

УДК 620. 186. 84

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ МІЖФАЗНИХ ГРАНИЦЬ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ $\gamma \rightarrow \alpha$ ПЕРЕТВОРЕННІ

СУХОМЛИН Г. Д.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ЛАУХІН Д. В.<sup>2</sup>, *д.т.н., проф.*,  
БЕКЕТОВ О. В.<sup>3</sup>, *к.т.н, доц.*,  
МАШКОВСЬКА А.В.<sup>4</sup> *магістр.*

<sup>1</sup> кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: g\_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5840-169X

<sup>2</sup> кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: ldv@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

<sup>3</sup> кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

<sup>4</sup> кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: mashkovskaya93@mail.ru, ORCID ID: orcid.org/0000-0003-4809-7019

**Анотація. Мета.** Визначення величини питомої поверхневої енергії (натягу) міжфазних і внутріфазних границь, що формуються при дифузійному  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворенні по перерізу товстого листа з низьковуглецевої мікролегованої сталі 10Г2ФБ. **Методика.** Використання рівняння Янга для аналізу потрійних стиків. **Результати.** Проведений комплекс досліджень дозволив встановити, що на формування перлітної складової доєвтектоїдної сталі оказують вплив міжфазні границі аустеніт-ферит. Навпаки, границі між феритними компонентами перлітних колоній не впливають на поверхневу енергію границь між перлітом та феритом, так як ці границі виникли вже після того, як сформувались потрійні стики між границями аустеніт-ферит. **Наукова новизна.** Встановлення впливу поверхневої енергії границь на формування кінцевої структури металопрокату із низьковуглецевих мікролегованих сталей. **Практична значимість.** Коригування режимів виробництва металопрокату для будівельних металевих конструкцій. Можливість підвищення комплексу механічних властивостей металевих конструкцій за рахунок отримання в структурі нанорозмірних елементів.

**Ключові слова:** структура, тонка структура, поверхнева енергія, міжфазні границі, перлітні колонії, колонії квазіевтектоїду.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИИ

СУХОМЛИН Г. Д.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ЛАУХИН Д. В.<sup>2</sup>, *д.т.н., проф.*,  
БЕКЕТОВ А. В.<sup>3</sup>, *к.т.н, доц.*,  
МАШКОВСКАЯ А.В.<sup>4</sup>, *магистр.*

<sup>1</sup> кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: g\_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

<sup>2</sup> кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: ldv@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

<sup>3</sup> кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

<sup>4</sup> кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: mashkovskaya93@mail.ru, ORCID ID: orcid.org/0000-0003-4809-7019

**Аннотация. Цель.** Определение величины удельной поверхностной энергии (натяжения) межфазных границ, формирующихся при диффузионном  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении, по сечению толстого листа из низкоуглеродистой микролегированной стали 10Г2ФБ; **Методика.** Использование уравнения Янга для анализа тройных стыков. **Результаты.** Проведенный комплекс исследований позволил установить, что на формирование перлитной составляющей доэвтектоидной стали оказывают влияние межфазные границы аустенит-феррит. И напротив, границы между ферритными компонентами перлитных колоний не влияют на поверхностную энергию границ между перлитом и ферритом, так как эти границы возникли уже после того, как сформировались тройные стыки между границами аустенит-феррит. **Научная новизна.** Установление влияния поверхностной энергии границ на формирование конечной структуры металлопроката низкоуглеродистых микролегированных сталей. **Практическая значимость.** Корректировка режимов производства металлопроката для строительных металлических конструкций. Возможность повышения комплекса механических свойств металлических конструкций за счет получения в структуре наноразмерных элементов.

*Ключевые слова:* структура, тонкая структура, поверхностная энергия, межфазные границы, перлитные колонии, колонии квазиэвтектоида.

