

УДК 620.186.84

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250918.41.397

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА ПЕРВИЧНОГО АУСТЕНИТА ПО ДИСПЕРСНОСТИ ПРОДУКТОВ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

СУХОМЛИН Г. Д.^{1*}, д. т. н., проф.,
 ДЕЙНЕКО Л. Н.², д. т. н., проф.,
 НАДТОКА В. Н.³ к. т. н., вед. н. с.,
 БОРИСЕНКО А. Ю.⁴, к. т. н., с. н. с.,
 ДЕРГАЧ Т. А.⁵, д. т. н., доц.

^{1*} Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473;

² Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

³ Конструкторское бюро «Южное», ул. Криворожская, 3, Днепро, Украина, тел. +38 (067) 632-39-45, e-mail: vnadtoka@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9653-5127

⁴ Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

⁵ Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID 0000-0003-0235-5342

Аннотация. *Цель работы* – создание новой методики, позволяющей простым способом определить эффективный диаметр первичного зерна аустенита и морфологию мартенситного зернограничного строения закалённых на речный мартенсит малоуглеродистых сталей. *Методики.* Используются методы теоретического, кристаллографического, стереографического и топологического анализов и количественная металлография. *Результаты исследований.* Показано, что границы между кристаллами мартенсита в пакетах и между пакетами могут быть низкоэнергетическими с довольно крупными элементарными гранями, через которые проникают дислокации при переходе линий скольжения от одного зерна к другому. *Научная новизна.* Впервые установлена взаимосвязь между размерами мартенситных пластин и размером бывшего аустенитного зерна. *Практическое значение.* Разработанная методика может быть использована в исследовательских целях и в промышленных условиях металлургического и прокатного производств.

Ключевые слова: металлографическая методика; мартенсит; размер зерна аустенита

МЕТАЛОГРАФІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРУ ЗЕРНА ПЕРВИННОГО АУСТЕНІТУ ПО ДИСПЕРСНОСТІ ПРОДУКТІВ МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

СУХОМЛИН Г. Д.^{1*}, д. т. н., проф.,
 ДЕЙНЕКО Л. М.², д. т. н., проф.,
 НАДТОКА В. М.³ к. т. н., пр. н. с.,
 БОРИСЕНКО А. Ю.⁴, к. т. н., с. н. с.,
 ДЕРГАЧ Т. О.⁵, д. т. н., доц.

^{1*} Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473;

² Національна металургійна академія України, пр. Гагарина, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

³ Конструкторське бюро «Південне», вул. Криворізька, 3, Дніпро, Україна, тел. +38(067) 632-39-45, e-mail: vnadtoka@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9653-5127

⁴ Національна металургійна академія України, пр. Гагарина, 4, 49600, Дніпро, Україна тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

⁵ Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID 0000-0003-0235-5342

Анотація. Мета роботи – створення нової методики, що дозволяє способом визначити ефективний діаметр первинного зерна аустеніту і морфологію мартенситної зернограничної будови загартованих на рейковий мартенсит маловуглецевих сталей. **Методики.** Використані методи теоретичного, кристалографічного, стереографічного і топологічного аналізів і кількісна металогія. **Результати.** Показано, що границі між кристалами мартенситу в пакетах і між пакетами можуть бути низькоенергетичними з досить великими елементарними гранями, через які проникають дислокації під час переходу ліній ковзання від одного зерна до іншого. **Наукова новизна.** Уперше встановлено взаємозв'язок між розмірами мартенситних пластин і розміром колишнього аустенітного зерна. **Практичне значення.** Розроблена методика може бути застосована в дослідницьких цілях і в промислових умовах металургійного і прокатного виробництв.

