

УДК 669-1:51-74:519.257

ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КВАЗИЭВТЕКТОИДА ОТ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹ *д.т.н., проф.*,
ЛАУХИН Д. В.² *д.т.н., проф.*,
БЕКЕТОВ А. В.³ *к.т.н, доц.*,
ТЮТЕРЕВ И. А.⁴ *к.т.н, доц.*

¹ 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) 47-59-51, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² 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) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ 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) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ 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) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

Аннотация. *Цель.* Построение регрессионных моделей, описывающих изменение параметров квазиэвтектоида и твердости от скорости охлаждения аустенита низкоуглеродистых низколегированных сталей. *Методика.* В качестве материала для настоящего исследования была выбрана низкоуглеродистая низколегированная сталь 09Г2С. Исследовались структура, тонкая структура и твердость данной стали после различных лабораторных обработок. На основании полученных данных построены регрессионные модели взаимосвязи между параметрами перлитной структуры и твердости от режима термической обработки (скорости охлаждения). *Результаты.* Проведенный комплекс исследований показал изменения параметров перлитной составляющей структуры стали 09Г2С в зависимости от скорости охлаждения. При этом, не выявлено значительных изменений в морфологии ферритной составляющей. Получены регрессионные модели взаимосвязи межпластинчатого расстояния в перлите и твердости от скорости охлаждения. *Научная новизна.* Для стали 09Г2С установлено количественную связь между параметрами перлитной составляющей (межпластинчатое расстояние) и свойствами (твердость). *Практическая значимость.* Понимание механизмов структурных изменений и получение количественных закономерностей, описывающих процесс формирования структурных составляющих, позволит управлять структурой и свойствами готового металлопроката для строительных металлических конструкций.

Ключевые слова: структура; тонкая структура; межпластинчатое расстояние; регрессионные модели; квазиньютоновский метод остатков

ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНІЙ МОДЕЛІ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ КВАЗІЕВТЕКТОІДА ВІД ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹ *д.т.н., проф.*,
ЛАУХИН Д. В.² *д.т.н., проф.*,
БЕКЕТОВ О. В.³ *к.т.н, доц.*,
ТЮТЕРЕВ І. А.⁴ *к.т.н, доц.*

¹ 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) 47-59-51, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² 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) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ 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) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ 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) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

Анотація. Мета. Побудова регресійних моделей, що описують зміну параметрів квазіевтектоїда і твердості від швидкості охолодження аустеніту низьковуглецевих низьколегованих сталей. **Методика.** В якості матеріалу для дослідження була обрана низьковуглецева мікролегована сталь 09Г2С. Досліджувалися структура, тонка структура і твердість даної сталі після різних лабораторних обробок. На підставі отриманих даних побудовані регресійні моделі взаємозв'язку між параметрами перлітної структури і твердості від режиму термічної обробки (швидкості охолодження). **Результати.** Проведений комплекс досліджень показав зміни параметрів перлітної складової структури сталі 09Г2С залежно від швидкості охолодження. При цьому, не виявлено значних змін у морфології феритної складової. Отримано регресійні моделі взаємозв'язку міжпластинчастої відстані в перліті і твердості від швидкості охолодження. **Наукова новизна.** Для сталі 09Г2С встановлено кількісний зв'язок між параметрами перлітної складової (міжпластинчаста відстань) і властивостями (твердість). **Практична значимість.** Розуміння механізмів структурних змін та отримання кількісних закономірностей, що описують процес формування структурних складових, дозволить управляти структурою і властивостями готового металопрокату для будівельних металевих конструкцій.

Ключові слова: структура; тонка структура; міжпластинчаста відстань; регресійні моделі; квазіньютонівський метод записків

OBTAINED REGRESSION MODEL OF DEPENDENCE CHANGES IN THE PARAMETERS OF PERLITE ON THE COOLING RATE

Транслитерация

BOLSHAKOV V. I.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
LAUKHIN D. V.² *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BEKETOV A. V.³ *Ph. D., Assos.prof.*,
TYUTEREV I. A.⁴ *Ph. D., Assos.prof.*

Annotation. Purpose. Construction of regression models describing the change of parameters kvazievtektoida and hardness of the cooling rate of the austenite low-carbon low-alloy steels. **Methodology.** The material for this study was selected low-carbon low-alloy steel 09G2S. The structure, fine structure and hardness of the steel after different treatments laboratory. Based on these data the regression model of the relationship between the parameters and the hardness of the pearlite structure by heat treatment conditions (cooling rate). **Findings.** Research efforts showed change the pearlite structure of the steel component 09G2S depending on the cooling rate. Thus, it is not revealed significant changes in the morphology of the ferrite component. Obtained regression model of the relationship interlamellar distance in pearlite and hardness of the cooling rate. **Originality.** Steel 09G2S established a quantitative relationship between the parameters of pearlite component (interlamellar distance) and properties (hardness). **Practical value.** Understanding the mechanisms of structural changes and to obtain quantitative laws describing the formation of structural components, enables you to control the structure and properties of the finished metal products for the construction of metal structures.