## **DEVELOPMENT SURFACE ENERGY OF INTERPHASE GRAIN BOUNDARIES AT DIFFUSION $\gamma \rightarrow \alpha$ TRANSFORMATION**

### **Транслитерация**

SUKHOMLIN G. D.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

LAUKHIN D. V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BEKETOV A. V.<sup>2</sup>, *Ph. D., Assos. prof.*,

MASHKOVSKA A.V. *master.*

**SUMMARY. Purpose.** Determination of the specific surface energy (tension) of interphase borders, formed by the diffusion  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation, over the cross section of a thick sheet of low carbon micro-alloyed steel 10G2FB; **Methodology.** Using the Yang equation for the analysis of triple junctions. **Findings.** Research efforts revealed that interphase boundaries of the austenite-ferrite have an impact on the formation of pearlite component of low carbon steel. Conversely, the boundary between the ferrite components of pearlite colonies have no effect on surface energy of the boundaries between ferrite and perlite, since these borders have arose after the triple junctions were formed between the boundaries of the austenite-ferrite. **Originality.** The establishment of influence of the surface energy of the borders on the formation of the final structure of metal rolling of low carbon micro-alloyed steels **Practical value.** Adjustment modes of production of rolled metal products for building metal constructions. The ability to improve complex of mechanical properties of metal constructions by obtaining in the structure nanoscale elements.

*Keywords:* structure, the fine structure, surface energy, interphase boundaries, pearlite colonies quasievtectoid colony..

### **Вступ**

Внутрифазні та міжфазні границі є важливими елементами мікроструктури більшості промислових металевих матеріалів. Дослідження останніх років показали, що границі зерен не безструктурні, не однорідні, а побудовані з різноманітних атомних конфігурацій, які повідомляють границям, а, отже, і полікристалам, різні механічні та фізико-хімічні властивості [1-3]. У ряді робіт показано, що від структури границь зерен істотно залежать багато властивостей полікристалічних матеріалів, зокрема, корозійна стійкість, характер міжкристалітного руйнування, кінетика фазових перетворень тощо [2-5].

Поверхнева енергія в значній мірі визначає форму сформованої структури, роботу утворення нової фази, міцність твердих тіл, поверхневі явища, капілярні явища, стійкість дисперсних систем та ін.

З іншого боку, на шліфах низьковуглецевих сталей з ферито-перлітною основою границі між ферритом і перлітом можна вважати такими, що виникають між

доевтектоїдної феритом і аустенітом. Дійсно, до тих пір, поки аустенітний «острівець» не розпадеться з утворенням групи колоній перліту, його периферійні границі є міжфазними - аустеніто-феритними, а їх питома поверхнева енергія залежить від атомної структури границі між кристалами двох фаз. Тільки після фазового перетворення границі аустеніт-ферит перетворюються в границі між перлітом та феритом [8].

### **Мета**

Визначення величини питомої поверхневої енергії (натягу) міжфазних і внутріфазних границь, що формуються при дифузійному  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворенні по перерізу товстого листа з низьковуглецевої мікролегованої сталі 10Г2ФБ.

### **Матеріал**

У якості матеріалу для дослідження була обрана низьковуглецева мікролегована сталь 10Г2ФБ товщиною 40мм, яку було вироблено за технологічною схемою контрольованої прокатки.

Дослідження структури та властивостей границь здійснювалися по перерізу товстого листа.

Досліджувана сталь має наступний хімічний склад відсотк. масс.: C-0,09; Mn-1,4 Si-0,23; S-0,01; P-0,014; Al-0,044; V-0,086; Ti-0,019; Nb-0,05; N<sub>2</sub>-0,006; Fe-ост. Комплекс механічних властивостей (у стані поставки) досліджуваної марки сталі:  $\sigma_B=670$  МПа,  $\sigma_T=570$  МПа,  $\delta_2=36\%$ ,  $KCV^{60}=156$  Дж/см<sup>2</sup>. Підготовку зразків для металографічних та електронно-мікроскопічних досліджень здійснювалася згідно рекомендацій [11, 12].

### Методика та результати

Проведений комплекс металографічних досліджень показав, що на поверхні зразка формується ферито-перлітна структура (рис. 1 а-в).

Зерна фериту мають правильну поліедричну форму.

Сумісний аналіз структури на поверхні та четверті зразку показав зменшення швидкості охолодження, що призвело до збільшення розмірів колоній перліту (рис. 1 а, б).