Ключові слова: металогія методика; мартенсит; розмір зерна аустеніту

METALLOGRAPHIC DETERMINATION OF THE SIZE OF GRAIN OF PRIMARY AUSTENITIS IN DISPERSION OF THE PRODUCTS OF MARTENSITE TRANSFORMATION

SUKHOMLYN H.D.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 DEINEKO L.M.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 NADTOKA V.M.³, *Cand. Sc. (Tech.) Lead. Res. Worker*,
 BORYSENKO A.Yu.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
 DERHACH T.O.⁵, *Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

^{1*} SHEI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevskoho St., 24-A, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlyn@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

³ “Southern” Design Office, Kryvorizska St., 3, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 632-39-45, e-mail: vnadtoka@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9653-5127

⁴ National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

⁵ SHEI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevskoho St., 24-A, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 867-30-97, ta_dergach@i.ua, ORCID ORG 0000-0003-0235-5342

Abstract. The aim of the work is to create a new technique that allows a simple method to determine the effective diameter of austenite primary grain and the morphology of martensitic grain-boundary structure hardened on lath martensite of low-carbon steels. **Techniques.** The methods of theoretical, crystallographic, stereographic and topological analyzes and quantitative metallography were used. **Results.** It is shown that the boundaries between martensite crystals in packages and between packages can be low-energy with rather large elementary faces through which dislocations penetrate when the slip lines pass from one grain to another. **Scientific novelty.** For the first time, a relationship has been established between the sizes of martensitic plates and the size of the former austenitic grain. **Practical value.** The developed technique can be used for research purposes and in the industrial conditions of metallurgical and rolling productions.

Keywords: metallography methodology; martensite; size of grain of austenite

Введение

При експериментальному визначенні зв'язку між структурою та властивостями різних матеріалів звичайною процедурою часто є вимірювання геометричних розмірів на двохмерних зображеннях (шлифах або фотографіях) – для реконструкції тривимірних елементів структури. Ця операція в багатьох випадках визначає точність, чіткість і достовірність даних про ход процесів структуроутворення, параметри яких, як правило, є основою для створення або вдосконалення технологічних процесів, що дають можливість

випускати нові, більш прогресивні види продукції. Прикладом може служити визначення розміру первинного аустенітного зерна в закалених углеродистих сталях, оскільки від його величини в значительній ступені залежать такі важливі для практики властивості, як пластичність, міцність, ударна в'язкість і ряд інших. В сучасних умовах прискореного технічного прогресу застосування традиційних методів визначення розмірів зерен первинного аустеніту стає все більш складним через їх дрібнення. З розвитком інтенсивних технологій підвищеної точності використовуються мелко- і нанокристаллическі матеріали, що характеризуються підвищеною

прочностью, улучшенными физико-химическими свойствами, низкой травимостью.

Металлографическое выявление границ зёрен аустенита в мартенситных структурах осложнено тем, что в результате $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения границы γ/γ полностью исчезают, а на их месте появляются новые, α'/α' границы, структура которых коренным образом отличается от строения границ материнской фазы, что и вносит существенный вклад в свойства закалённых сталей. Таким образом, поскольку от размеров первичного зерна аустенита зависят размерные, топологические и зернограницные параметры структуры реечного мартенсита, экспериментальное исследование структурного состояния закалённой стали логично начинать с изучения морфологических и кристаллографических параметров границ мартенситных реек, пластин и пакетов.

Целью работы явилось создание новой металлографической методики, которая позволила бы без значительных затрат определить эффективный диаметр первичного зерна аустенита и получить сведения о морфологии и зернограницной структуре сталей, закалённых на реечный мартенсит.

Основным **методом исследования** была количественная металлография; используемый инструмент – металлографический микроскоп «Неофот-21». Подготовка шлифов включала в себя в качестве финишных операций электролитическую полировку и химическое травление в 2 % растворе азотной кислоты в этаноле с добавлением 0,2 % технического детергента «Нианол». Теоретические и кристаллографические изыскания выполнены методами векторного анализа и стереографии.

