

Цей винахід відноситься до способу визначення вмісту водню в сталевому листі, який піддається процесу відпалювання.

Сталевий лист складається з зерен, в яких атоми розташовані в кристалічній решітці, утворюючи таким чином мікроструктуру сталі. Простір між цими атомами називаються міжвузлями. Розташування атомів не є повністю упорядкованим, тому можуть виникнути деякі дефекти упаковки, як це має місце у разі дислокацій, які є лінійними дефектами.

Під час термічної обробки сталевого листа атоми водню, які присутні в атмосфері печі, можуть легко проникати в сталь і поглинатися. Дійсно, водень може дифундувати в кристалічну решітку завдяки розміру його атомів того самого порядку, що і розмір міжвузлів кристалічної решітки. Атоми водню можуть поступово дифундувати і фіксуватися всередині дефектів, таких як дислокації.

Впровадження і дифузія водню в сталевий лист є одним з механізмів, відповідальних за крихкість сталевого листа, що може призвести, наприклад, до утворення тріщин вздовж границь зерен і/або площин ковзання дислокацій.

Через водень сталева смуга може втратити пластичність, що також називається водневим окрихчуванням.

Таким чином, метою цього винаходу є створення способу визначення вмісту водню в сталевому листі, який піддається процесу відпалювання, і видача користувачеві даних про вміст водню у будь-який момент часу.

Мета цього винаходу досягається шляхом пропозиції способу за п. 1. Спосіб також може включати ознаки пп. 2-6.

Тут і далі C_L позначає концентрацію водню в міжвузлях кристалічної решітки сталевого листа, а C_T концентрацію захопленого водню в сталевому листі. Дислокації є єдиними розглянутими у винаході місцями захоплення, які однорідно розподілені в мікроструктурі.

Далі винахід буде докладно описаний і проілюстрований прикладами без введення обмежень з посиланням на додані фігури:

Фіг. 1 представляє температурну криву процесів P0 і P1;

Фіг. 2 представляє температурну криву процесу P2;

Фіг. 3 ілюструє комірки, що використовуються в одному варіанті здійснення способу винаходу, для представлення мікроструктури в точці F_1 процесу P1;

Фіг. 4 представляє зміну в часі C_L , C_T і $C_{\text{загальн.}} = C_L + C_T$ процесу P0;

Фіг. 5 представляє зміну в часі C_L , C_T і $C_{\text{загальн.}}$ процесу P1;

Фіг. 6 представляє зміну в часі C_L , C_T і $C_{\text{загальн.}} = C_L + C_T$ процесу P2;

Фіг. 7 представляє температурну криву процесу P3;

Фіг. 8 представляє температурну криву процесу P4;

Фіг. 9 представляє зміну в часі C_L , C_T і $C_{\text{загальн.}} = C_L + C_T$ процесу P3;

Фіг. 10 представляє зміну в часі C_L , C_T і $C_{\text{загальн.}} = C_L + C_T$ процесу P4;

Фіг. 11 ілюструє комірки, які використовуються в одному варіанті здійснення способу винаходу, для представлення мікроструктури в E_3 процесу P3;

Спосіб, згідно винаходу, відноситься до оцінки вмісту дифузійного водню в сталевому листі, який піддається щонайменше одному процесу відпалювання.

Під час цього відпалювання лист піддається щонайменше одній стадії нагрівання і стадії охолодження відповідно до температурного режиму. Зазвичай термічну обробку можна проводити в окислювальній атмосфері, тобто, в атмосфері, яка містить окисний газ, наприклад, O_2 , CH_4 , CO_2 або CO . Її можна проводити в нейтральній атмосфері, тобто, в атмосфері, яка містить нейтральний газ, наприклад: N_2 , Ar або He . Нарешті, їх можна здійснювати у відновлювальній атмосфері, тобто, в атмосфері, що містить відновний газ, наприклад, H_2 або HN_x .

У переважному варіанті здійснення, температурний режим може також включати одну стадію ізотермічного витримання, якій зазвичай може передувати стадія нагрівання, а за нею слідує стадія охолодження. Стадія охолодження може включати ізотермічне витримання, зване підетапом перестарювання, за яким слідує стадія охолодження. Стадія нанесення покриття гарячим зануренням у ванні розплаву металу також може використовуватися під час такого температурного режиму і є іншим типом ізотермічного витримання, оскільки металевий лист, занурений у ванну розплаву металу, буде перебувати при температурі ванни протягом часу його перебування в такій ванні.

Зазначене відпалювання може являти собою, наприклад, рекристалізаційне відпалювання, відновлення або відпускання, і за ним можуть слідувати такі термообробки:

- загартування і відпускання,

- загартування і розподілення.

Температурний режим, згідно винаходу, відповідає послідовним температурам T , швидкостям нагрівання і охолодження і часу, що витрачається на кожній стадії процесу відпалювання і необов'язкових наступних термообробках.

Температуру температурного режиму можна вимірювати датчиками під час відпалювання і необов'язкової подальшої термообробки або шляхом розрахунків, які виконуються з використанням

програмного забезпечення.

Першою стадією способу винаходу є визначення мікроструктури сталевго листа в залежності від температурного режиму процесу відпалювання, наприклад, шляхом розрахунків, виконаних з використанням такого програмного забезпечення як COMSOL®. Мікроструктуру також можна визначити завдяки датчикам печі, здатним вимірювати вміст аустеніту в сталі, наприклад, X-CAP®.

В рамках цього винаходу перетворення мікроструктури відбувається миттєво лише у певних точках, які відповідають фазовому переходу при заданих температурах. Потім розраховують розчинність водню C_H на поверхні сталевго листа. Розчинність водню є здатністю водню розчинятися в сталевому листі. Ця розчинність залежить від температури, парціального тиску водню і фаз, які присутні в мікроструктурі сталевго листа. Її можна розрахувати з допомогою наступних рівнянь [1] і [2], які будуть описані.

Для температури T нижче або рівної A_{c3} , переважно 280-1184K:

$$\log(C_H) = 0.5 \log(p_{H_2}) - 3 - \frac{1500}{T} \dots [1]$$

В першій частині температурної кривої, де відбувається нагрівання, ферит є основною структурою сталевго листа. Розчинність водню C_H у фериті адекватно розраховується за наведеною вище формулою [1].