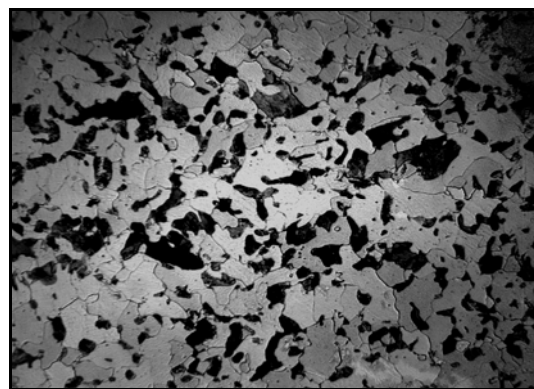
Металографічний аналіз у центральній частині зразка показав подальше збільшення розмірів колоній (рис. 1 в), що пояснюється зменшенням коефіцієнту дифузії і, як наслідок, збільшенням концентраційного градієнту вуглецю шляхом зменшення відстані між пластинками. Крім того, переохолодження полегшує зародження, так що в цілому ці фактори прискорюють перетворення [9]. Зі збільшенням швидкості охолодження евтектоїдна структура стає більш дисперсною.

З метою детального аналізу структурних складових, що сформувалися в процесі фазових перетворень, був проведений комплекс електронно-мікроскопічних досліджень тонкої структури. Результати проведеного комплексу досліджень наведено на рис. 2 а-в.

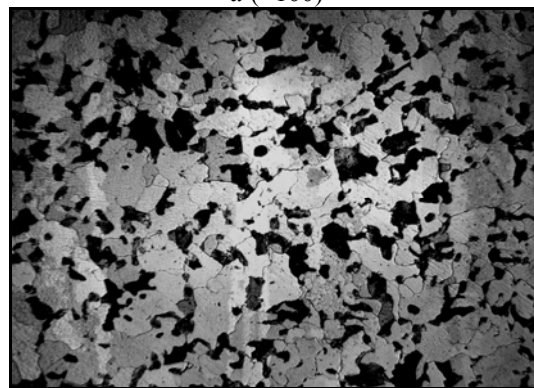
Аналізуючи розподіл структурних складових по перетину листа від поверхні до центру, можна спостерігати порушення паралельності пластинок фериту і цементиту, що свідчить про зниження швидкості охолодження металу.

Аналіз результатів проведеного комплексу досліджень дозволив встановити, що формування структурних складових перліту відбувалося шляхом поступового зростання цементиту і фериту у вигляді рівновісних утворень згідно моделі, запропонованої у роботах [2, 9].

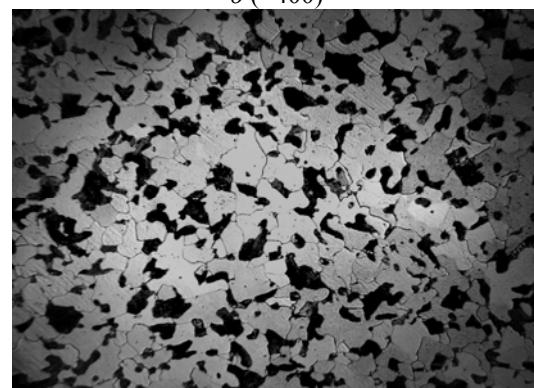
У деякий момент на границях зерен виникають зародки цементиту, які ростуть у вигляді пластинок всередину зерна. На поверхні кожної пластини цементиту, як на підкладці, кристалізується ферит, що сприяє збагаченню цієї ділянки аустеніту залізом [9, 11]. Зростання пластини фериту викликає збагачення вуглецем сусідньої ділянки аустеніту, полегшуючи появу нового зародка цементиту. Таким чином, позмінна перекристалізація цементиту і фериту поширюється вздовж границь зерна аустеніту [3].



а (×100)



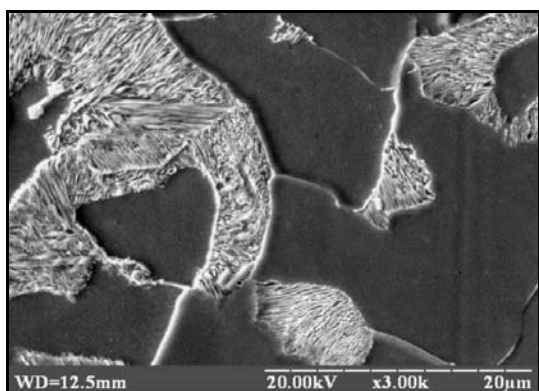
б (×400)



