

УДК 621.795

П.П. Мельничук, д.т.н., проф.**В.Ю. Лосєв, к.т.н., доц.****Є.В. Салогуб, аспір.****П.В. Кур'ята, ст. викл.***Житомирський державний технологічний університет*

РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ І ЕНЕРГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІ ПІСЛЯ ЇЇ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ ІНСТРУМЕНТОМ З НТМ

В статті зроблена спроба визначення поверхневої енергії і часу релаксаційних процесів в поверхневому шарі деталі після її лезової обробки інструментом з надтвердих матеріалів з метою забезпечення можливостей поверхневого легування з наступним ППД в одній технологічній операції торцевого фрезерування.

Вступ. Важливою проблемою сучасного машинобудування є підвищення якості продукції, її надійності та довговічності. Технологічні методи є найбільш ефективними у вирішенні цієї проблеми. Вони дозволяють підвищити точність виготовлення деталей, а також забезпечити оптимальний стан поверхневого шару. Поверхневий шар деталей при їх експлуатації підлягає найбільш сильному механічному, тепловому і електромагнітному впливу. Руйнування деталей в більшості випадків починається з поверхневого шару, наприклад, виникнення і розвиток тріщини втоми, корозії, ерозії, зносу тощо [1–5].

Особливе місце в технології одержання якісних поверхонь займає фінішна обробка деталей. Її слід проводити з урахуванням значної енергетичної активності ювенільної поверхні, яка дає можливість впливати на фізико-хімічні параметри поверхневого шару оброблюваної деталі, свідомо формуючи потрібні експлуатаційні характеристики. На нашу думку, перспективною є фінішна обробка поверхонь деталей лезовим інструментом з одночасним поверхневим легуванням і пластичним деформуванням [6]. Проміжок часу між лезовою обробкою та введенням легуючого матеріалу повинен бути таким, щоб оброблена поверхня залишалась практично ювенільною. Це необхідно для того, щоб оброблена поверхня була найбільш активною і процеси легування та пластичного деформування проходили з більшою ефективністю. Згаданий вище проміжок часу сумірний з часом релаксації деяких короткотривалих релаксаційних процесів, які відбуваються в металах.

Нижче розглянемо деякі характеристики ювенільної поверхні та проведемо відповідні розрахунки для часів релаксації Зінера та Снука, а також розрахуємо глибину дифузії при контактному поверхневому лугуванні.

Викладення основного матеріалу. У зв'язку зі згаданим вище, актуальною задачею є знаходження часу релаксації та енергії активації для різних короткотривалих релаксаційних процесів [6]. Знайдемо час релаксації на прикладі релаксації Зінера.

Для реологічної моделі Зінера у випадку релаксаційних явищ, які пов'язані з атомною і молекулярною перебудовою у полі внутрішніх сил, породженому зовнішніми періодичними силами, час релаксації залежить від температури та енергії активації, як показує дослід, наступним чином [4, 7]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{H}{RT}\right), \quad (1)$$

де H – теплота (енергія) активації релаксаційного процесу, що розглядається (Дж/моль);

R – універсальна газова стала ($R = 8,31441(26)$ Дж/(моль·К));

T – абсолютна температура (К);

τ_0 – деяка стала [4].

Для знаходження енергії активації скористаємось методом „ширини піка” [7]. Цей метод розрахунку H оснований на визначенні ширини піка $Q^{-1}(T)$. Ширину піка вимірюють на певному рівні, меншому ніж Q^{-1}_{\max} (рис. 1). Вихідне рівняння цього методу таке [7]:

$$Q^{-1} = \frac{2Q_{\max}^{-1}\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (2)$$

де Q^{-1} – рівень внутрішнього тертя ($Q^{-1} = \frac{1}{\pi N} \ln \frac{A_1}{A_2}$, тут N – число коливань, що відповідає зменшенню амплітуди від A_1 до A_2);

ω – циклічна частота, якій відповідає дана температурна залежність внутрішнього тертя ($\omega = 2\pi\nu$ рад/с).

