

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

**Методичні вказівки та завдання до виконання
розрахунково-графічної роботи №1
для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка
освітня програма “Технології та устаткування зварювання”**

Обговорено і рекомендовано на
засіданні кафедри ЗВ та АПБК
Протокол № 12
від 21.06.2019 р.

Чернігів ЧНТУ 2019

Інженерія поверхні. Методичні вказівки та завдання до виконання розрахунково-графічної роботи №1 для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка (освітня програма “Технології та устаткування зварювання”) / Укл.: Новомлинець О.О., Ющенко С.М. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – 14 с.

Укладачі: Новомлинець Олег Олександрович, доктор технічних наук, доцент
Ющенко Світлана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний за випуск: Прибисько Ірина Олександрівна, завідувач кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, кандидат технічних наук, доцент

Рецензент: Олексієнко Сергій Владиславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Зміст розрахунково-графічної роботи.....	4
2 Варіанти теоретичних завдань до розрахунково-графічної роботи.....	5
3 Варіанти практичних завдань до розрахунково-графічної роботи.....	6
4 Короткі теоретичні відомості до виконання розрахунково-графічної роботи.....	7
4.1 Розрахунок поверхневої енергії металів в твердому та рідкому стані.....	8
4.2 Визначення роботи адгезії рідкого металу при змочуванні поверхні твердого тіла.....	9
4.2.1 Робота адгезії та когезії.....	9
4.2.2 Зв'язок роботи адгезії із крайовим кутом.....	11
Рекомендована література.....	13
ДОДАТОК А.....	14

Вступ

До робочих поверхонь деталей і конструкцій залежно від умов експлуатації висуваються певні вимоги щодо різних властивостей (зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості та ін.). Властивості поверхонь саме і визначають експлуатаційну надійність деталей і конструкцій.

Довговічність можна підвищувати створенням на поверхні виробів покриття з високим рівнем властивостей, які вимагаються, або модифікацією структури, чи легуванням поверхневого шару. Ці задачі розв'язуються методами інженерії поверхні.

Інженерія поверхні металів охоплює всі наукові і технічні аспекти виготовлення поверхневих шарів і нанесення більшості покриттів.

Дисципліна “Інженерія поверхні” входить до навчального плану спеціальності 131 Прикладна механіка (освітня програма “Технології та устаткування зварювання”) і викладається протягом трьох семестрів. Відповідно до робочої програми студенти прослуховують лекційний курс, виконують лабораторні роботи і дві розрахунково-графічні роботи (РГР) – РГР №1 у 3-му семестрі, РГР №2 – у 5-му семестрі.

Метою розрахунково-графічної роботи №1 є як закріплення теоретичного матеріалу щодо поверхневих фізико-хімічних процесів, отриманого студентами на лекційних заняттях та лабораторних роботах, так і надбання практичних навичок по визначенню основних характеристик поверхневих явищ та властивостей поверхні.

РГР №1 включає два завдання. Перше пов'язане з описом одного з теоретичних питань; друге – з вирішенням практичної задачі: розрахунок поверхневої енергії металу в твердому та рідкому стані й визначення роботи адгезії при розтіканні рідкого металу по твердій поверхні. В посібнику приведені варіанти завдань і короткі теоретичні відомості стосовно виконання роботи.

РГР оформляється у вигляді звіту на 10...15 сторінках формату А4 згідно ДСТУ 3008-2015 і виноситься на захист.

Робота виконується паралельно з прослуховуванням лекцій і виконанням лабораторних занять у 3-му семестрі.

1 Зміст розрахунково-графічної роботи

Розрахунково-графічна робота включає варіант індивідуального завдання та два розділи у відповідності до варіанту завдання. В першому розділі студент приводить теоретичні відомості по варіанту індивідуального завдання. В другому розділі відповідно до варіанту завдання проводяться необхідні розрахунки. У розрахунково-графічній роботі повинні міститись розрахункові схеми та рисунки.

В кінці РГР приводиться перелік технічної літератури, яка використовується при виконанні роботи.