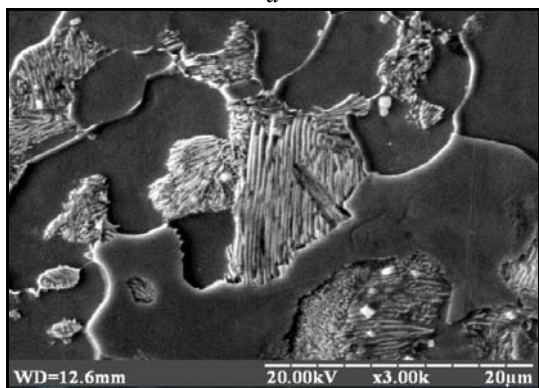
в (×400)

Рис. 1. Структура сталі 10Г2ФБ в стані поставки: а - поверхня; б - 1/4 товщини зразка; в - середина зразка / Structure of steel 10G2FB in the able to supply a - surface; b - 1/4 thickness of the sample; in - the middle of the sample

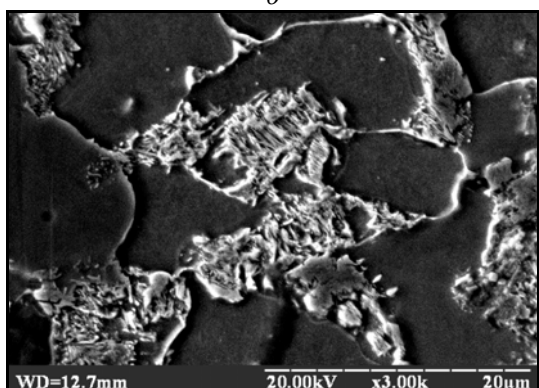
Таким чином, проведений комплекс досліджень дозволив встановити, що формуванням перлітної структури управляють два фактори: швидкість зародження і швидкість росту. Зародки з'являються на границях аустенітних зерен, де виконується умова мінімальної енергії поверхні розділу, а потім ростуть в аустенітну фазу. У безпосередній близькості перших цементітних пластинок аустеніт збагачується вуглецем і в результаті утворюється суміжний шар фериту. Вміст вуглецю в сусідніх областях аустеніту при цьому збільшується і з'являється новий цементитний зародок.



а



б



в

Рис. 2. Тонка структура сталі 10Г2ФБ: а - поверхня; б - 1/4 товщини зразка; в - середина зразка. / Fine structure of steel 10G2FB: a - surface; b - 1/4 thickness of the sample; in - the middle of the sample

Отже, при формуванні феритто-перлітної структури важливу роль відіграють границі зерен. Припускаючи, що перлітна складова починає формуватися на вже існуючих границях ферит-аустеніт було досліджено енергію та тип таких границь згідно методики, запропонованої у роботі [8]. Експериментальні вимірювання кутів здійснювали згідно картосхеми, наведеної на рис. 3.

Типові приклади аналізованих потрійних стиків наведено на рис. 4 а-в.

З урахуванням того, що максимальна величина поверхневої енергії границі розділу ферит-перліт приблизно дорівнює 780 ерг/см<sup>2</sup>, на підставі рівняння

Янга (1) здійснювався розрахунок поверхневої енергії залишившихся границь в потрійному стикі:

$$\frac{\gamma_1}{\sin \alpha_1} = \frac{\gamma_2}{\sin \alpha_2} = \frac{\gamma_3}{\sin \alpha_3} \quad (1)$$

Аналізуючи рівняння (1), можна припустити, що найбільшу поверхневу енергію буде мати кут з найменшим значенням в потрійному стикі. Прийmemo його величину за 780 ерг/см<sup>2</sup> і підставивши це значення в рівняння (1) визначимо дві останні невідомі поверхневі енергії.

На підставі проведеного комплексу досліджень були побудовані гістограми розподілу кутів за частотою (а) і розподіл значень поверхневої енергії за частотою (б), які приведено на рис. 5.

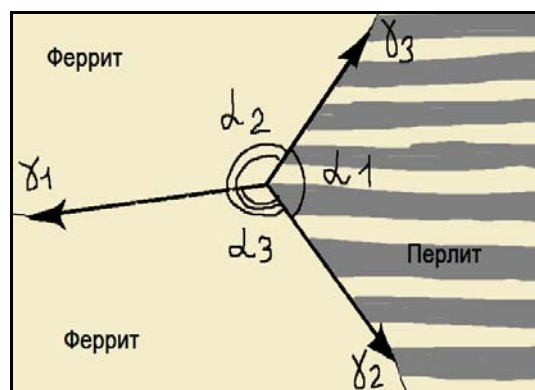


Рис. 3. Схема розрахункових критеріїв для визначення поверхневої енергії міжфазних границь розділу. / The scheme of the calculation criteria for the determination of the surface energy of the interphase boundaries

Аналіз побудованих гістограм показує наявність максимальної частоти кутів розорієнтації в діапазоні від 110° до 140°, що відповідає розрахунковому значенню поверхневої енергії в діапазоні 725..890 ерг/см<sup>2</sup>.