Задамося рівнем $Q^{-1} = \frac{2}{3}Q_{\max}^{-1}$, тоді матимемо:

$$\frac{2}{3}Q_{\max}^{-1} = \frac{2Q_{\max}^{-1}\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \Rightarrow \frac{2}{3}Q_{\max}^{-1} = \frac{2Q_{\max}^{-1}\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \Rightarrow \frac{1}{3} = \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (3)$$

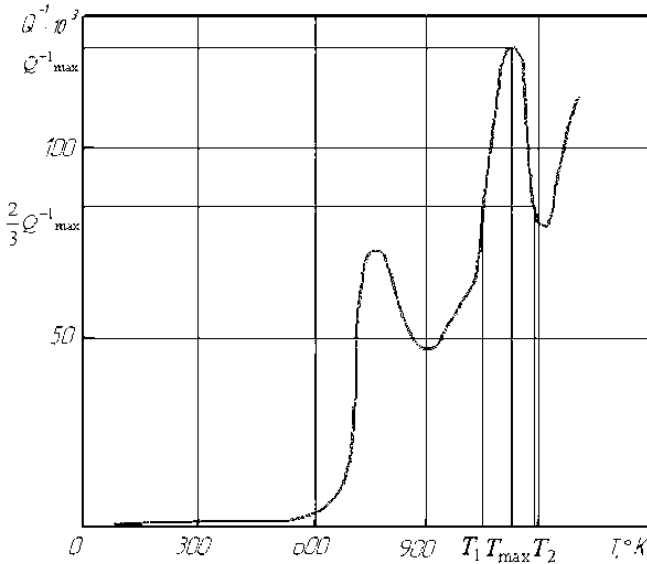


Рис. 1. Температурна залежність внутрішнього тертя полікристалічного заліза

З рівнянь (1) і (3) випливає:

$$\frac{1}{3} = \frac{\omega \tau_0 \exp\left(\frac{H}{RT}\right)}{1 + \left[\omega \cdot \tau_0 \exp\left(\frac{H}{RT}\right)\right]^2}. \quad (4)$$

Для зручності скористаємось заміною: $\omega \tau_0 \exp\left(\frac{H}{RT}\right) = X$, тоді рівняння (4) набуде вигляду:

$$\frac{1}{3} = \frac{X}{1 + X^2} \Rightarrow 1 + X^2 = 3X \Rightarrow X^2 - 3X + 1 = 0. \quad (5)$$

Розв'язками цього рівняння є $X_{1,2} = \frac{3 \pm \sqrt{5}}{2}$.

Таким чином, одержимо:

$$\omega \tau_0 \exp\left(\frac{H}{RT_1}\right) = \frac{3 + \sqrt{5}}{2}; \quad (6)$$

$$\omega\tau_0 \exp\left(\frac{H}{RT_2}\right) = \frac{3 - \sqrt{5}}{2}.$$

Виходячи з рівнянь (6), одержимо таку рівність:

$$\frac{\exp\left(\frac{H}{RT_1}\right)}{\exp\left(\frac{H}{RT_2}\right)} = \frac{3 + \sqrt{5}}{3 - \sqrt{5}} \Rightarrow \exp\left(\frac{H}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right) = \frac{3 + \sqrt{5}}{3 - \sqrt{5}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \exp\left(\frac{H}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right) \approx 6,853.$$

Прологарифмувавши цей вираз, будемо мати:

$$\frac{H}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \approx \ln 6,853 \Rightarrow \frac{H}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \approx 1,925.$$

Таким чином, вираз для H матиме вигляд:

$$H = \frac{1,925 \cdot R \cdot T_1 T_2}{T_2 - T_1}. \quad (7)$$

Визначимо з графіка $Q^{-1}(T)$ (рис. 1) значення T_1 , T_2 , T_{\max} .