Общие положения, принятые за основу при разработке методики

Размеры кристаллов мартенсита значительно отличаются друг от друга, так как их рост прекращается при столкновении с различными препятствиями. К ним относятся: кристаллы других фаз, неметаллические включения, границы зёрен первичного и остаточного аустенита, а также уже существующие кристаллы мартенсита. Это положение общепризнано и упоминается во многих литературных источниках [1–3].

На основе анализа литературы можно сделать вывод, что между размером аустенитного зерна и размерами мартенситных кристаллов и их групп существуют генетические связи, играющие важную роль в формировании структуры и свойств закалённых сталей. Ниже приведены основные установившиеся закономерности между аустенитом и мартенситом.

1. Во время полиморфного превращения ориентационная связь между кристаллическими γ и α -решётками подчиняется ориентационному соотношению Курдюмова-Закса (ОС К-3) [2]:

$(111)_\gamma \parallel (011)_\alpha$. (при этом $[101]_\gamma \parallel [111]_\alpha$), которое выполняется с точностью до 2...3 градусов.

2. Рост пластины или рейки останавливается при «столкновении» с большеугловыми границами аустенита [1, 2], с ранее образовавшимися пластинами мартенсита или иными препятствиями, крупнее 3 нм.

3. Дислокации, дислокационные сетки ($\theta < 1^\circ$) и малоугловые ($\theta < 3^\circ$) границы, дефекты упаковки, атомы примесных элементов и другие дефекты атомного масштаба ($d \leq 1$ нм) наследуются растущими кристаллами мартенсита в виде дефектов структуры, вносящих поправки в их свойства. Поэтому границы между рейками в пакете являются специальными по структуре и низкоэнергетическими по уровню удельной поверхностной энергии.

4. Рост пластины или рейки сопровождается возникновением *полей напряжений* и их частичная релаксация происходит путём образования дислокаций, удельная плотность которых в обеих фазах ($10^9 \leq \rho \leq 10^{13}$ см⁻²) зависит от степени тетрагональности решетки мартенсита, т. е. от концентрации углерода и легирующих элементов в химическом составе стали. Поэтому рейки при зарождении и росте в пакете располагаются таким образом, что их упругие поля частично компенсируются. Такие группы называют пакетами, они выявляются тем отчётливее, чем ниже содержание углерода и легирующих элементов в химическом составе стали.

5. Теоретический анализ и эксперименты показали [3], что при мартенситном превращении в аустените формируются четыре ориентации пакетов, в каждом из которых габитусной плоскостью служит только одна из четырёх плоскостей $\{111\}_\gamma$, а 6 вариантов реек в этой же плоскости с габитусами $(110)_\alpha$ в пакете повернуты вокруг общей оси $[111]_\gamma \parallel [110]_\alpha$ на такие углы, что между рейками образуются только низкоэнергетические сопряжения $\Sigma 3$, 11, 33 и $\Sigma 129$ по концепции решёток совпадающих узлов [4].

Исследование структуры

Предварительные эксперименты показали относительно высокую дисперсность мартенситных кристаллов, но выявить границы действительного аустенитного зерна методами, рекомендованными в ГОСТ 5639, не удалось. Для анализа дисперсности продуктов мартенситного превращения была предложена методика определения *влияния* действительного γ -зерна на структуру, дисперсность и деформацию мартенсита.

Поскольку надёжно установлено, что максимальная длина первых мартенситных кристаллов не выходит за поперечный размер аустенитного зерна, то на основании анализа максимальной длины мартенситных реек или пластин, можно определить размер аустенитного зерна на выбранном (исследуемом) образце. При этом частично определяется также и распределение

размеров кристаллов мартенсита (от нуля до максимального) внутри одного аустенитного зерна.

Практическая процедура измерения максимальной длины кристаллов мартенсита в общем виде включает в себя следующие основные операции (рис. 1).

1. Получение цифровой фотографии выбранного участка при увеличении не менее $\times 500$ (рис. 1 а).