Keywords: structure; The fine structure; interlamellar distance; regression models; quasi-Newton method residues

Введение

Перлит является одной из основных структурных составляющих подавляющего большинства строительных сталей, поэтому изучению его строения и свойств уделяется много внимания [1-3]. В реальных перлитных колониях строение как цементитной, так и ферритной составляющей определяется условиями протекания превращения, которые обеспечиваются технологическими параметрами производства. Использование ускоренного охлаждения (в эвтектоидной области превращения) приводит к увеличению скорости роста перлитных колоний, межпластиночные расстояния уменьшаются, цементитные пластины становятся тоньше и насыщаются дефектами, количество углерода (цементита) в единице объема

снижается – образуется перлитоподобная структура – квазіевтектоид, который является характерной структурной составляющей большинства низкоуглеродистых низьколегованих сталей для строительных металлических конструкций. Его свойства могут существенно отличаться от классического перлита, поскольку меняется соотношение толщин ферритных и цементитных пластин, и, как следствие, геометрические размеры самой колонии. В связи с этим, понимание механизмов происходящих при этом структурных изменений и получение количественных закономерностей, описывающих данный процесс, позволит более осознанно управлять структурой и свойствами продукции.

Цель

Таким образом, целью настоящей работы являлось построение регрессионных моделей описывающих изменение параметров квазиэвтектоида и твердости от скорости охлаждения аустенита низкоуглеродистых низколегированных сталей.

Материал

В качестве материала для настоящего исследования была выбрана низкоуглеродистая низколегированная сталь 09Г2С следующего химического состава: С-0,11; Мп-1,40; Si-0,55; S-0,016; Р-0,014; Cr-0,3; Ni-0,15; Cu-0,20; Ti-0,003; As-0,03; N-0,01; Mo-0,03; V-0,009; Nb-0,006; Fe-ост. Комплекс механических свойств (в состоянии поставки) исследуемой марки стали: $\sigma_B=514$ МПа, $\sigma_T=376$ МПа, $\delta_5=29\%$, $KCV^{60}=125$ Дж/см².

Методика и результаты

Для получения заданного структурного состояния образцы подвергались лабораторной термической обработке, которая включала:

- нагрев до температуры 980°C;
- выдержку при данной температуре из расчета $t_{мин}$ на 1мм сечения;
- охлаждение образцов со скоростями, соответствующими образованию доэвтектоида для данной марки стали. Выбор скоростей охлаждения основывался на данных работы [4].

Исследование структуры осуществлялось согласно рекомендациям, приведенным в [5, 6] с применением металлографических методов анализа и просвечивающей электронной микроскопии.

Определение количественных зависимостей между скоростью охлаждения образцов и параметрами колоний квазиэвтектоида производили согласно рекомендациям работы [7].

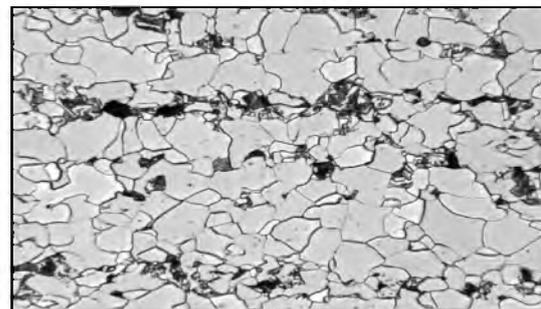
При выполнении количественного анализа использовался программный комплекс STATISTICA 7.0 [8].

Анализ результатов работы [4] показывает, что для стали 09Г2С перлитные структуры образуются в интервале скоростей охлаждения 0,04...2°C/сек.