Як видно з рис. 1, значення абсолютної температури, що відповідає максимуму величини $Q^{-1}(T)$, становить $T_{\max} = 1120$ °К, $T_1 = 1050$ °К, $T_2 = 1190$ °К.

Таким чином, значення H згідно з рівнянням (7) буде:

$$H = \frac{1,925 \cdot 8,314 \cdot 1050 \cdot 1190}{1190 - 1050} \approx 142\,771 \text{ (Дж/моль)}.$$

Розрахуємо значення сталої τ_0 , для цього скористаємось формулою [7]:

$$\tau_0 \approx \frac{\hbar}{kT_{\max}} = \frac{1,0546 \cdot 10^{-34}}{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 1120} \approx 0,682 \cdot 10^{-14} \text{ (с)}.$$

Підставивши ці значення у (1), будемо мати:

$$\tau = 0,682 \cdot 10^{-14} \exp\left(\frac{142771}{8,314 \cdot T}\right). \quad (8)$$

Беручи до уваги, що середня температура у зоні різання інструментом з КНБ сягає 1000–1200 °С [8], для отримання діапазону значень τ обмежимося значеннями температур $T \in [1273...1473]$ °К $\Rightarrow t \in [1000...1200]$ °С з кроком 10°. Результати розрахунку значень

часу релаксації τ , що відповідають даному діапазону температур, наведені у табл.1 (розрахунок здійснено за допомогою „Mathcad”).

Таблиця 1

Залежність часу релаксації τ від температури процесу

№ з/п	Температура релаксаційного процесу $T, ^\circ\text{K}$	Час релаксації Зінера $\tau, \times 10^{-9} \text{ c}$	№ з/п	Температура релаксаційного процесу $T, ^\circ\text{K}$	Час релаксації Зінера $\tau, \times 10^{-9} \text{ c}$
1	1273	4,924	12	1383	1,684
2	1283	4,432	13	1393	1,54
3	1293	3,996	14	1403	1,411
4	1303	3,609	15	1413	1,294
5	1313	3,264	16	1423	1,188
6	1323	2,957	17	1433	1,092
7	1333	2,683	18	1443	1,005
8	1343	2,437	19	1453	0,926
9	1353	2,218	20	1463	0,854
10	1363	2,02	21	1473	0,789
11	1373	1,843			

Розрахунки, проведені за методом „частотного зсуву піка” кривих залежності $Q^{-1}(T)$ для різних частот дають близький результат [4, 7]. Реальний час релаксації може відрізнятись в більшу сторону від розрахункового на кілька порядків [7]. Це пов’язано з тим, що τ – величина ймовірнісна, оскільки, кожен мікрооб’єм металу має своє значення рушійних сил. В такому випадку доцільніше говорити про густину ймовірностей часів релаксацій $f(\tau)$ і про математичне очікування релаксованих напружень [9].

Розрахуємо час релаксації Снука (Сноєка). Для цього використаємо зв’язок між коефіцієнтом дифузії D та часом релаксації τ [4]:

$$D = \frac{a^2}{72\tau}, \quad (9)$$

де D – коефіцієнт дифузії атомів проникнення в ГЦК-гратку;
 a – період гратки.

Період гратки заліза (сталі) за даних умов (1000–1200 °С) становить $\approx 3,6 \cdot 10^{-10}$ м (0,36 нм) [10]. Коефіцієнт дифузії легуючого елемента, наприклад Cr, в γ -залізо значно залежить від температури (табл. 2) [11]:

Таблиця 2

Залежність коефіцієнта дифузії Cr в γ -залізо від температури

Температура дифузії $t, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт дифузії $D_{Cr}^\gamma \cdot 10^{12}, \text{cm}^2/\text{c}$
1050	58,0
1150	90,0
1250	870

Проведемо експоненційну апроксимацію функції, заданої табл. 2, побудуємо відповідний графік (рис. 2) та отримаємо аналітичний вираз (10) (розрахунок здійснено за допомогою „Microsoft Excel”).

$$D = 2,86 \cdot 10^{-17} \exp(0,0135 \cdot t). \quad (10)$$

Результати розрахунку значень коефіцієнта дифузії D , що відповідають вибраному діапазону температур, наведені у табл. 3 (розрахунок здійснено за допомогою „Mathcad”).