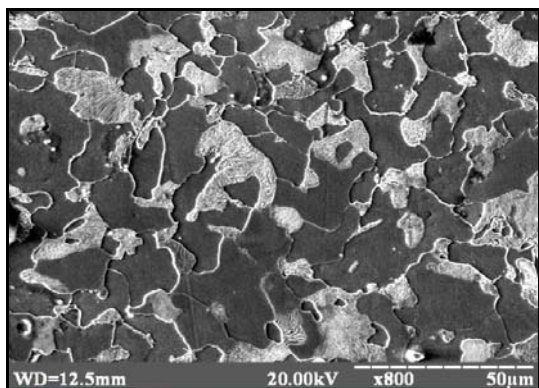
Спільний аналіз рис. 4-5 показує, що границі між феритними компонентами перлітних колоній не впливають на границі між перлітом та феритом. Це свідчить про те, що ці границі виникли вже після того, як сформувались потрійні стики між границями аустеніт-ферит. Таким чином, саме такі границі повинні відображати співвідношення між силами поверхневого натягу границь аустеніт-ферит, та ферит-ферит.

Проведений підрахунок доли спеціальних границь у сталі 10Г2ФБ показав, що відносна кількість спеціальних границь: у середини 16%. Кількість спеціальних границь зі зменшенням відстані до поверхні зменшується. Це призводить до появи анізотропії структури по перетину зразку і, як наслідок, к анізотропії властивостей.

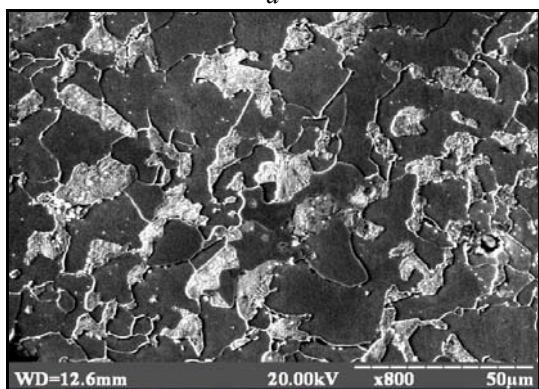
#### Результати

Проведений комплекс досліджень дозволив встановити, що на формування перлітної складової доєвтектоїдної сталі оказують вплив міжфазні границі аустеніт-ферит. Навпаки, границі між феритними

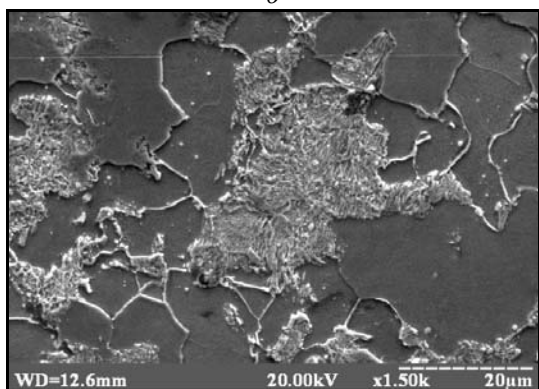
компонентами перлітних колоній не впливають на поверхневу енергію границь між перлітом та феритом, так як ці границі виникли вже після того, як сформувались потрійні стики між границями аустеніт-ферит.