На останній ділянці температурної кривої, де відбувається охолодження, частина аустеніту, який утворився вище A_{c3} , може перетворитися на бейніт і/або мартенсит залежно від складу сталі і швидкості охолодження. В цій частині кривої розчинність водню C_H у бейніті і мартенситі передбачається такою самою, як і у фериті, і її можна адекватно одержати, використовуючи також наведену вище формулу [1].

Для температури T вище за A_{c3} переважно становить 1184-1667K:

$$\log(C_H) = 0.5 \log(p_{H_2}) - 2.9 - \frac{1490}{T} \dots [2]$$

В середній частині температурної кривої, де може бути здійснене витримання при високій температурі, передбачається, що аустеніт є основною фазою в сталевому листі, а розчинність водню C_H в аустеніті адекватно розраховується за формулою [2], наведеною вище.

В обох рівняннях [1] і [2] C_H виражається в % ат., а p_{H_2} представляє парціальний тиск водню в печі, виражений у Па. Обидва ці рівняння взяті з публікації Fromm & Jehn Hydrogen in Elements (Bull. Alloys Phase Diagrams, 5 (3), 323-326 (1984)).

Визначення розчинності водню C_H на поверхні сталевго листа потрібне як вхідні дані для наступної стадії способу винаходу, де об'ємна концентрація водню в міжвузлях кристалічної решітки C_L і об'ємна концентрація C_T захопленого водню в сталевому листі, виражені в молях водню на m^3 заліза (мольн/ m^3Fe), розраховуються з допомогою чисельного моделювання шляхом розв'язання наступних рівнянь:

$$\frac{dC_L}{dt} + \frac{dC_T}{dt} = D_L \frac{d^2C_L}{dx^2} \dots [3]$$

$$\frac{dC_T}{dt} = \frac{k}{N_L} C_L (N_T - N_A \times C_T) - pC_T \dots [4]$$

Далі будуть пояснені різні параметри і константи обох рівнянь [3] і [4].

D_L представляє коефіцієнт дифузії в кристалічній решітці, виражений в m^2/s , який залежить від температури і фаз, присутніх в сталевому листі при цій температурі. Цей коефіцієнт дифузії виражає здатність водню дифундувати всередину матеріалу. Що вищий коефіцієнт, тим легше дифундує водень.

У фериті, мартенситі і бейніті цей коефіцієнт дифузії водню D_L вважається однаковим і розраховується за наступним рівнянням:

$$D_L = 5.12 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{4150}{RT}} \dots [5]$$

В аустеніті коефіцієнт дифузії водню D_L розраховується за таким рівнянням:

$$D_L = 5.8 \cdot 10^{-3} e^{-\frac{53800}{RT}} \dots [6]$$

$R=8,314$ Дж/моль – універсальна газова стала, а T – температура, виражена в К.

Ці рівняння показують, що при еквівалентній температурі водень легше дифундує у фериті, мартенситі і бейніті, ніж в аустеніті.

$N_L=5,2 \times 10^{29}$ вузлів/ m^3 – об'ємна щільність міжвузлів в сталевому листі. В способі, згідно винаходу, передбачається, що N_L однакова у всіх фазах мікроструктури.

N_T являє собою об'ємну щільність дислокацій, виражену у вузлах/ m^3 . Дислокації мають пов'язану з ними енергію захоплення $E_b=27000$ Дж/моль. В способі винаходу одна дислокація може захоплювати

один або більше атомів водню. Об'ємна щільність дислокацій N_T розраховується з використанням поверхневої щільності дислокацій ρ_{dis} , вираженої в вузлах/м², за такою формулою:

$$N_T = \alpha \frac{\rho_{dis}}{a_{bcc} \frac{\sqrt{3}}{2}} \dots [7]$$

де коефіцієнт α є кількістю дислокацій згідно з вектором Бюргерса і який представляє здатність дислокацій захоплювати атоми водню. Що вище цей коефіцієнт, то більше дислокації захоплюють атоми водню. a_{bcc} представляє параметр решітки в ОЦК-структурі, виражений в ангстремах. В рамках винаходу цей параметр решітки однаковий у фериті, мартенситі і бейніті, які всі являють собою ОЦК-структури. У переважному варіанті здійснення ці параметри можуть приймати такі значення:

$$\alpha = 7$$

$$a_{bcc} = 2,87 \text{ \AA}$$

В рамках винаходу атоми водню не можуть бути захоплені дислокаціями в аустеніті через їх низький коефіцієнт дифузії.

k і p представляють відповідно швидкості захоплення і вивільнення водню, виражені в с⁻¹, відповідні кількості атомів водню, відповідно захоплених і звільнених залежно від часу, які визначається наступними рівняннями

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_T}{RT}\right) \dots [8]$$

$$p = p_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \dots [9]$$

$E_T = 4150$ Дж/моль-представляє енергію захоплення, тобто енергію, яку атом водню повинен мати, щоб бути захопленим, і $E_D = E_T + E_B = 31150$ Дж/моль – представляє енергію, яку водень повинен мати для вивільнення.

Константи k_0 і p_0 є коефіцієнтами захоплення і вивільнення водню, виражені в с⁻¹. Вони використовуються в якості параметрів для розрахунку C_T і C_L разом з N_T у різних фазах мікроструктури. Такі підгонкові параметри можуть бути визначені шляхом порівняння експериментів, виконаних із заданим складом сталі, і розрахунків згідно винаходу, повторюваних ітераційно доки експериментальні і розрахункові значення не зійдуться.

Нарешті $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ моль⁻¹ це стала Авогадро.

Як описано вище, деякі розрахунки, що виконуються в рамках способу винаходу, залежать від фаз, присутніх в сталі в заданій точці температурної кривої. Крім того, рівняння [3] залежить від глибини x сталевій частини, для якої виконані розрахунки. Щоб дати точну оцінку кількості водню, захопленого по всій товщині сталевого листа, переважно вважати, що лист складається з повторюваних N комірок розміром 5 мкм × 5 мкм, щоб імітувати щонайменше частину товщини сталевого листа. У переважному варіанті здійснення використовується половина товщини листа, причому N розраховується за формулою:

$$N = \text{товщина сталевого листа} / (2 \times 5 \text{ мкм})$$

Інша половина товщини сталевого листа поводить ся так само, як перша, і дифузія водню є однорідною по всій довжині листа.