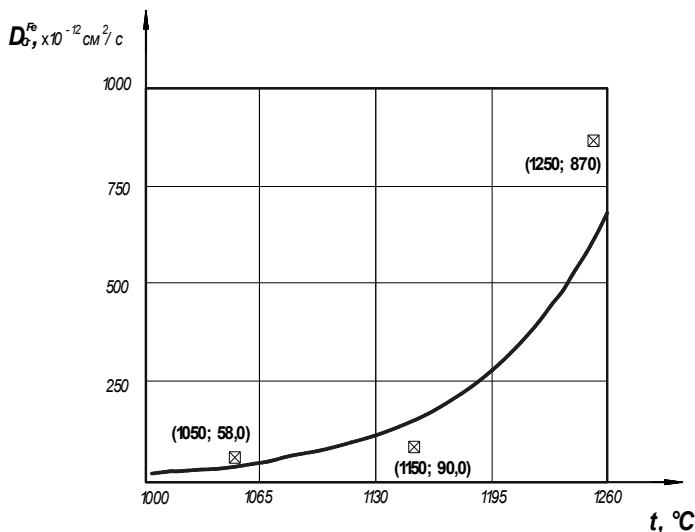


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта дифузії хрому в γ -залізо

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта дифузії D від температури

№ з/п	Температура $T, ^\circ\text{K}$	Коефіцієнт дифузії $D_{Cr}^{\gamma} \cdot 10^{12}, \text{см}^2 / \text{с}$	№ з/п	Температура $T, ^\circ\text{K}$	Коефіцієнт дифузії $D_{Cr}^{\gamma} \cdot 10^{12}, \text{см}^2 / \text{с}$
1	1273	20,86	12	1383	92,10
2	1283	23,88	13	1393	105,40
3	1293	27,33	14	1403	120,70
4	1303	31,28	15	1413	138,10
5	1313	35,80	16	1423	158,00
6	1323	40,97	17	1433	180,90
7	1333	46,89	18	1443	207,00
8	1343	53,67	19	1453	237,00
9	1353	61,43	20	1463	271,20
10	1363	70,31	21	1473	310,40
11	1373	80,47			

З формули (9) знайдемо вираз для часу релаксації:

$$\tau = \frac{a^2}{72D}. \tag{11}$$

За формулою (11) проведено обчислення значень τ для наведених в табл. 3 коефіцієнтів дифузії. Отримані результати подані в табл. 4.

З табл. 4 бачимо, що для релаксації Снука час релаксації порівняно з часом релаксації Зінера значно більший.

Розрахуємо глибину дифузійного шару, що утворюється протягом часу релаксації Снука. Глибина дифузійного шару y знаходиться за формулою [10, 12]:

$$y = K\sqrt{\tau}, \tag{12}$$

де K – коефіцієнт, що знаходиться дослідним шляхом;

τ – час дифузії (в нашому випадку рівний часу релаксації Снука).

Таблиця 4

Залежність часу релаксації Снука τ від температури процесу

№ з/п	Температура релаксаційного	Час релаксації Снука	№ з/п	Температура релаксаційного	Час релаксації Снука
-------	----------------------------	----------------------	-------	----------------------------	----------------------

	процесу $T, ^\circ\text{K}$	$\tau, \times 10^{-7} \text{ c}$		процесу $T, ^\circ\text{K}$	$\tau, \times 10^{-7} \text{ c}$
1	1273	8,628	12	1383	1,954
2	1283	7,539	13	1393	1,708
3	1293	6,587	14	1403	1,492
4	1303	5,755	15	1413	1,304
5	1313	5,028	16	1423	1,139
6	1323	4,393	17	1433	0,995
7	1333	3,838	18	1443	0,869
8	1343	3,354	19	1453	0,760
9	1353	2,93	20	1463	0,664
10	1363	2,56	21	1473	0,580
11	1373	2,237			

Для знаходження K скористаємось результатами робіт В.І. Ніколаєва [12]. Згідно з цими роботами залежність глибини проникнення від температури для різних часів дифузії виражається графіком (рис. 3).