*a*



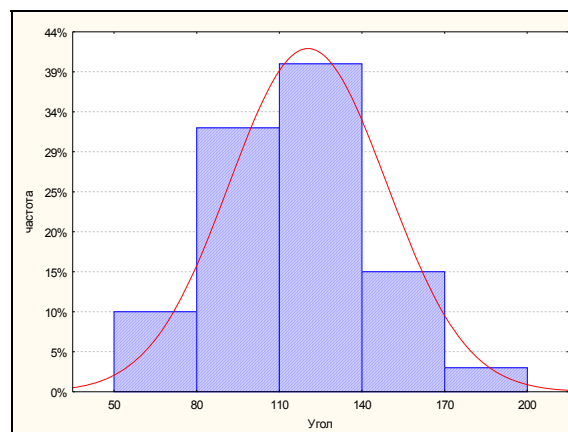
*б*



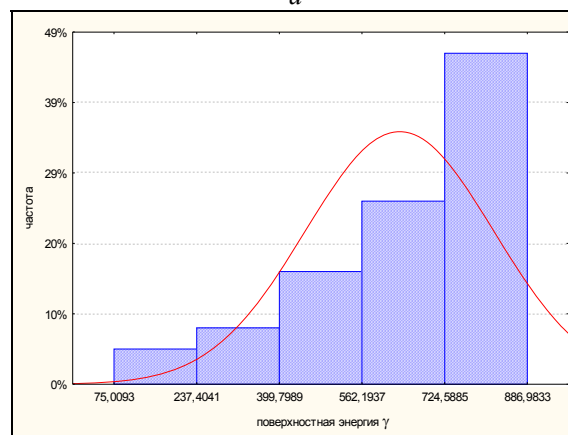
*Рис. 4. Аналізовані потрійні стики Ф-Ф-П: а - поверхня; б - 1/4 товщини зразка; в - середина зразка/Considered triple junctions F-F-P: a - surface; b - 1/4 thickness of the sample; c - the middle of the sample*

#### Наукова новизна та практична значимість

Спільне використання методів дослідження тонкої структури металопрокату та аналітичного визначення поверхневої енергії міжфазних границь дає можливість коригувати режими виробництва з метою отримання металопрокату для будівельних металевих конструкцій з підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей.



*a*



*б*

*Рис. 5. Гістограми розподілу кутів в потрійних стиках (а) і відповідно поверхневої енергії (б) / Histograms of distribution angles at triple junctions (a) and the corresponding surface energy (b)*

#### Висновки

1. Аналіз структурних змін по перерізу зразків (від поверхні до центру) дозволив встановити збільшення розмірів перлітних колоній внаслідок збільшення концентраційного градієнту вуглецю та зменшення міжпластиночної відстані.
2. Встановлено порушення паралельності пластинок фериту і цементиту в колоніях квазіевтектоїду, які формуються у різних шарах товстого листа. Цей факт пояснюється зниженням швидкості охолодження металу по перерізу листа (від поверхні до центру).
3. Аналіз результатів досліджень тонкої структури дозволив встановити, що формування структурних складових перліту відбувалося шляхом поступового зростання цементиту і фериту у вигляді рівновісних утворень.
4. Проведений комплекс досліджень дозволив встановити, що на формування перлітної складової доєвтектоїдної сталі оказують вплив міжфазні границі аустеніт-ферит. Навпаки, границі між зернами фериту та феритними складовими

перлітних колоній не впливають на поверхневу енергію границь між перлітом та феритом, так як ці границі виникли вже після того, як сформувались потрібні стики між границями аустеніт-ферит.