Потім значення C_H можна розрахувати з використанням рівнянь [1] і [2] по всій температурній кривій. Такі значення C_H потім використовуються як значення C_L для першого ряду комірок.

Формули [3] і [4] можна послідовно застосовувати до кожної комірки, щоб остаточно одержати значення C_T і C_L для всієї товщини листа.

На останній стадії способу винаходу загальний вміст водню $C_{загальн.}$ визначається шляхом розрахунку додавання C_L і C_T в будь-який момент часу, перед виведенням значення користувачеві на дисплей комп'ютера.

Далі винахід буде проілюстрований такими прикладами, які аж ніяк не є обмежувальними.

Приклад 1

Холоднокатані сталеві листи складу, що складається з 0,07 % мас. С, 2,62 % мас. Mn, 0,25 % мас. Si, 0,3 % мас. Cr, 0,16 % мас. Al, 0,091 % мас. Mo, решту складу становлять залізо і немінучі домішки, які утворюються в результаті плавки, і товщиною 1 мм.

Такі листи можуть потім піддаватися одному процесу відпалювання серед процесів P0, P1 і P2, як описано на Фіг. 1 і 2. У всіх процесах листи нагрівають до температури T_H , яка дорівнює 790 °C, і витримують при цій температурі протягом часу витримування t_H , в печі з атмосферою, що складається з 5 % водню, решта N_2 , з точкою роси -50 °C.

В процесі P0 сталевий лист потім охолоджують до кімнатної температури (КТ).

В процесі P1 сталевий лист охолоджують від температури T_H до температури T_1 , яка дорівнює 465 °C, і витримують при зазначеній температурі протягом часу t_1 , який становить 86 с, а потім охолоджують до кімнатної температури зі швидкістю охолодження 10 °C/с.

В процесі P2 сталевий лист спочатку повільно охолоджують від T_H до температури T_1 600 °C зі швидкістю охолодження 2,6 °C/c і в другу чергу охолоджують від T_1 до температури T_2 465 °C зі швидкістю охолодження 40 °C/c. Сталевий лист витримують при зазначеній температурі T_2 протягом часу витримування t_2 , який дорівнює 86 с, а потім охолоджують до кімнатної температури (КТ) зі швидкістю охолодження 10 °C/c.

Температури M_s у кожному процесі одержують шляхом дилатометричних вимірювань.

З такими параметрами процесів проведені експериментальні випробування з метою одержання експериментальних значень вмісту водню. Були застосовані такі особливі умови:

Таблиця 1

Параметри процесів

Процес	Нагрівання		Перша стадія охолодження			Друга стадія охолодження			Третя стадія охолодження		M_s (°C)
	T_H (°C)	t_H (с)	T_1 (°C)	Швидкість охолодження (°C/c)	t_1 (с)	T_2 (°C)	Швидкість охолодження (°C/c)	t_2 (с)	Температура (°C)	Швидкість охолодження (°C/c)	
P0	790	192	КТ	40	-	-	-	-	-	-	$M_{s0} = 340$
P1	790	192	465	40	86	КТ	10	-	-	-	$M_{s1} = 240$
P2	790	119	600	2.6	-	465	40	86	КТ	10	$M_{s2} = 280$

Таблиця 2. Експериментальний вміст водню

Експериментальний вміст водню вимірюють з використанням експериментів TDA наприкінці процесу. Сталеві листи нагрівали зі швидкістю нагрівання 1200 °C/год. для досягнення термічної десорбції водню.

Відповідний вміст дифузійного водню представлено в таблиці 2:

Таблиця 2

Експериментальний вміст водню

Процес	Дифузійний водень (част./млн мас.)
P0	0,34
P1	0,10
P2	0,10

Вміст водню, визначений згідно з винаходом

Спочатку визначають мікроструктуру сталевих листів в кожній точці ($A_0, B_0, C_0, D_0, E_0; A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1; A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2, H_2$) температурних кривих, представлених на Фіг. 1 і 2.

Фазові перетворення мікроструктури відбуваються миттєво лише в зазначених точках. Визначені мікроструктури представлені в таблиці 3:

Таблиця 3

Визначені мікроструктури

Процес	Точки	Ферит (%)	Аустеніт (%)	Мартенсит (%)	Бейніт (%)
P0	A_0	100	-	-	-
	B_0	30	70	-	-
	C_0	30	70	-	-
	D_0	30	-	70	-
	E_0	30	-	70	-
P1	A_1	100	-	-	-
	B_1	30	70	-	-
	C_1	30	45	-	25
	D_1	30	25	-	45
	E_1	30	25	-	45
	F_1	30	-	25	45
	G_1	30	-	25	45
P2	A_2	100	-	-	-
	B_2	30	70	-	-
	C_2	30	70	-	-
	D_2	30	45	-	25
	E_2	30	25	-	45

	F ₂	30	25	-	45
	G ₂	30	-	25	45
	H ₂	30	-	25	45

На стадії нагрівання до T_H ферит є основною фазою доки температура не досягне AC_1 , після чого ферит починає перетворюватися на аустеніт. На стадії витримування при T_H , починаючи відповідно з точок B_0 , B_1 і B_2 , мікроструктура далі складається з фериту і аустеніту.

В процесі P_0 при охолодженні до кімнатної температури весь аустеніт перетворюється на мартенсит при температурі Ms_0 (точка D_0).

При першому охолодженні процесу P_1 , починаючи з точки C_1 , частина аустеніту перетворюється на бейніт. Аустеніт продовжує перетворюватися на бейніт на наступній стадії витримування, починаючи з D_1 . Мікроструктура під час охолодження, починаючи з E_1 , така сама, як і на стадії між D_1 і E_1 . Аустеніт остаточно перетворюється на мартенсит у точці F_1 , яка відповідає температурі Ms_1 .

У процесі P_2 при повільному охолодженні, починаючи з C_2 фазового перетворення не відбувається. Частина аустеніту перетворюється на бейніт при подальшому охолодженні, починаючи з D_2 . Аустеніт продовжує перетворюватися на бейніт при подальшому перестарюванні, починаючи з E_2 . Мікроструктура F_2 така сама, як у E_2 , а аустеніт перетворюється на мартенсит в точці G_2 при температурі Ms_2 .