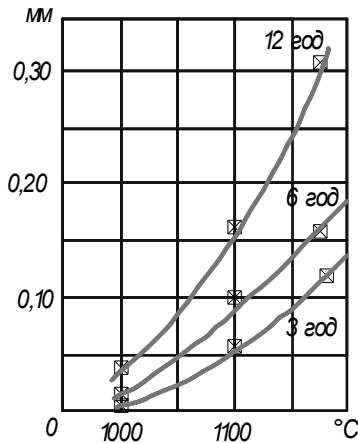


Рис. 3. Вплив температури і тривалості витримки на глибину дифузійного шару при хромуванні заліза контактним методом

Взявши криву, що відповідає 6 год., дифузії, розрахуємо сталу K за формулою:

$$K = \frac{y}{\sqrt{\tau}}. \quad (13)$$

Розглянувши графічну залежність, зображену на рис. 3, визначимо значення глибини дифузного шару y , утвореного за час дифузії 6 год., а також обчислимо відповідні значення K за формулою (13). Результати проведених розрахунків покажемо в табл. 5 (розрахунок здійснено за допомогою „Mathcad”).

Використавши отримані значення коефіцієнтів K , що відповідають обраним нами температурам, знайдемо глибини дифузного шару y , який утвориться за час релаксації Снука. Для цього скористаємось формулою (12). Результати проведених розрахунків покажемо в табл. 6 (розрахунок здійснено за допомогою „Mathcad”).

Таблиця 5

Результати розрахунків глибини дифузійного шару та коефіцієнта K

№ з/п	Температура релаксаційного процесу T , °К	Глибина дифузного шару, утвореного за час дифузії 6 год. y , мм	Стала $K \times 10^{-7} \text{ м/с}^{1/2}$
1	1273	0,012	0,797
2	1283	0,019	1,303
3	1293	0,027	1,818
4	1303	0,034	2,344
5	1313	0,042	2,88
6	1323	0,05	3,425
7	1333	0,059	3,981
8	1343	0,067	4,547
9	1353	0,075	5,124
10	1363	0,084	5,71
11	1373	0,093	6,306
12	1383	0,102	6,913
13	1393	0,111	7,53
14	1403	0,12	8,156
15	1413	0,129	8,793
16	1423	0,139	9,44
17	1433	0,148	10,1
18	1443	0,158	10,76

19	1453	0,168	11,44
20	1463	0,178	12,13
21	1473	0,189	12,83

Таблиця 6

Результати розрахунків глибини дифузійного шару,
що утворюється за час релаксації Снука

№ з/п	Температура релаксаційного процесу $T, ^\circ\text{K}$	Час релаксації Снука $\tau, \times 10^{-7} \text{ c}$	Глибина дифузійного шару, утвореного за час релаксації Снука. $y, \times 10^{-10} \text{ м}$
1	1273	8,628	0,740
2	1283	7,539	1,131
3	1293	6,587	1,476
4	1303	5,755	1,778
5	1313	5,028	2,042
6	1323	4,393	2,27
7	1333	3,838	2,467
8	1343	3,354	2,634
9	1353	2,93	2,774
10	1363	2,56	2,889
11	1373	2,237	2,983
12	1383	1,954	3,056
13	1393	1,708	3,111
14	1403	1,492	3,15
15	1413	1,304	3,175
16	1423	1,139	3,186
17	1433	0,995	3,185
18	1443	0,869	3,174
19	1453	0,760	3,154
20	1463	0,664	3,125
21	1473	0,580	3,089

Як видно, глибина дифузійного шару складає близько 0,1 нм. Це означає, що для одержання більших глибин дифузії треба, щоб час дифузії був більшим за час релаксації. Вибравши необхідну глибину дифузійного шару, користуючись формулою (11), можна розрахувати потрібний для цього час дифузії.