2. Повышение видимого увеличения и контрастности изображения до уровня, который обеспечивает надежное распознавание отдельных реек (рис. 2 б).

3. Выбор размера и конфигурации представительного участка, на котором будут производиться измерения, и нанесение соответствующей по размеру масштабной линейки.

4. Выбор или изготовление и калибрование в масштабе снимка (см. п. 3) линейки и измерение длины одной или нескольких крупных реек, находящихся внутри отборочного участка или касающихся его внешней границы (рис. 1 в).

5. Выявление среди измеренных реек самой длинной и внесение ее размера в учетную таблицу.

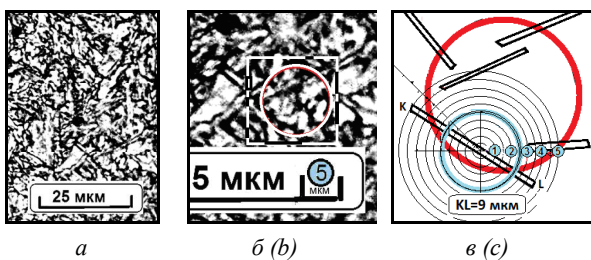


Рис. 1. Набор данных о длине реек: а – фрагмент фотоснимка с масштабной линейкой; б – увеличенный фрагмент рисунка 2 а; в – измеряемое поле, показанное на рисунке 1 а и кольцевая измерительная линейка /

Fig. 1. Collection of data on the length of the lath: а – is a fragment of photograph with a scale bar applied; б – enlarged fragment of figure 1 а; в – the measured field shown in figure 1а and ring gauge

Эти сведения могут быть полезны не только при анализе прочностных и пластических свойств закалённых сталей, но и при исследовании закономерностей, возникающих между кристаллическими системами стальной основы и нанесенного на нее защитного металлического покрытия. Эти связи могут существенно влиять на служебные характеристики эпитаксиальных покрытий.

Преимуществом предложенной методики по сравнению с известными методиками является исключение необходимости проведения специальных обработок – термических, химико-термических и других, требующих затрат времени и применения специального оборудования.

Разработанная методика была опробована на шести образцах стали 38ХНЗМФА, из которых один (№ 6) перед закалкой прошел обработку по режиму

гомогенизационного отжига. Результаты (по 6 измерений в 10 полях зрения на каждом образце) представлены в таблице.

Таблица

Средняя длина мартенситной пластины l_{cp} и пространственный диаметр аустенитного зерна / The average length of the martensitic plate l_{cp} and austenitic grain diameter

Параметр	№ образца					
	1	2	3	4	5	6
l_{cp} , мкм	4,3	13,3	5,1	15,6	4,2	62,5
D_{cp} , мкм	7,6	23,4	8,97	27,5	7,4	110,0

Полученные данные показывают, что максимальную длину рейки (или пластины) можно рассматривать как среднюю хорду l_{cp} в методе секущих. Тогда предложенный способ измерения максимальной длины рейки мартенсита можно считать источником данных для подсчета пространственного диаметра зерна аустенита по формуле К. С. Чернявского [7]:

$$D = 1,76 l_{cp},$$

где l_{cp} – средний размер хорды, полученный при линейном анализе (табл.).

При деформации поведение закалённых сталей во многом определяют размеры, морфология и кристаллографические параметры пакетов и блоков [8], а также монокристаллов – реек или пластин, из которых они составлены [9]. Здесь важно отметить, что пластичность поликристалла – это способность границы генерировать дислокации под действием полей напряжений, создаваемых перед ней дислокационными скоплениями внутри зерна. Если полагать, что генерация дислокаций происходит по механизму Франка–Рида, то для его работы требуется скальвующее напряжение $\tau_{кр} = Gb/l$, где l – расстояние между стопорами, закрепляющими отрезок дислокации (база источника L_{FR}). В отдельном зерне роль этого параметра выполняют края выходной грани зерна (они же являются тройными стыками зернограничной сети).