Половина товщини сталевго листа моделюється шляхом повторення $N=100$ комірок розміром $5 \text{ мкм} \times 5 \text{ мкм}$. Процентні частки фаз в таблиці 3 розраховуються за допомоги відсоткової частки поверхні комірок, як показано на Фіг. 3, відповідних мікроструктурі у точці F_1 : 25 % поверхні комірок представляють 25 % мартенситу в сталі, 45 % поверхні комірок становлять 45 % бейніту і 30 % поверхні комірок являють собою 30 % фериту в сталевому листі.

Значення C_H потім розраховують з використанням рівнянь [1] і [2] з парціальним тиском водню p_{H_2} 5066,5 Па для всіх точок, де відбувається фазове перетворення. Такі значення C_H потім використовують як значення C_L для першого ряду комірок.

N_T і коефіцієнти захоплення і виділення підбирають з використанням наступного протоколу. Сталеві листи, що мають склад згідно з прикладом 1, нагрівають при температурі 850°C печі, в атмосфері якої міститься 5 % H_2 , решта N_2 , і витримують при зазначеній температурі протягом часу витримування 260 с перед загартуванням. Експериментальний вміст водню в кожному листі потім вимірювали за допомогою TDA експериментів шляхом нагрівання сталевго листа зі швидкістю нагрівання $1200^\circ\text{C}/\text{год}$.

Після кількох ітерацій вибрані найбільш підходящі параметри:

$$k_0=10^5\text{c}^{-1}$$

$$p_0=10^2\text{c}^{-1}$$

$$N_T \text{ у фериті} = 1024 \text{ вузлів/м}^3$$

$$N_T \text{ у бейніті} = 5 \cdot 1024 \text{ вузлів/м}^3$$

$$N_T \text{ у мартенситі} = 1025 \text{ вузлів/м}^3$$

Потім об'ємну концентрацію водню в міжвузлях кристалічної решітки C_L і об'ємну концентрацію захопленого водню C_T в сталевому листі розраховують шляхом розв'язування рівнянь [3] і [4] з урахуванням описаних вище мікроструктур: і для кожної точки, де відбувається фазове перетворення, на всьому протязі температурних кривих.

Потім у кожній із цих точок розраховують $C_{\text{загальн.}}$ ($C_{\text{загальн.}} = C_L + C_H$) і передають оператору. Відповідні криві, що об'єднують усі точки, показані на Фіг. 4-6, що відповідають процесам P_0 , P_1 і P_2 .

Для процесу P_0 кінцевий вміст водню, визначений способом згідно з винаходом, становить 0,36 част./млн порівняно з 0,34 част./млн, виміряним експериментально наприкінці процесу відпалювання.

Для процесів P_1 і P_2 кінцевий вміст водню, визначений способом згідно винаходу, становить 0,09 част./млн порівняно з 0,10 част./млн, вимірюваний експериментально.

Як показано цими прикладами, спосіб згідно винаходу добре прогнозує зміну вмісту водню.

Це показує, що спосіб, згідно винаходу, може будь-якої миті точно оцінити вміст водню, щоб передати його користувачеві під час виробництва сталевго листа.

Приклад 2

Холоднокатані сталеві листи, що мають склад 0,19 % мас. C, 3,86 % мас. Mn, 1,27 % мас. Si, 0,39 % мас. Al, 0,2 % мас. Mo, 0,0235 % мас. Nb, 0,0293 % мас. Ti, решта складу представляє залізо і неминучі домішки, які утворюються в результаті плавки, і поставляється 1,2 мм завтовшки. Такі листи можуть потім піддаватися процесу відпалювання між процесами P_3 і P_4 , як описано на Фіг. 7 і 8.

У всіх процесах листи нагрівають до температури T_H 850°C витримують при зазначеній температурі протягом часу витримування t_H 159 с. Потім сталеві листи охолоджують від T_H до температури T 1600°C зі швидкістю охолодження $2^\circ\text{C}/\text{с}$ перед загартуванням до температури T_Q 170°C .

В процесі P_3 сталевий лист охолоджують від T_Q до кімнатної температури (KT).

В процесі P_4 сталевий лист потім повторно нагрівають від T_Q до температури T_0 450°C ,

витримують при зазначеній температурі протягом часу витримування t_0 102 с перед охолодженням до кімнатної температури.

Температури M_s сталі цього класу в кожному процесі одержують шляхом дилатометричного вимірювання. З такими параметрами процесів проведені експериментальні випробування з метою одержання експериментальних значень вмісту водню. Застосовують такі особливі умови:

Таблиця 4

Параметри процесів

Процес	Нагрівання		Перша стадія охолодження		Загартування	Перестарювання		Стадія охолодження	M_s (°C)
	T_H (°C)	t_H (с)	T_1 (°C)	Швидкість охолодження (°C/с)	T_Q (°C)	T_o (°C)	t_o (с)	Температура (°C)	
P3	850	159	600	2	170	-	-	КТ	330
P4	850	159	600	2	170	450	102	КТ	330

Проведені випробування з цими параметрами процесу з метою одержання експериментальних значень вмісту водню.

Таблиця 5. Експериментальний вміст водню

Експериментальне визначення вмісту водню виконують з допомогою TDA експериментів наприкінці процесу шляхом нагрівання сталевих листів зі швидкістю нагрівання 1200 °C/год.

Відповідний вміст водню представлений в таблиці 5:

Таблиця 5

Експериментальний вміст водню

Процес	Дифузійний водень (част./млн мас.)
P3	0,38
P4	0,07

Вміст водню, визначений згідно з винаходом

Спочатку визначають мікроструктуру сталевих листів в кожній точці (A_3 , B_3 , C_3 , D_3 , E_3 , F_3 , G_3 ; A_4 , B_4 , C_4 , D_4 , E_4 , F_4 , G_4 , H_4) температурних кривих, як показано на Фіг. 7 і Фіг. 8.

Фазове перетворення мікроструктури відбувається миттєво в зазначених точках.

Визначені мікроструктури представлені в таблиці 6:

Таблиця 6

Визначені мікроструктури

		Ферит (%)	Аустеніт (%)	Мартенсит (%)
3P3	A_3	100	-	-
	B_3	-	100	-
	C_3	-	100	-
	D_3	-	100	-
	E_3	-	0	100
	F_3	-	0	100
	G_3	-	0	100
PP4	A_4	100	-	-
	B_4	-	100	-
	C_4	-	100	-
	D_4	-	100	-
	E_4	-	15	85
	F_4	-	15	85
	G_4	-	15	85
	H_4	-	15	85

На стадії нагрівання до T_H ферит є основною фазою до досягнення температури A_{C3} , де ферит перетворюється на аустеніт. На стадії витримування при T_H , починаючи відповідно до точок B_3 і B_4 , мікроструктура складається на 100 % з аустеніту.