Зауважимо, що наведені розрахунки можна розглядати як оціночні. Це пов'язано з тим, що коефіцієнти дифузії хрому в залізо (сталь), знайдені різними авторами, значно відрізняються один від одного. Так, значення для D , наведені в [12], значно більші, ніж використані нами. Це означає, що час релаксації Снука, розрахований за формулою (10),

буде значно меншим і за порядком буде близьким до часу релаксації Зінера, розрахованого вище. Як наслідок, буде меншою і глибина дифузійного шару.

В [6] відмічалось, що поверхня металу відразу після її лезової механічної обробки є, практично, ювенільною. З метою забезпечення можливостей поверхневого легування з наступним ППД в одній технологічній операції торцевого фрезерування важливо знати, протягом якого часу вона може вважатись такою. В цьому розділі проведено розрахунок часу, протягом якого ювенільна поверхня металу покривається моношаром молекул газу, який її оточує. Оскільки лезова обробка відбувається в повітряному просторі, а основною складовою повітря є азот (78,08 %) [13], то розрахунок проведемо для азоту.

Число атомів на одиничній поверхні твердого тіла можна виразити через число атомів в одиниці об'єму (їх концентрацію) [14].

$$N_{\text{ат.пов.}} = N_{\text{ат.об.}}^{2/3} \quad (14)$$

Проведемо розрахунок $N_{\text{ат.пов.}}$ за (14) для заліза (сталі):

$$N = \frac{\rho_{\text{Fe}}}{M_{\text{Fe}}} \cdot N_A \quad (15)$$

Враховуючи, що густина $\rho_{\text{Fe}} = 7,8 \cdot 10^3$ (кг/м³), молярна маса $M_{\text{Fe}} = 56 \cdot 10^{-3}$ (кг/моль), число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ (моль⁻¹), число атомів в об'ємі 1 м³ згідно з (15) складає:

$$N_{\text{ат.об.}} = \frac{7,8 \cdot 10^3}{56 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 8,385 \cdot 10^{28} \text{ (м}^{-3}\text{)}.$$

Підставимо отримане значення в (14) і знайдемо число поверхневих атомів на 1 м².

$$N_{\text{ат.пов.}} = (8,385 \cdot 10^{28})^{2/3} \approx 1,916 \cdot 10^{19} \text{ (м}^{-2}\text{)}.$$

Розрахуємо темп зіткнень молекул азоту з поверхнею при фіксованому тиску P і температурі T . Під темпом зіткнень розуміють кількість молекул, що стикаються з поверхнею 1 м² за 1 с. Кінетична теорія дає наступну формулу для визначення темпу зіткнень [14]:

$$N = \frac{P}{(2\pi m k T)^{1/2}}, \quad (16)$$

де m – маса молекули азоту; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (Дж/К) – стала Больцмана.

Підрахуємо масу m молекули азоту N_2 за формулою (17):

$$m = \frac{M_{N_2}}{N_A}, \quad (17)$$

$$m = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} \approx 4,651 \cdot 10^{-26} \text{ (кг)}$$

Врахуємо, що температура в зоні різання складає $T = 1273(K)$, а тиск $P = P_{атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ (Па)}$. Підставивши ці дані в (16), отримаємо:

$$N = \frac{1,013 \cdot 10^5}{(2\pi \cdot 4,651 \cdot 10^{-26} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1273)^{1/2}} \approx 1,414 \cdot 10^{27} \text{ (м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{)}.$$

Як і в джерелі [14], будемо вважати, що кожна з молекул, яка зіштовхується з поверхню, прилипає до неї. За таких умов час, протягом якого „чиста” поверхня буде вся покрита моношаром азоту, можна знайти за формулою:

$$t = \frac{N_{ат.пов.}}{N} \tag{18}$$

Проведемо обчислення за (18):

$$t = \frac{1,916 \cdot 10^{19}}{1,414 \cdot 10^{27}} \approx 1,355 \cdot 10^{-8} \text{ (с)}.$$

Бачимо, що, як відмічалось в [6], цей час сумірний з часом релаксації короткотривалих релаксаційних процесів.