2 Варіанти теоретичних завдань до розрахунково-графічної роботи

1. Методи інженерії поверхні.
2. Кристалічні та аморфні тіла.
3. Основні поняття кристалографії. Типи решіток і кристалічної структури.
4. Міжмолекулярні сили зв'язку та їх природа.
5. Міжатомні сили зв'язку та їх природа.
6. Будова та властивості поверхневих шарів металу.
7. Структура поверхневих шарів металів.
8. Недосконалості структури матеріалів.
9. Сегрегаційні явища на поверхні.
10. Поверхнева енергія.
11. Поверхнево-активні речовини та їх вплив на стан поверхні.
12. Поверхневий та міжфазний натяг.
13. Адсорбція. Вплив різних факторів на процеси адсорбції.
14. Фізична **абсорбція** та хемосорбція. Практичне значення **адсорбції**.
15. Окислювання поверхні металів. Кінетика утворення та росту товстих і тонких плівок.
16. Випаровування металів.
17. Основні фізичні процеси поглинання газів матеріалами. Розчинення газів у металах.
18. Електрокапілярні явища та причини виникнення капілярного тиску.
19. Умова розтікання рідини по поверхні твердого тіла.
20. Вплив оточуючого середовища та температури на змочування та розтікання.
21. Вплив стану поверхні та її шорсткості на змочування та розтікання.
22. Електричні явища на поверхні твердих тіл та в площині контакту.
23. Адгезія. Загальні відомості.
24. Адгезія рідини, часток та плівок.
25. Основні механізми (теорії) адгезії.
26. Робота адгезії та когезії. Теоретичні та експериментальні методи визначення.
27. Вплив стану поверхні на адгезію.
28. Практичне значення адгезії. Схоплювання поверхонь.
29. Природа утворення нероз'ємних з'єднань у твердому та рідкому стані.
30. Сутність трьохстадійності процесу зварювання у твердій фазі.

3 Варіанти практичних завдань до розрахунково-графічної роботи

Таблиця 1 – Вихідні дані

Варіант	Метал	Тип кристалічної ґратки	Теплота сублимації $\Delta H_{\text{субл}}$ кДж/моль	Теплота випаровування $\Delta H_{\text{вип}}$ кДж/моль	Крайовий кут змочування твердого тіла рідким металом $\theta, ^\circ$
1	Al	ГЦК	323,1	293,4	12
2	Ni	ГЦК	423,4	370,4	23
3	Cu	ГЦК	367,5	304,6	36
4	Ag	ГЦК	284,6	250,6	42
5	Au	ГЦК	368,8	334,4	57
6	Pb	ГЦК	194,9	177,7	68
7	Ti	ГЦУ	468,9	421,0	79
8	Nb	ОЦК	722,1	682,0	87
9	Ta	ОЦК	780,6	743,0	93
10	Cr	ОЦК	396,1	344,3	107
11	Mo	ОЦК	658,8	598,0	116
12	W	ОЦК	919,0	824,0	129
13	Fe	ОЦК	373,6	349,6	135
14	Co	ГЦУ	424,9	376,5	146
15	Zn	ГЦУ	129,6	115,3	150
16	Na	ОЦК	108,1	96,9	162
17	Zr	ГЦУ	600,6	582,0	12
18	Bi	ГЦК	197,9	104,8	29
19	Al	ГЦК	323,1	293,4	38
20	Ni	ГЦК	423,4	370,4	44
21	Cu	ГЦК	367,5	304,6	52
22	Cr	ОЦК	396,1	344,3	69
23	Mo	ОЦК	658,8	598,0	72
24	W	ОЦК	919,0	824,0	85
25	Fe	ОЦК	373,6	349,6	93
26	Co	ГЦУ	424,9	376,5	107
27	Zn	ГЦУ	129,6	115,3	114
28	Ag	ГЦК	284,6	250,6	123
29	Au	ГЦК	368,8	334,4	136
30	Nb	ОЦК	722,1	682,0	145

Умовні позначення:

ГЦК – гранецентрована кубічна;

ГЦУ – гексагональна щільноупакована;

ОЦК – об'ємноцентрована кубічна.

4 Короткі теоретичні відомості до виконання розрахунково-графічної роботи

Мінімальна енергія, необхідна для утворення одиниці площі поверхні поділу фаз в умовах сталого об'єму і сталої температури, називається *поверхневою енергією* чи *енергією поверхні поділу*.

У зв'язку з тим, що в атомах на поверхні з одного боку немає сусідніх атомів, їх енергія більша, ніж енергія атомів усередині ґратки. Надлишок енергії атомів на поверхні зумовлює виникнення поверхневої енергії.

Поверхнева енергія – важлива характеристика, від якої залежить, протікання багатьох процесів. Поверхнева енергія відіграє значну роль у процесах зварювання, паяння, склеювання, нанесення покриття.