В процесі Р3 в точках С₃ і D₃ мікроструктура така сама, як і В₃. Весь аустеніт перетворюється на мартенсит при температурі Ms, яка відповідає E₃, і мікроструктура залишається незмінною до кінця процесу.

В процесі Р4 в точках С₄ і D₄ мікроструктура така сама, як і В₄. Частина аустеніту перетворюється на мартенсит при температурі Ms, відповідної E₄, і мікроструктура залишається незмінною до кінця процесу.

Половина товщини сталевго листа моделюється шляхом повторення N=120 комірок розміром 5 мкм × 5 мкм. Відсоткова частка фази таблиці 5 враховується через відсоткову частку поверхні числових комірок, як показано на Фіг. 11, яка відповідає мікроструктурі в точці E₄: 15 % поверхні комірок становлять 15 % аустеніту в сталі, 85 % поверхні комірок представляють 85 % розподіленого мартенситу.

Значення C_H потім розраховують з використанням рівнянь [1] і [2] з парціальним тиском водню p_{H2} 5066,5 Па для всіх точок, де відбувається фазове перетворення. Такі значення C_H потім використовують як значення C_L для першого ряду комірок.

N_T і коефіцієнти захоплення і виділення підібрані з використанням наступного протоколу. Сталеві листи, що мають склад згідно з прикладом 2, нагрівають при температурі 850 °C в печі, в атмосфері якої міститься 5 % H₂, решта N₂, і витримування при зазначеній температурі протягом часу витримування 260 с перед загартуванням. Експериментальний вміст водню в кожному листі потім вимірювали з допомогою TDA експериментів шляхом нагрівання сталевго листа зі швидкістю нагрівання 1200 °C/год.

Після кількох ітерацій були обрані найбільш відповідні параметри:

$$k_0=10^5\text{с}^{-1}$$

$$p_0=10^2\text{с}^{-1}$$

$$N_T \text{ у фериті} = 1024 \text{ вузлів/м}^3$$

$$N_T \text{ у бейніті} = 5 \cdot 1024 \text{ вузлів/м}^3$$

$$N_T \text{ у мартенситі} = 1025 \text{ вузлів/м}^3$$

Потім об'ємну концентрацію водню в міжвузлях кристалічної решітки C_L і об'ємну концентрацію захопленого водню C_T в сталевому листі розраховують шляхом розв'язування рівнянь [3] і [4] з урахуванням описаних вище мікроструктур: і для кожної точки, де відбувається фазове перетворення, на всьому протязі температурних кривих.

Потім у кожній із цих точок розраховують C_{загальн.} (C_{загальн.} = C_L+C_L) і передають оператору. Відповідні криві, що включають всі точки, показані на Фіг. 9 і 10, відповідні процесам Р3 і Р4.

Як показують ці приклади, спосіб згідно винаходу добре прогнозує зміну вмісту водню.

Вміст водню, розрахований наприкінці процесу Р3 в точці G₃ (t=430 с), становить 0,37 част./млн порівняно з 0,38 част./млн, виміряним експериментально. В точці H₄ (t=590 с) процесу Р4 розрахунковий вміст водню становить 0,07 част./млн, як і вимірюваний експериментально.

Дані вмісту водню можуть бути виведені для користувача в будь-який момент процесу відпалювання, і повна крива може бути видана також наприкінці процесу відпалювання.

