний інженер-програміст навчально-методичного управління ЖДТУ, асистент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;
– властивості поверхневого шару металевих конструкційних матеріалів.

Подано 21.09.2006

Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Є.В. Визначення можливостей зміцнення поверхневого шару деталей використанням активності поверхні при її механічній обробці.

Мельничук П.П., Лоев В.Е., Салогуб Е.В. Определение возможностей упрочнения поверхностного слоя деталей использованием активности поверхности при ее механической обработке.

Melnychuk P.P., Loev V.Yu., Salogub E.V. Determination of possibility of hardening part's surface layer by using surface's activity during machining.

УДК 621.795

Визначення можливостей зміцнення поверхневого шару деталей використанням активності поверхні при її механічній обробці/ П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев, Є.В. Салогуб

Стаття присвячена пошукам методів удосконалення процесів механічної обробки деталей використанням енергії поверхневого шару у релаксаційний період.

УДК 621.795

Определение возможностей упрочнения поверхностного слоя деталей использованием активности поверхности при ее механической обработке/ П.П. Мельничук, В.Е. Лоев, Е.В. Салогуб.

Статья посвящена поискам методов усовершенствования процессов механической обработки деталей использованием энергии поверхностного слоя в релаксационный период.

УДК 621.795

Determination of possibility of hardening part's surface layer by using surface's activity during machining / P.P. Melnychuk, V.Yu. Loev, E.V. Salogub.

The article researches methods of improving part's machining by using surface layer's energy during relaxation period.