Теоретичне та експериментальне визначення поверхневої енергії є складною задачею. Найбільш достовірні результати дає визначення її за допомогою рівнянь, що пов'язують теплоту сублімації з ближнім порядком у кристалі. Ця теорія використовується здебільшого для оцінки поверхневої енергії металів і оксидів.

Явище адгезії відноситься до числа поверхневих явищ, тобто таких, які виникають на границі розділу контактуючих фаз. *Фазою* називають однорідну частину системи, що володіє однаковим складом, фізичними та хімічними властивостями й відділену від інших частин системи поверхнею розділу. Адгезія, змочування й розтікання відносяться до міжфазної взаємодії, що відбувається між конденсованими фазами. Очевидно, що змочування й розтікання припускають наявність хоча б однієї з фаз у рідкому стані й обумовлені адгезійною взаємодією. Адгезії між двома твердими тілами часто сприяє попередній перехід хоча б однієї з фаз у рідкий стан для збільшення інтенсивності молекулярно-кінетичного руху й здійснення необхідного контакту (зварювання плавленням, паяння, склеювання та окремі способи нанесення покриття). Тому, як правило, адгезія й змочування супроводжують один одного й відповідним чином характеризують міжфазну взаємодію. Адгезія – результат прагнення системи до зменшення поверхневої енергії. Тому адгезія є процесом, що протікає самовільно.

Теоретична оцінка адгезії на сьогоднішній день ще дуже наближена, що пояснюється не тільки недосконалістю рівнянь, по яких розраховуються сили зв'язків, але й тим, що неможливо оцінити реальне число зв'язків, що доводиться на одиницю площі (воно завжди менше теоретичного, що говорить про можливість збільшення міцності з'єднань). Крім того, важко оцінити справжню площу контакту фаз, яка може бути набагато більше візуально спостережуваної площі завдяки наявності шорсткості поверхневого шару. Для забезпечення міцності з'єднання шорсткість часто збільшують шляхом спеціальної обробки поверхонь матеріалів. Роботу адгезії й адгезійну міцність експериментально визначають при безпосередньому руйнуванні з'єднання. Роботу адгезії можна визначити й непрямыми методами, які особливо зручні, якщо хоча б однією із взаємодіючих фаз є рідина і можна виміряти, наприклад, крайовий кут.

Для отриманого варіанту практичного завдання, виходячи з вихідних даних (таблиця 1), студент повинен провести розрахунок поверхневої енергії металу в твердому та рідкому стані, а потім, використовуючи зв'язок роботи адгезії із крайовим кутом, визначити роботу адгезії рідкого металу при змочуванні поверхні твердого тіла.

4.1 Розрахунок поверхневої енергії металів в твердому та рідкому стані

Мірою сил міжатомного зчеплення твердого тіла може служити енергія зв'язку, або, що те саме, енергія атоматизації E_s . Енергія зв'язку – це енергія, необхідна для поділу твердого тіла на нейтральні атоми. Прийнято вважати, що для металів енергія зв'язку E_s дорівнює теплоті сублімації металу $\Delta H_{\text{субл}}$.

Значення E_s зазвичай знаходять розрахунковим шляхом, користуючись напівемпіричними залежностями.

Розглянемо кристал, що містить у собі 1 моль речовини, з координаційним числом Z , що вказує на кількість найближчих рівновіддалених сусідів у кожного атому (для кристалів з ОЦК градками $Z=8$, з ГЦК та ГЦУ гратками - $Z=12$). У ньому є N атомів (число Авогадро – $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹), а кількість зв'язків дорівнює $\frac{1}{2}(Z \cdot N)$. Оскільки міжатомні сили діють на короткій відстані, то можна припустити, що поверхнева енергія виникає завдяки зв'язкам між найближчими сусідами. Отже, енергія одиничного міжатомного зв'язку E_1 дорівнює теплоті сублімації $\Delta H_{\text{субл}}$, поділеній на загальну кількість зв'язків:

$$E_1 = \frac{\Delta H_{\text{субл}}}{\frac{1}{2} \cdot Z \cdot N}, \quad (1)$$

Розглянемо кристали з ГЦК гратками. Нехай поверхня відколу кристала утворює площину (111). Кожен атом на площині (111) зв'язаний із шістьма сусідніми атомами на цій площині, з трьома атомами нижньої площини та з трьома атомами на верхній площині. Тому при утворенні поверхні розриваються по три зв'язки в кожному атомі. Однак при розколюванні утворюються дві поверхні, і кількість розірваних зв'язків у кожному атомі дорівнює $3/2$. Таким чином, для утворення поверхні необхідно на кожний атом витратити енергію:

$$\frac{3}{2} E_1 = \frac{3}{2} \frac{\Delta H_{\text{субл}}}{\frac{1}{2} \cdot Z \cdot N} = \frac{3 \Delta H_{\text{субл}}}{12 \cdot N} = \frac{\Delta H_{\text{субл}}}{4 \cdot N}, \quad (2)$$