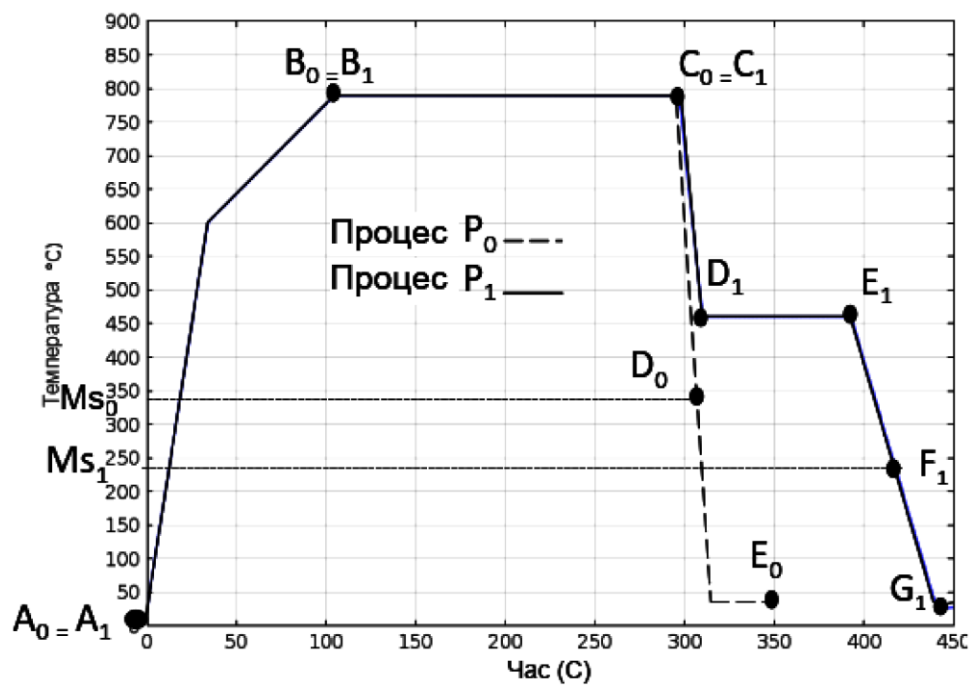


Fig. 1

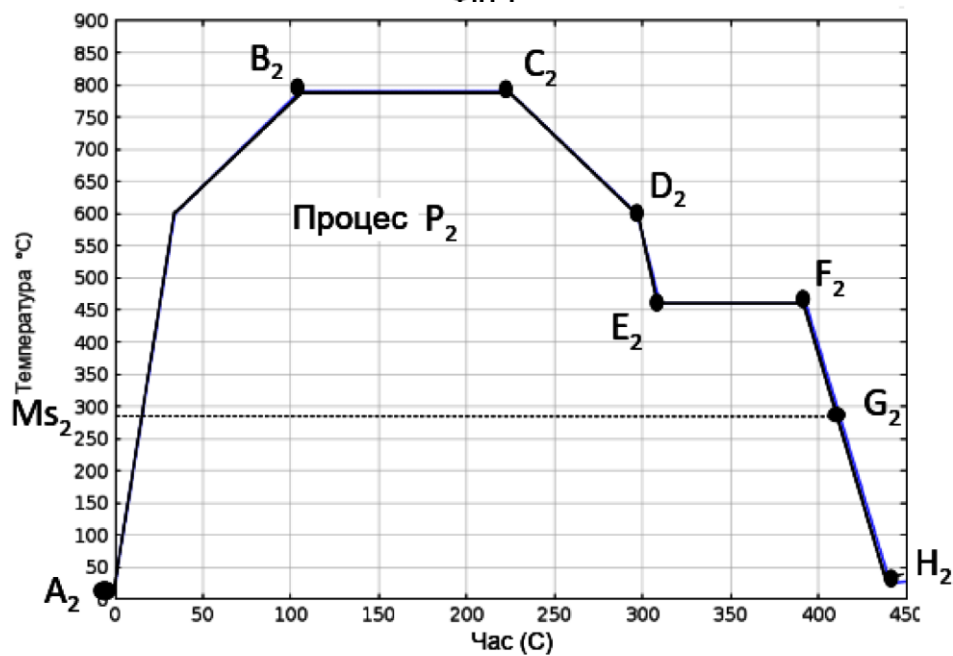


Fig. 2

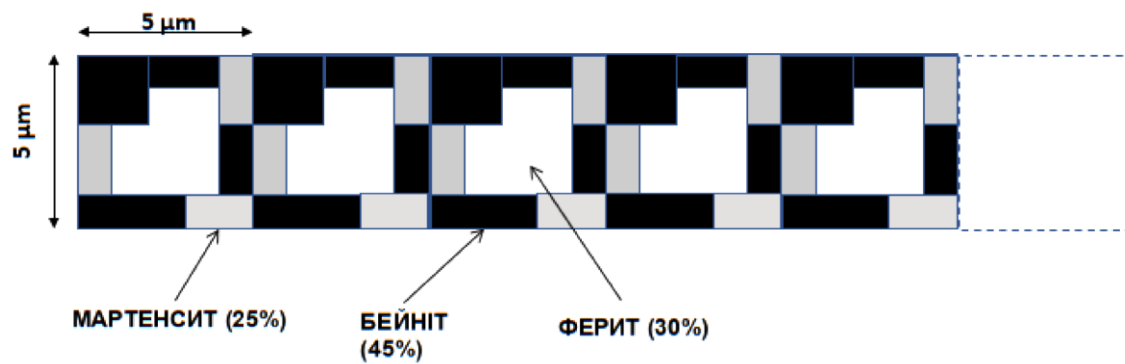