Пакет пластин. Чтобы проследить, как происходит образование и последующая работа зернограничной сети мартенсита, представим элементарный пакет реек в виде правильной усечённого тетраэдра (рис. 2 а, б), а упрощённую модель идеализированного зерна аустенита – в виде усечённого икосаэдра (рис. 2 в). Тетраэдр – это самый малый правильный полиэдр (рис. 3а) с минимальным количеством исходных элементов: четыре грани, четыре вершины, шесть рёбер. Усечённый вариант тетраэдра в поликристалле удобен тем, что он имеет хорошее отношение объёма к поверхности и огранён плоскостями (111) куба.

Согласно ОС К–3 эти плоскости становятся габитусными (110) α для всего пакета.

На рисунке 2 б показано расположение четырёх первых шестигранных пластин, начинающихся

формировать пакет. Их торцевые участки по экспериментальным наблюдениям [8; 9] имеют толщину t_n в 10...20 раз меньшую поперечника габитусной грани 1–2–3–4–5–6 пакета.

Отметим, что каждая новая пластина зарождается и растёт, подчиняясь трём правилам.

1. Направление роста из шести возможных выбирается такое, чтобы *возникающие* напряжения не были конфликтными с уже *существующими*.

2. Новая граница, возникающая по габитусу $(110)_\alpha$ между новой и предыдущей рейками должна быть низкоэнергетической.

3. Ориентация решётки должна быть по ОС КЗ.

Можно полагать, что последнее условие выполняется «автоматически», если реализуются первые два.

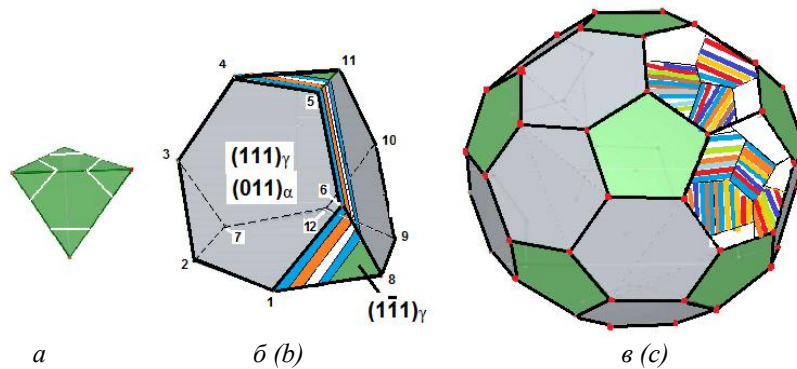


Рис. 2. Формирование пакета реек в виде усечённого тетраэдра: а – исходный тетраэдр; б – формирование внутри тетраэдра пакета из шестиугольных пластин с габитусом $(110)_\alpha$ $\{ (111)_\gamma$; в – зерно аустенита (усечённый икосаэдр), две шестиугольные грани которого «прозрачны». / Fig. 2. Formation of a pack of slats in the form of a truncated tetrahedron: a – is the original tetrahedron; $(111)_\gamma$; inside the tetrahedron; $\{ (111)_\gamma$ b - formation of a package of hexagonal plates with a habit of $(110)_\alpha$; c – austenite grain (truncated icosahedron), whose two hexagonal faces are “transparent”