Якщо на площині (111) знаходиться N_0 атомів на 1 см^2 , то поверхнева енергія (в Дж/м²) становить:

$$\sigma_{\text{мс}} = \frac{\Delta H_{\text{субл}} \cdot N_0}{4 \cdot N}, \quad (3)$$

Аналогічно розраховується і поверхнева енергія кристалів з ГЩУ гратками. Поверхнева енергія для кристалів з ОЦК гратками буде становити:

$$\sigma_{тв} = \frac{3 \cdot \Delta H_{субл} \cdot N_0}{8 \cdot N}, \quad (4)$$

Щільність упаковки атомів на поверхні більшості металів (монокристалів) коливається в межах від $1,1 \cdot 10^{15}$ до $1,8 \cdot 10^{15}$ атом·см⁻². Тому для розрахунків N_0 необхідно брати в середньому 10^{15} на 1 см².

При кристалізації і поліморфних перетвореннях у твердому стані, тобто коли відбувається упорядкування чи перебудування гратки металу, поверхнева енергія змінюється стрибком. Зв'язок між цими величинами виражається залежністю:

$$\sigma_{тв} = \sigma_p \left(\frac{\gamma_{тв}}{\gamma_p} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\Delta H_{субл}}{\Delta H_{вип}} \right), \quad (5)$$

де $\gamma_{тв}$ і γ_p – густина металу в твердому і рідкому станах (значення приведені в додатку);

$\Delta H_{субл}$ і $\Delta H_{вип}$ – теплота сублімації і випаровування (див. табл. 1).

Для грубих оцінок можна вважати, що при затвердінні поверхнева енергія твердого металу $\sigma_{тв}$ збільшується порівняно з поверхневою енергією рідкого металу σ_p до значень приблизно від $1,1 \sigma_p$ до $1,3 \sigma_p$.

4.2 Визначення роботи адгезії рідкого металу при змочуванні поверхні твердого тіла

4.2.1 Робота адгезії та когезії

Адгезія (від лат. adhaesio – прилипання) – зчеплення двох різнорідних тіл, приведених у контакт. В окремому випадку для тіл однакової фізико-хімічної природи те ж явище називається *когезією*. Адгезія характеризує зв'язок між двома тілами, для порушення якого необхідно зовнішнє зусилля. Розрізняють адгезію між двома рідинами, між рідиною й твердим тілом і між двома твердими тілами.

Розрізняють кілька механізмів адгезії (і відповідно теорій адгезії) залежно від природи взаємодіючих тіл і умов, при яких відбувається адгезія. *Механічна адгезія* здійснюється шляхом затікання в пори й тріщини поверхні твердого тіла рідкого адгезиву, що потім твердішає, забезпечуючи механічне зачеплення із твердим тілом. Відповідно до *молекулярного (адсорбційного) механізму* адгезія виникає під дією міжмолекулярних ван-

дер-ваальсових сил, природа яких пов'язана з деформацією електронних оболонок атомів на границі розділу. *Електрична теорія* зв'язує адгезію з виникненням подвійного електричного шару на границі розділу між адгезивом і субстратом. Окремо виділяється механізм, обумовлений *хімічною взаємодією* при адгезії. У конкретних умовах один з механізмів може переважати, частіше ж механізм адгезії є змішаним.

Високу адгезійну міцність проявляють контакти металів із багатьма (хоча й не з усіма) металами й напівпровідниками, а також контакти полімерних плівок з різноманітними матеріалами; набагато нижче міцність контактів *металів з діелектриками й графітом*. Адгезія відіграє важливу роль у ряді явищ на границі розділу: терті, змочуванні та ін. Адгезія знаходить практичне застосування при паянні, зварюванні, склеюванні та нанесенні покриття.