Як видно з (16), темп зіткнень залежить від маси молекул газу. Маси молекул азоту та кисню мало відрізняються одна від одної, тому наведені розрахунки будуть справедливими і для молекул кисню з достатньою точністю. А оскільки азот разом з киснем є основними компонентами повітря (99,03 %) [13], то наведений розрахунок справедливий для повітря в цілому.

Для аналізу результатів на ЕОМ доцільно проводити не окремі розрахунки, а вивести загальну формулу для визначення часу існування ювенільної поверхні. Ця формула матиме вигляд:

$$t = (2\pi M_{газ} kT)^{1/2} \rho_{мет}^{2/3} N_A^{1/6} P^{-1} M_{мет}^{-2/3} \tag{19}$$

Використовуючи (19), розрахуємо час існування ювенільної поверхні за вказаних умов для різних температур обраного діапазону. Результати розрахунку значень часу t , що відповідають вибраному діапазону температур, наведені у табл. 7 (розрахунок здійснено за допомогою „Mathcad”).

Таблиця 7

Залежність часу існування „чистої” поверхні t від температури T

№	Температура	Час	№	Температура	Час
---	-------------	-----	---	-------------	-----

з/п	релаксаційного процесу $T, ^\circ\text{K}$	існування «чистої» поверхні $t, \times 10^{-8} \text{ c}$	з/п	релаксаційного процесу $T, ^\circ\text{K}$	існування «чистої» поверхні $t, \times 10^{-8} \text{ c}$
1	1273	1,355	12	1383	1,412
2	1283	1,36	13	1393	1,417
3	1293	1,366	14	1403	1,423
4	1303	1,371	15	1413	1,428
5	1313	1,376	16	1423	1,433
6	1323	1,381	17	1433	1,438
7	1333	1,387	18	1443	1,443
8	1343	1,392	19	1453	1,448
9	1353	1,397	20	1463	1,453
10	1363	1,402	21	1473	1.458
11	1373	1,407			

Зауважимо, що запропонована в [14] методика розрахунку часу, якою скористались автори, не є цілком досконалою. Серед її недоліків можна вказати такі: ювенільна поверхня вважається бездефектною, на реальній же поверхні металу обов'язково наявні дислокації, особливо це актуально для поверхні, яка утворилась в результаті лезової обробки (густина дислокацій після лезової обробки може становити $\approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [15]); не кожна молекула газу влучає в конкретний поверхневий атом заліза; в деякі з них може влучити кілька молекул, а в інші атоми не влучають взагалі. Крім того, не кожне влучання молекули в атом заліза призводить до прилипання молекули, чи реакції з нею. Саме ці причини призводять до того, що утворення моношару може проходити протягом часу, який відрізняється від розрахованого.

Важливим параметром, що характеризує поверхневий шар металу, є його поверхнева енергія. Під поверхневою енергією розуміють надлишок енергії поверхневого шару на межі поділу фаз порівняно з питомою енергією речовини всередині фази [13]. Величина повної поверхневої енергії знаходиться за формулою:

$$E_{\text{пов.}} = \int [\sigma - T \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)] dS, \quad (20)$$

де σ – питома вільна поверхнева енергія; $T \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)$ – зв'язана енергія.

Вільна поверхнева енергія зменшується зі збільшенням температури T майже лінійно. Повна поверхнева енергія металів не

залежить від температури, але на її величину впливають дислокації та інші структурні дефекти поверхні.