Если привести в контакт два пакета (рис. 2 б), то возможны три варианта: а) если на плоскость 1–2–3–4–5–6 ляжет подобная ей плоскость 2–3–4–5–6–1, то результатом будет специальная низкоэнергетическая граница в концепции РСУ с базой $L_{FR} = 3-5$; б) если на плоскости 1–2–3–4–5–6 ляжет подобная ей плоскость 5–6–8–9–10–11, то возникнет полосчатая поверхность с расстояниями между границами равными толщине пластин $t_n \approx 0,5$ мкм, а база $L_{FR} \approx 5t_n$; в) на плоскости 1–8–6 ложится плоскость 4–5–11, на образовавшемся контактном участке возникает сетка из пересекающихся торцевых участков межреечных границ, в которой ширина ячейки и база $L_{FR} \approx 1t_n$ почти равны между собой и соизмеримы с толщиной пластины t_n . Каждая ячейка в такой межпакетной сети является специальной границей в концепции РСУ, низкоэнергетической, но по уровню удельной поверхностной энергии несколько выше, чем энергия границы между рейками в пакете.

Границы аустенита. Полагая, что рёбра тетраэдра и рёбра усечённого икосаэдра равны между собой, можно показать, что объём аустенитного зерна (рис. 2 в) может быть заполнен двадцатью

Наблюдения показывают, что внешние очертания пакета реек могут быть очень сложными, но представленные здесь примеры на полиэдрах адекватно отражают принципы развития структур мартенситного превращения.

Межпакетные границы. В принципе «межпакетные границы» не существуют, а существуют «границы между рейками (пластинами), принадлежащими разным пакетам». С учётом этого парадокса рассмотрим, какие конфигурации возникают во время взаимодействия групп параллельных реек под названием «пакеты».

(и более) тетраэдрическими пакетами. На рисунке 2 в две грани аустенитного зерна оставлены «прозрачными» и сквозь них можно видеть рейки и пакеты, соприкасающиеся с этими гранями. На рисунке 3 показаны схемы зернограницных структур граней двух разных зёрен аустенита.

Мартенситное превращение создало на гранях бывшего аустенита новую систему границ, которые все являются произвольными, с высоким уровнем удельной поверхностной энергии, а большая половина из них имеют грани с линейными размерами меньшими толщины первичной пластины, то есть база источника Франка-Рида у них мала и составляет $L_{FR} \approx 1t_n < 1$ мкм (см. рис. 3 в). Очевидно, что такие границы не только не пропускают дислокации, но и создают их мощные скопления во внутренних объёмах перед межпакетными и высокоэнергетическими (аустенитными) границами.

Таким образом, на тех местах, где до начала превращения были большеугловые произвольные границы зёрен аустенита, в результате превращения возникают новые полиэдры α' -фазы, грани которых не пропускают потоков дислокаций из-за подавления их источников.

Во время деформации движущиеся дислокации сравнительно легко проникают сквозь межречные границы, так как они низкоэнергетические и у них большие L_{FR} . При этом часть дислокаций оседает на межпакетных границах и ещё больше – на мартенситных границах, сменивших первичные границы аустенита.

При достижении критических степеней деформации упрочняющие дислокации леса внутри зёрен блокируют прохождение скользящих дислокаций через тело зерна, и они начинают работать на распространение межзёрненного разрушения.

Если начальное зерно аустенита было большим, оно вмещает больше межпакетных границ, насыщение внутризёрненных объёмов дислокациями наступает раньше и зернограницные трещины зарождаются на более ранних стадиях деформации.

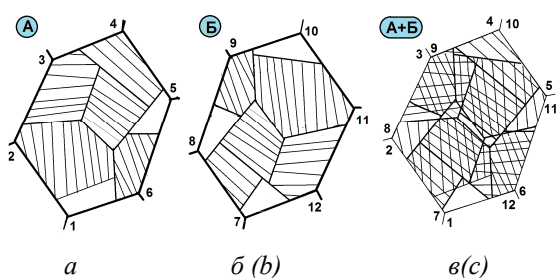


Рис. 3. Расположения границ реек на гранях аустенит.: а – грань зерна А; б – грань зерна В; в – структура между бывшими гранями А и В аустенита / Fig. 3. The layout of the boundaries of the rails on the edges. a – grain A face; b – grain B face;

c – overlap of diagrams a and b, grain structure between grains A and B of austenite

Крупные зёрна аустенита имеют меньшую кривизну и меньше изломов, поэтому хрупкие трещины распространяются вдоль них свободнее. Мелкое зерно аустенита содержит, в основном, речные структуры со специальными, более «прозрачными» границами, перед которыми значительные скопления дислокаций не образуются, поэтому возможность зарождения трещин снижается, ударная вязкость и общая пластичность повышаются.