Утворення хімічних (та (або) інших) зв'язків на границі розділу між контактуючими фазами вимагає витрати роботи на їхній поділ. Ця робота, називається *роботою адгезії* і вимірюється в тих же одиницях, що й поверхневий натяг (Дж/м²). У випадку контакту двох рідин, що не змішуються, адгезія дорівнює сумі поверхневих натягів кожної з фаз мінус міжфазний натяг на границі розділу й визначається з рівняння Дюпре:

$$W_a = \sigma_A + \sigma_B - \sigma_{AB}, \quad (6)$$

де σ_A, σ_B – поверхневий натяг фаз *A* та *B* відповідно;
 σ_{AB} – міжфазний натяг на границі між фазами *A* та *B*.

Це рівняння відображає *закон збереження енергії при адгезії*. З нього витікає, що робота адгезії тим більше, чим більше поверхневі натяги вихідних компонентів і чим менше кінцевий міжфазний натяг. У той же час чим більше робота адгезії, тобто міжфазна взаємодія, тим менше міжфазний натяг. Міжфазний натяг стане рівним нулю, коли зникне поверхня між фазами, що відбувається при повнім розчиненні фаз.

Від роботи адгезії необхідно відрізнити *адгезійну міцність* W_m – роботу, витрачену на руйнування адгезійного з'єднання. Ця величина відрізняється тим, що до неї входить як робота розриву зв'язків (робота W_a), так і робота, витрачена на деформацію компонентів адгезійного з'єднання (робота деформації W_{def}):

$$W_m = W_a + W_{def}, \quad (7)$$

Чим міцніше адгезійне з'єднання, тим в більшій мірі піддаються деформації компоненти системи до моменту її руйнування. Робота деформації іноді може перевищувати оборотну роботу адгезії в кілька разів.

Робота когезії визначається витратою енергії на оборотний ізотермічний розрив тіла по перетину, рівному одиниці площі. Так як при розриві утвориться поверхня у дві одиниці площі, то робота когезії дорівнює

подвоєному значенню поверхневого натягу на границі з газом:

$$W_k = 2 \cdot \sigma_A, \quad (8)$$

Стосовно до ідеального твердого тіла (відсутність дефектів структури) величину W_k часто називають *міцністю на розрив*, або *когезійною міцністю*. Реальні тіла через наявність дефектів структури мають значно меншу (іноді в сто й тисячу разів) міцність.

4.2.2 Зв'язок роботи адгезії із крайовим кутом

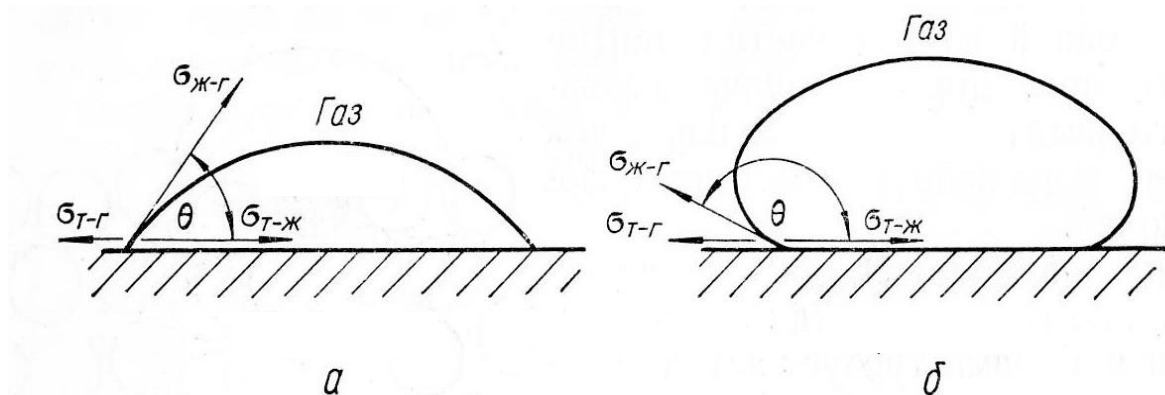
Рівняння Дюпре самостійно майже не використовується для розрахунку роботи адгезії через труднощі визначення поверхневого натягу твердих тіл на границі з газом (повітрям) і рідиною. Зручну для розрахунку цієї величини форму має співвідношення, одержуване в результаті сполучення рівняння Дюпре із законом Юнга. Якщо різницю $(\sigma_{T-G} - \sigma_{T-J})$ у рівнянні Дюпре замінити її вираженням із закону Юнга:

$$\cos \theta = (\sigma_{T-G} - \sigma_{T-J}) / \sigma_{J-G}, \quad (9)$$

то одержимо:

$$W_a = \sigma_{J-G} (1 + \cos \theta), \quad (10)$$

Рівняння (10) називають *рівнянням Дюпре-Юнга*; воно зв'язує роботу адгезії із крайовим кутом і дозволяє розрахувати роботу адгезії, якщо відомі поверхневий натяг рідини та крайовий кут (див. рисунок 1). Обидві ці величини можна порівняно легко визначити експериментально.