5. Аналіз отриманих гістограм показує наявність максимальної частоти кутів розорієнтації в діапазоні від 110° до 140°, що відповідає розрахунковому значенню поверхневої енергії в діапазоні 725..890 ерг/см<sup>2</sup>.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Косевич В.М., Ієвлев В.М., Палатник Л.С., Федоренко А.І. Структура межкристалітних і межфазних границь. М.: Металлургия, – 1980, – 256 с.  
Kosevich V.M., Ievlev V.M., Palatnik L.S., Fedorenko A.I. Struktura mezhkristallitnyh i mezhfaznyh granits. M. Metallurgiya, – 1980, – 256 s.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/647674/>
2. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей (пре. с англ.). М.: Металлургия, 1982. – 184с.  
Pikering F.B. Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka staley (pre. s angl.). M.: Metallurgiya, 1982. – 184p.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/1047403/>
3. Мейл Р. Ф., Хәгель У. К. Аустенитно-перлитное превращение / В кн. «Успехи физики металлов». Пер. с англ. М.: Металлургиздат, – 1960, – С. 86 – 156.  
Meyl R. F., Khagel' U. K. Austenitno-perlitnoe prevrashchenie / V kn. «Uspekhi fiziki metallov». Per. s angl. M.: Metallurgizdat, – 1960, – P. 86 – 156.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://u-i-n.com.ua/ru/catalog\\_main/](http://u-i-n.com.ua/ru/catalog_main/)
4. Евтеев А.В., Ієвлев В.М., Косилов А.Т., Прижимов А.С. Релаксированная атомная структура межфазной границы в гетеросистеме полусферическая наночастица-кристалл. // ФТТ – 2007, Т. 49, вып. 4, – С. 745-650.  
Evtsev A.V., Ievlev V.M., Kosilov A.T., Prizhimov A.S. Relaksirovannaya atomnaya struktura mezhfaznoy granitsy v geterosisteme polusfericheskaya nanochastitsa-kristall. // FTT – 2007, T. 49, vupr. 4, – S. 745-650.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ntb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:426667/Source:default#>
5. Howe J.M., Aaronson H.I., Hirth J.P. Aspects of interphase boundary structure in diffusional phase transformations.//Acta mat. -2000. Vol. 48. – P. 3977-3984.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.researchgate.net/profile/James\\_Howe/publication/222524406\\_Aspects\\_of\\_interphase\\_boundary\\_structure\\_in\\_diffusional\\_phase\\_transformations/links/0f31753b8342eead32000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/James_Howe/publication/222524406_Aspects_of_interphase_boundary_structure_in_diffusional_phase_transformations/links/0f31753b8342eead32000000.pdf)
6. Smith C.S. Microstructure // Trans AIME, – 1948, – Vol. 175,– P. 15-21.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11661-010-0215-5#page-1>
7. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, – 1977, – 238 с.  
Kurdyumov G.V., Utevskiy L.M., Entin R.I. Prevrashcheniya v zheleze i stali. M.: Nauka, – 1977, – 238 s.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/1051184/>
8. Стародубовские чтения 2013. Поверхностная энергия межфазных  $\gamma \rightarrow \alpha$  границ при диффузионном превращении аустенита / Г.Д. Сухомлин // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 67 - Дн-вск., ПГАСА, 2013.- С. 7-11. рис. 4. –Библиогр.: (7 назв.).  
Starodubovskie chteniya 2013. Poverhnostnaya energiya mezhfaznyh  $\gamma \rightarrow \alpha$  granits pri diffuzionnom prevrashchenii austenita / G.D. Suhomlin // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauch. trudov. Vyp. 67 - Dn-vsk., PGASA, 2013.- S. 7-11. ris.4. –Bibliogr.: (7 nazv.).  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences/starodubov/archive/referats%20of%20starodubov%202013-67.pdf>
9. Бунин К.П., Бунина Ю.К., Мазур В.И. // О зарождении и строении перлита. /МіТОМ, – 1971, № 10, – С. 6 – 7.  
Bunin K.P., Bunina Yu.K., Mazur V.I. // O zarozhdenii i stroenii perlita. /MіТОМ, – 1971, № 10, – С. 6 – 7.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://himlib.ru/index.php?book=11&page=273>
10. Спири́н Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.  
Spirin N.A. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo eksperimenta / N.A. Spirin, V.V. Lavrov. – Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2004. – 257 s.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/69980/>
11. Смолмен Р. Современная металлография / Р. Смолмен, К. Ашби. - М.: Атомиздат, 1970. – 208 с.  
Smolmen R. Sovremennaya metallografiya / R. Smolmen, K. Ashbi. - M.: Atomizdat, 1970. – 208 p.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ntb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:508003/>
12. Большаков В.И., Сухомлин Г.Д., Лаухин Д.В. Атлас структур металлов и сплавов. Дн-ск: ГВУЗ «ПГАСиА», 2010. – 174с.  
Bol'shakov V.I., Sukhomlin G.D., Laukhin D.V. Atlas struktur metallov i splavov. Dn-sk: GVUZ «PGASiA», 2010. – 174 p.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/1065794/>
13. Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента / Фадеев М.А. – Нижний Новгород: Из-во Нижегородского госуниверситета, 2002. – 108 с.  
Fadeev M.A. Elementarnaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta / Fadeev M.A. – Nizhniy Novgorod: Iz-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta, 2002. – 108 s.  
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/75787/>

*Статья рекомендована к публикации Д-РОМ ТЕХН. НАУК, ПРОФ. Вахрушевой В. И. (Украина); д-ром техн. наук, проф. Сухомлиным Г. Д. (Украина)*

Поступила в редколлегію 14.05.2015