Выводы

1. На основе теоретического анализа и кристаллографических и металлографических исследований разработана оригинальная методика определения исходного аустенитного зерна, предшествующего мартенситному превращению в углеродистых сталях.

2. Методика не требует применения дорогостоящего оборудования и может быть использована в исследовательской и производственной практике.

3. Установлено, что границы между кристаллами мартенсита в пакетах и между пакетами могут быть низкоэнергетическими с разными типоразмерами граней, через которые по-разному проникают дислокации при переходе линий скольжения от одного зерна к другому.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Превращения в железе и стали : монография / [Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин]. – Москва : Наука, 1977. – 237 с.
2. Über das Mechanismus den Stahlhartung / [G.V. Kurdyumov, G. Sachs] // G. Zeit. Phys. – 1930. – Vol. 64. – 325 p.
3. Сухомлин Г. Д. Большеголовые низкоэнергетические границы в мартенситных структурах доэвтектидных сталей / Г. Д. Сухомлин // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – № 8. – С. 1109–1122.
4. Атомная структура межзёрненных границ : сб. стат. под ред. А. Н. Орлова. – Москва : Мир, 1978. – С. 87–113.
5. Чернявский К. С. Стереология в металловедении : монография / К. С. Чернявский. – Москва : Мир, 1977. – 280 с.
6. Сухомлин Г. Д. Специальные границы между пакетами низкоуглеродистого мартенсита / Г. Д. Сухомлин // Металлознавство та термічна обробка металів. – 2012. – № 4 (63). – С. 38–42.
7. Morsdorf L. Multiple mechanisms of lath martensite plasticity / L. Morsdorf, O. Jeannin, D. Barbier, M. Mitsuhashi, D. Raabe, C. C. Tasan // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 121. – Pp. 202–214.
8. Morito S. Effect of block size on the strength of lath martensite in low carbon steels / S. Morito, H. Yoshida, T. Maki, X. Huang // Mater. Sci. Eng. – A (2006). – Pp.438–440.

REFERENCES

1. Kurdyumov G.V., Utevskiy L.M. and Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow : Nauka, 1977, 237 p. (in Russian).
2. Kurdyumov G.V. and Sachs G. Über das Mechanismus den Stahlhartung. *Zeit. Phys.*, 1930, vol. 64, 325 p. (in German).
3. Sukhomlyn H.D. *Bolsheuglovyye nizkoenergeticheskiye granitsy v martensitnykh strukturakh doevtektoidnykh staley* [High-angle low-energy boundaries in martensitic structures of hypoeutectoid steels]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Newest Technologies]. 2013, no. 8, pp. 1109–1122. (in Russian).
4. *Atomnaya struktura mezhzherennykh granits* [Atomic structure of intergrain boundaries]. Edited by A.N. Orlova. Moscow : Mir, 1978, pp. 87–113. (in Russian).
5. Chernyavskiy K.S. *Stereologiya v metallovedenii* [Stereology in metallurgy]. Moscow : Mir, 1977, 280 p. (in Russian).
6. Sukhomlyn H.D. *Spetsialnyye granitsy mezhdu paketami nizkouglerodistogo martensita* [Special boundaries between packets of low carbon martensite]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and thermal treatment of metals]. Dnipropetrovsk, 2012, no. 4 (63), pp. 38–42. (in Russian).