а – гарне змочування; б – погане змочування

Рисунок 1 – Крапля рідини на поверхні твердого тіла

З рівняння (10) чітко видно розходження між явищами адгезії й змочування. Підставивши в рівняння (10) рівняння (8) та розділивши обидві частини рівняння на 2, одержимо:

$$W_a / W_k = (1 + \cos\theta) / 2 \quad (11)$$

Так як змочування кількісно характеризується косинусом крайового кута, то відповідно до рівняння (11) воно визначається відношенням роботи адгезії до роботи когезії для змочувальної рідини.

З рівняння (11) можна зробити наступні висновки:

1) при $\theta = 0^\circ$ $\cos\theta = 1$, $W_a = W_k$, тобто робота адгезії дорівнює роботі когезії змочувальної рідини;

2) при $\theta = 90^\circ$ $\cos\theta = 0$, $W_a = 1/2 W_k$, тобто робота адгезії у два рази менше роботи когезії змочувальної рідини;

3) при $\theta = 180^\circ$ $\cos\theta = -1$, $W_a = 0$, такий стан на практиці не реалізується, оскільки деяка адгезія завжди існує, тому повного незмочування в реальних системах також бути не може.

Наприклад, одне із самих більших значень крайового кута при змочуванні водою спостерігається на поверхні фторопласта, відповідно для цієї системи характерна і найменша адгезія. Якщо крайовий кут дорівнює 108° , а поверхневий натяг води при температурі 25°C – $72,0$ мДж/м², то з рівняння (9) одержимо роботу адгезії, рівну $49,7$ мДж/м² ($\cos 108^\circ = -0,31$).

Рекомендована література

1. Васильев М. А. Структура и динамика поверхности переходных металлов. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
2. Физика твердого тела: Энциклопедический словарь. В 2-х т. / гл. ред. В. Г. Барьяхтар. Киев: Наукова думка, 1998. 648 с.
3. Харламов Ю. О., Будаг'янц М. А. Фізика, хімія та механіка поверхні твердого тіла. Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во СУДУ, 2000. 624 с.
4. Кузнецов В. Д., Пащенко В. М., Ющенко К. А., Борисов Ю. С. Фізико-хімічні основи інженерії поверхні: Навч. посібник. Київ: ВІПОЛ, 2005. 372 с.
5. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні. Київ: Наукова думка, 2007. 557 с.
6. Копилов В. І., Смирнов І. В. Поверхневі фізико-хімічні процеси: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. 284 с.
7. Лисін В. І., Коваленко І. В., Крюкова О. А. Хімія та фізика твердого тіла: навч. посіб. Київ: КНУТД, 2014. 102 с.
8. Подопрігора Н. В., Садовий М. І., Трифонова О. М. Фізика твердого тіла: навчальний посібник. Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. 416 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Значення густини металу в твердому і рідкому станах

Метал	Густина металу	
	в твердому стані γ_{mv} , г/см ³	в рідкому стані γ_p , г/см ³
Al	2,70	2,38
Ni	8,96	7,77
Cu	8,92	8,03
Ag	10,49	9,30
Au	19,30	17,24
Pd	11,34	10,51
V	4,5	4,20
Nb	8,57	8,49
Ta	16,6	16,30
Cr	7,19	7,05
Mo	10,20	10,08
W	19,30	19,10
Fe	7,87	7,01
Co	8,90	7,76
Zn	7,14	6,02
Cd	0,97	0,93
Zr	6,50	6,20
Re	9,80	9,66
Al	2,70	2,38
Ni	8,96	7,77
Cu	8,92	8,03
Cr	7,19	7,05
Mo	10,20	10,08
W	19,30	19,10
Fe	7,87	7,01
Co	8,90	7,76
Zn	7,14	6,02
Ag	10,49	9,30
Au	19,30	17,24
Nb	8,57	8,49