Експериментальних методів визначення поверхневої енергії і вільної поверхневої енергії мало. Причому, більшість з них можуть бути використані лише для певних умов експерименту. Єдиним загальним методом є напівемпіричний метод оцінки поверхневого натягу твердого тіла (питомої вільної поверхневої енергії) за поверхневим натягом рідини. Показано, що при температурах, близьких до температури плавлення, поверхневий натяг твердого тіла більший, ніж поверхневий натяг рідини. Відношення цих величин приблизно дорівнює відношенню теплоти сублімації до теплоти

випаровування:
$$\frac{\sigma_{\text{тв.тіла}}}{\sigma_{\text{рід}}} \approx \frac{L_{\text{субл.}}}{L_{\text{випар.}}} \quad [15].$$
 З цієї пропорції знаходимо

питому вільну поверхневу енергію твердого тіла:

$$\sigma_{\text{тв.тіла}} = \sigma_{\text{рід}} \cdot \frac{L_{\text{субл.}}}{L_{\text{випар.}}} \quad (21)$$

Проведемо відповідні розрахунки для заліза. Врахуємо, що

$$L_{\text{випар.}} = 6300 \text{ (кДж/кг)} ;$$

$$L_{\text{плав.}} = 270 \text{ (кДж/кг)} ;$$

$$L_{\text{субл.}} = L_{\text{випар.}} + L_{\text{плав.}} = 6570 \text{ (кДж/кг)} \quad [16];$$

$$\sigma_{\text{Feрід.}} = 1,88 \text{ (Дж/м}^2\text{)} - \text{поверхневий натяг рідкого заліза}$$

[14, 15].

Підставивши ці дані в (21), одержимо величину питомої вільної поверхневої енергії твердого заліза при температурі, близькій до температури плавлення: $\sigma_{\text{Feтверд.}} = 1,96 \text{ (Дж/м}^2\text{)}$.

Висновок. Розрахунок часу релаксаційних процесів і енергії новоутвореної (ювенільної) поверхні дає можливість визначити взаємне розташування в торцевому інструменті чистового, легуючого і вигладжуючого формоутворюючих елементів, а також підібрати оптимальні режими комбінованої обробки плоских поверхонь деталей з гарантованими якісними показниками поверхневого шару.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

2. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
3. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела. – Луганск, ВУГУ, 2000. – 624 с.
4. Дьяченко С.С., Рабухин В.Б. Физические основы прочности металлов. – Харьков: Вища школа, 1982. – 200 с.
5. Обробка матеріалів лезовим інструментом / За ред. С.А. Клименко. – Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля, ІВЦ „АЛКОН” НАНУ, 2006. – 316 с.
6. Мельничук П.П., Лоев В.Ю., Салогуб Є.В. Визначення можливостей зміцнення поверхневого шару деталей використанням активності поверхні при її механічній обробці // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 4 (39) / Технічні науки. – С. 44–56.
7. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М.: Металлургия, 1974. – 350 с.: с ил.
8. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Ляшко В.А., Огородник В.В., Ващенко А.Н. К вопросу об износе инструмента из кубического нитрида бора // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 2. – С. 42–45.
9. Колбасников Н.Г. Теория обработки металлов давлением. Физические основы прочности и пластичности металлов. – С.-Пб.: Издательство С.-ПбГПУ, 2004. – 267 с.
10. Лейкин А.Е., Родин Б.И. Материаловедение. – М.: Высшая школа, 1971. – 414 с.
11. Криштал М.А. Диффузионные процессы в железных сплавах. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 278 с.
12. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов. – М.: Машиностроение, 1964. – 451 с.
13. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
14. Зенгул Э. Физика поверхности. – М.: Мир, 1990. – 536 с.
15. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
16. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1983. – 519 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 – аспірант, асистент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування;

– властивості поверхневого шару металевих конструкційних матеріалів.

КУР'ЯТА Петро Володимирович – старший викладач кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– обробка металів.

Подано 14.09.2007