7. Morsdorf L., Jeannin O., Barbier D., Mitsuahara M., Raabe D. and Tasan C. Multiple mechanisms of lath martensite plasticity. *Acta Materialia*, 2016, vol. 121, pp. 202–214.
8. Morito S., Yoshida H., Maki T. and Huang X. Effect of block size on the strength of lath martensite in low carbon steels. *Materials of Science and Engineering, A* (2006), pp. 438–440.

Поступила в редакцию 25.07.2018.
Принята к печати 19.08.2018.

УДК 620.193:621.93.3

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.250918.47.398

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕДИ И ОЛОВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

КУШНИР Ю. А.¹, *ассист.*,
ВНУКОВ А. А.^{2*}, *к. т. н., доц.*,
ГОЛОВАЧЕВ А. Н.³, *к. т. н., доц.*,
КОВЗИК А. Н.⁴, *к. т. н., доц.*

¹ Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 900-05-81, e-mail: yuliakushnir79@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3659-4501

^{2*} Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 138-33-59, e-mail: alvnukov74@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1888-1200

³ Кафедра электрометаллургии, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 201-44-40, e-mail: golartem@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4813-6586

⁴ Кафедра покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Национальная металлургическая академия Украины, 49600, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 481-00-10, e-mail: anatoliykovzik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-6381

Аннотация. *Цель.* Обеспечение высокой коррозионной стойкости при сохранении требуемых эксплуатационных и функциональных свойств сварочной проволоки путем нанесения химически осажденных металлических покрытий. *Методика.* Исследовали коррозионную стойкость различных типов металлических покрытий, нанесенных методом контактного химического осаждения на стальную сварочную проволоку марки Св-08Г2С: медное покрытие толщиной 0,6 мкм, два вида оловянных покрытий, отличающихся по толщине (0,3 и 0,6 мкм), и комплексное оловянно-медное покрытие толщиной 0,8 мкм. Назначение данных покрытий – повышение электропроводности сварочной проволоки и ее защита от коррозии. Коррозионные испытания проводили в соляном тумане, при повышенной влажности и температуре, а также в естественных атмосферных условиях. В качестве показателей для оценки коррозионной стойкости покрытий использовали массовый показатель коррозии и степень коррозионного поражения поверхности. Для оценки степени коррозионного поражения использовали средства оптической микроскопии. *Результаты.* Наибольшей коррозионной стойкостью среди всех рассмотренных покрытий обладает медное. Это связано, во-первых, с его достаточно большей толщиной, а во-вторых, с характером поведения гальванопары медь – железо в условиях воздействия сред, приводящих к электрохимической коррозии. Достаточно высокая коррозионная стойкость комплексных медь-оловянных покрытий может быть объяснена только большой толщиной и удовлетворительными плотностью и сплошностью покрытия. Однако их защитная способность значительно ниже, чем у чисто медных покрытий. Антикоррозионные свойства оловянных покрытий очень низкие. Некоторый рост защитной способности луженой проволоки наблюдается только в случае значительного повышения толщины покрытия, что должно обеспечивать его сплошность. При невысоких значениях толщины покрытия оловом его коррозионная стойкость ниже, чем у проволоки без покрытия. Таким образом, наиболее эффективным покрытием сварочной проволоки, обеспечивающим не только ее коррозионную стойкость, но и повышенную электропроводность, является медное покрытие, толщиной 0,5...1 мкм. *Научная новизна.* Впервые определены закономерности поведения химически осажденных покрытий на основе меди и олова на поверхности сварочной проволоки в различных коррозионных средах. *Практическая значимость.* Практическое значение полученных результатов состоит в том, что определены наиболее эффективные виды металлических покрытий, нанесенных методом химического осаждения из растворов для защиты сварочной проволоки от коррозии. Антикоррозионная защита с применением таких видов покрытий позволяет не только повысить срок хранения и транспортировки сварочной проволоки, но улучшить ее функциональные и эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: сварочная проволока; химическое осаждение; омеднение; лужение; коррозионная стойкость; электрохимическая коррозия