Fig. 3

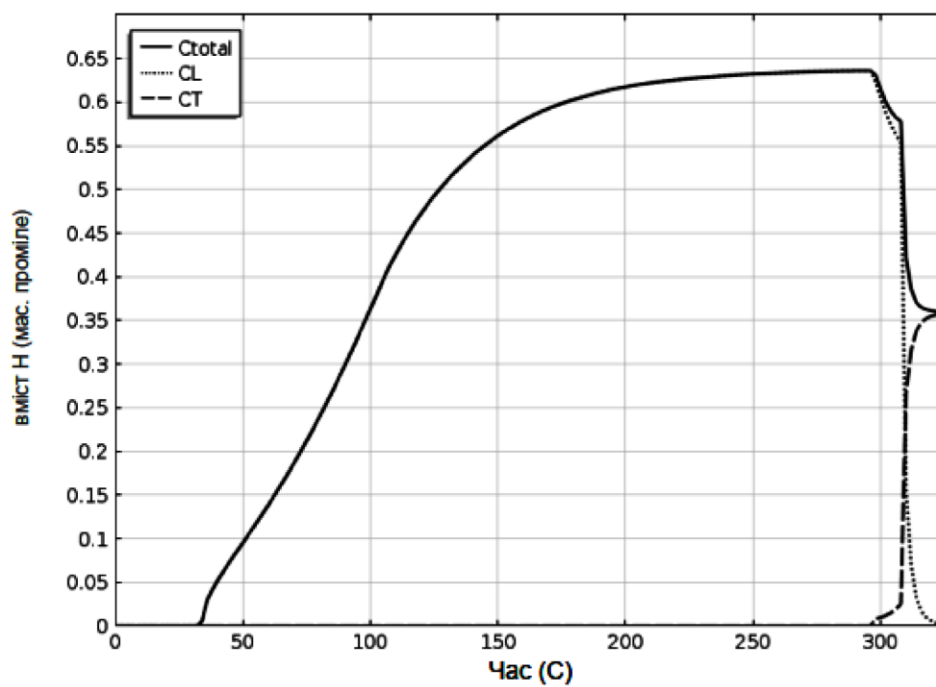
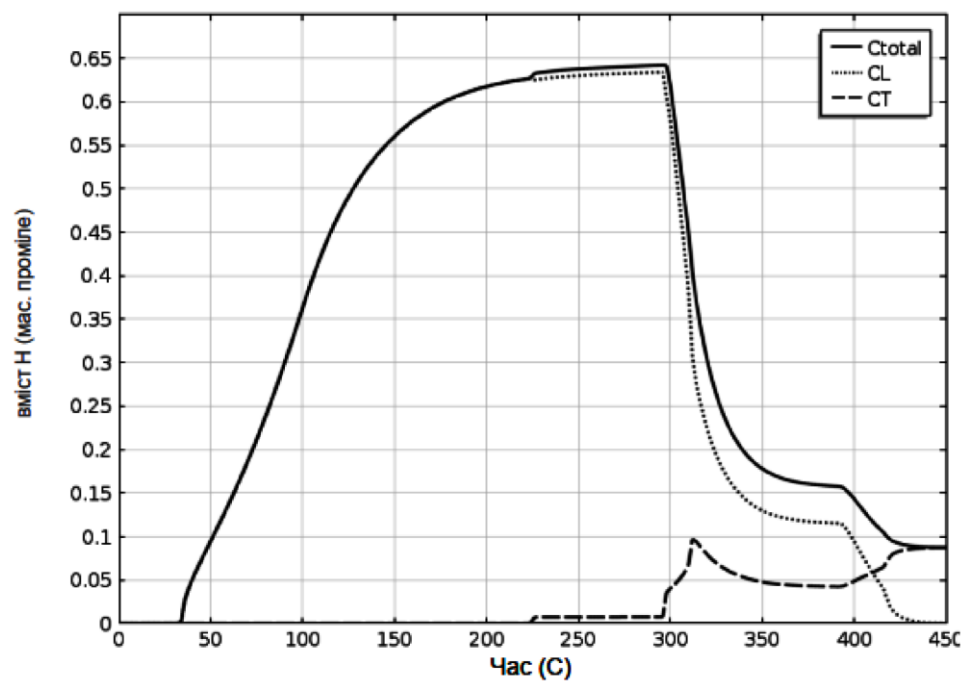
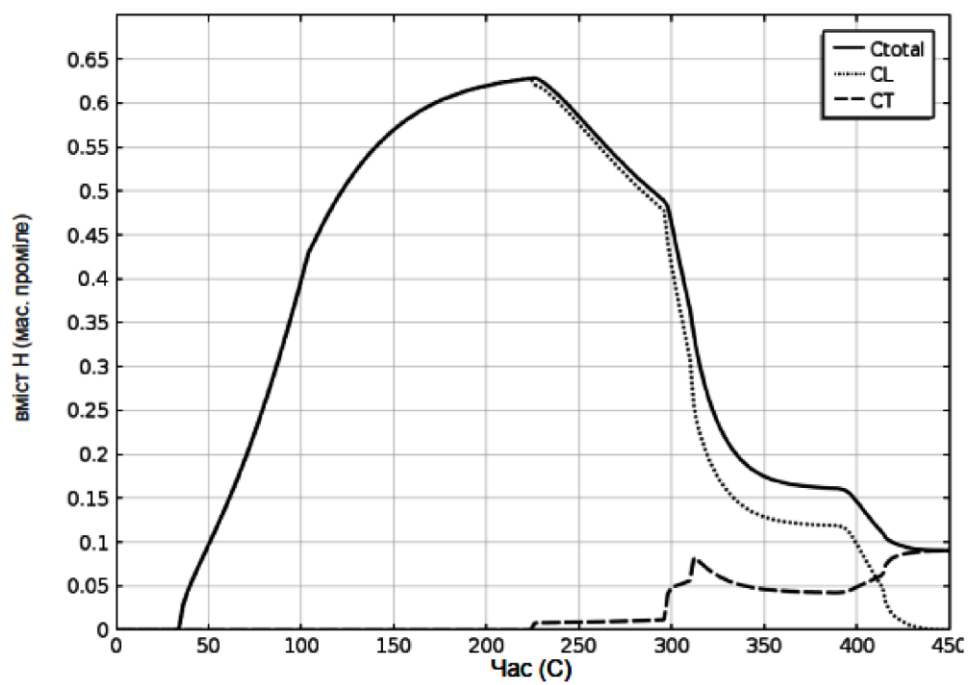


Fig. 4



Фіг. 5



Фіг. 6

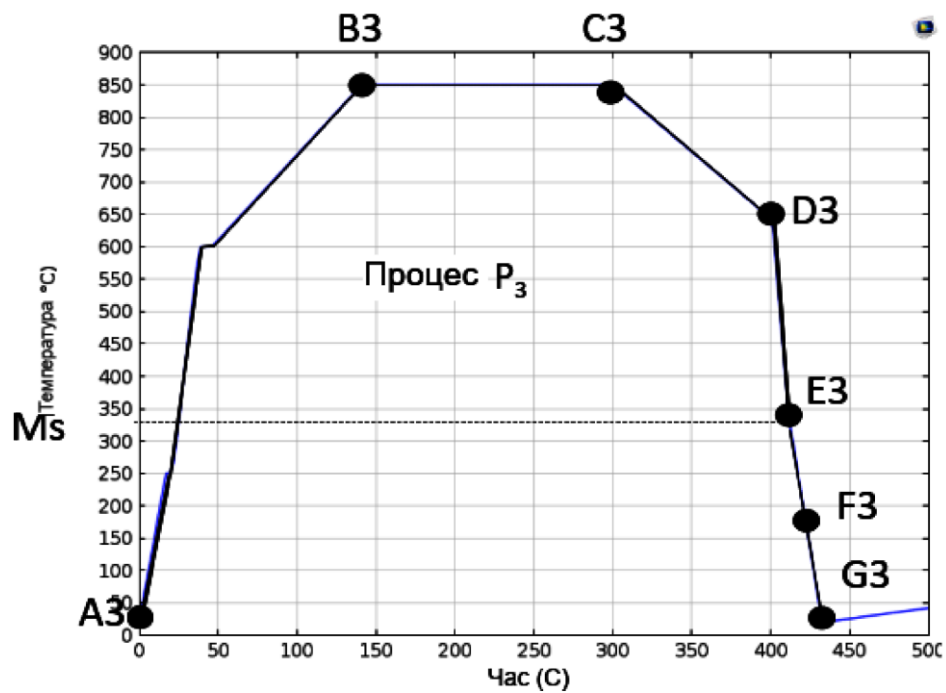


Fig. 7

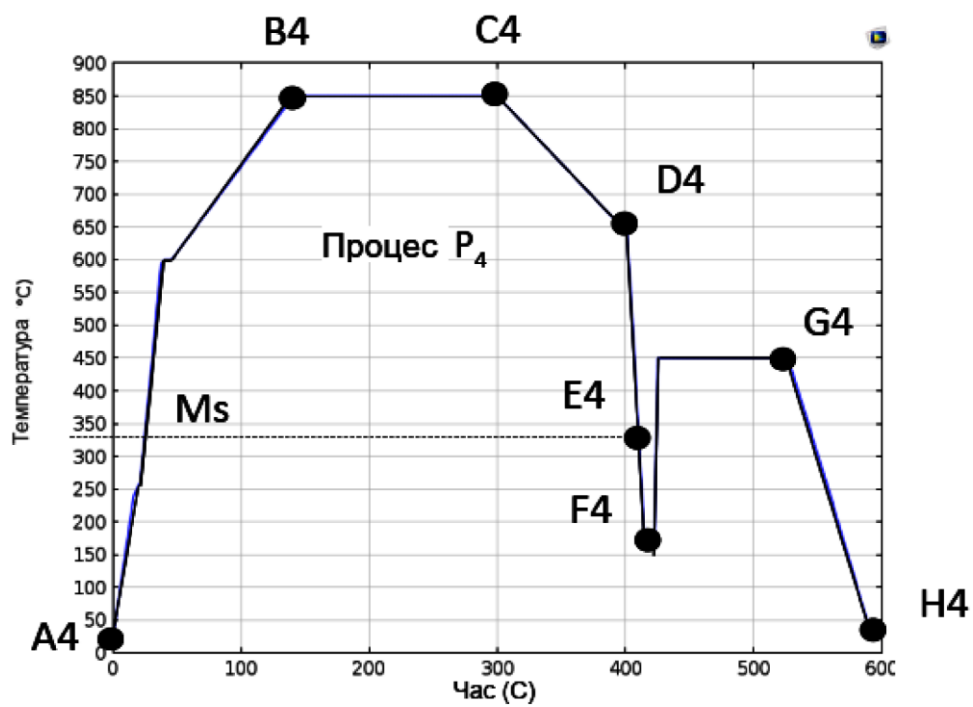
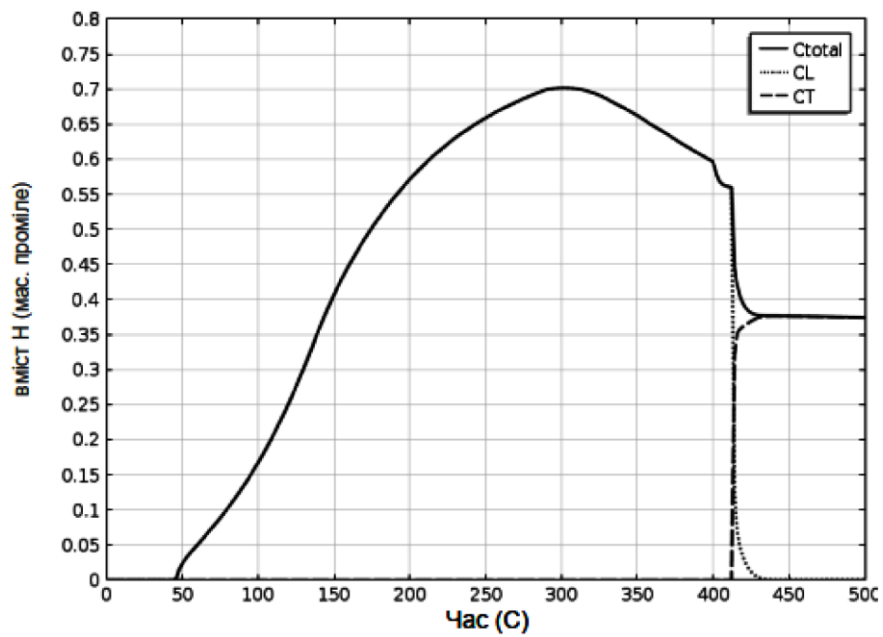
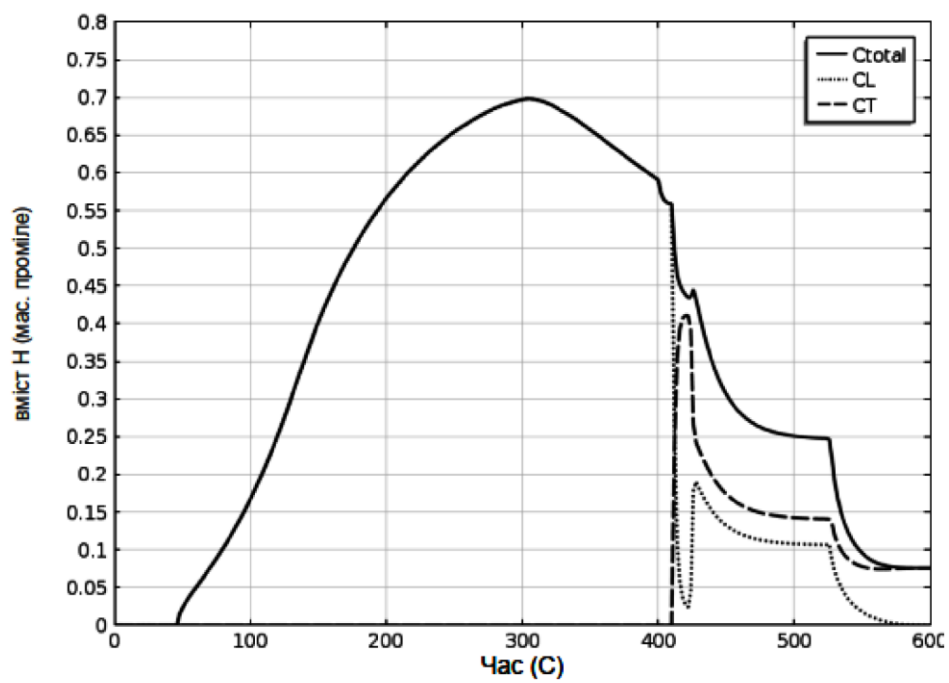


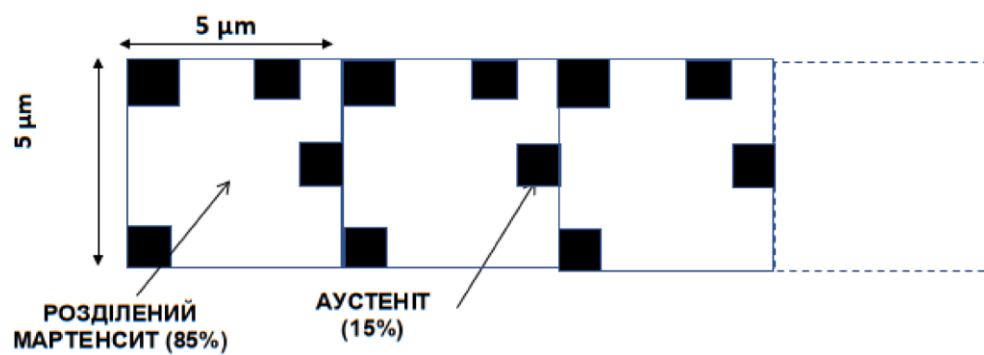
Fig. 8



Фіг. 9



Фіг. 10



Фиг. 11