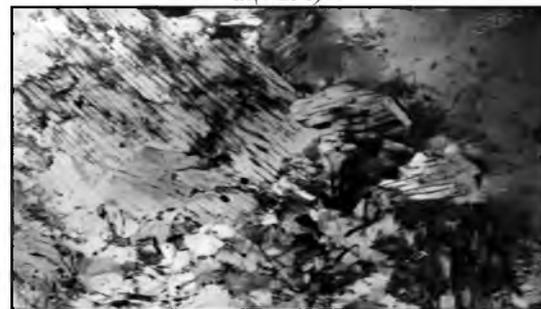
Основными составляющими микроструктуры стали после охлаждения со скоростью 0,04°C/сек (рис. 1 а, б) являются полиэдрический феррит и перлит. Ферритные зерна с небольшой плотностью дислокаций разделены малоугловыми границами (угол разориентировки между соседними областями по обе стороны от границ порядка 1°). Перлитные области состоят из нескольких перлитных колоний (рис. 1 б), перлит тонкопластинчатый (выделения цементита имеют форму тонких пластин). Цементит в квазиэвтектоиде содержит дефекты.

Структура стали 09Г2С после охлаждения со скоростью 0,15°C/сек представлена на рис. 2 а, б. В этом случае, также как и в предыдущем, основными

структурными составляющими микроструктуры являются полиэдрический феррит и перлит. Ферритные зерна разделены малоугловыми границами, внутри зерен наблюдаются очень мелкие выделения карбонитридов ванадия и ниобия (рис. 2 а). Однако во внутренней структуре ферритных зерен присутствуют отличия: плотность дислокаций в некоторых зернах выше относительно остальных (рис. 2 б). Перлитные области также состоят из перлитных колоний, разориентированных между собой, на что указывает электронномикроскопический контраст. Перлит преимущественно тонкопластинчатый, но в структуре присутствуют участки с раздробленными пластинками цементита.



а (×250)



б (×15000)

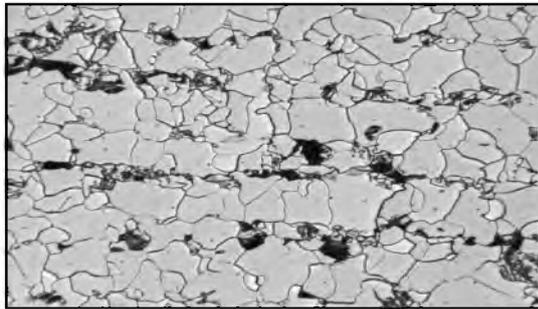
Рис. 1. Микроструктура стали 10Г2ФБ после охлаждения со скоростями 0,04 °C/сек /
Microstructure of the steel 10Г2ФБ after cooling at 0,04 °C/s

После охлаждения стали 09Г2С со скоростью 0,9°C/сек в ее микроструктуре появляются новая структурная форма – бейнит (рис. 3 а, б). Появление бейнитной составляющей свидетельствует о том, что при данной скорости охлаждения начинаются процессы, приводящие к локальному снижению диффузионной активности углерода. Как следствие, диффузионные потоки не проникают на большие расстояния, что приводит к ужесточению условий образования квазиэвтектоида.

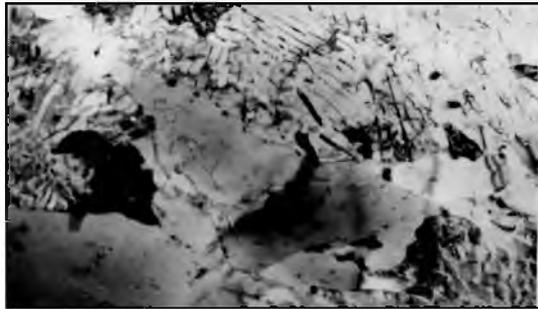
Полиэдрический феррит и перлит (рис. 3 а, б) не изменяют своего морфологического строения. При этом, плотность дислокаций в ферритных зернах практически одинакова.

Дальнейшее увеличение скорости охлаждения приводит к значительному подавлению диффузионного механизма превращения аустенита. Как следствие, в структуре металла вместо

перлитной составляющей начинает преобладать бейнитная (рис. 4 а, б).

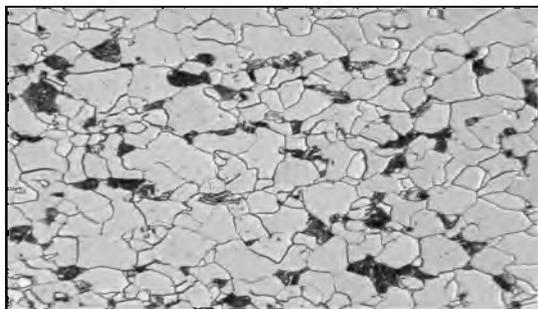


а (×250)

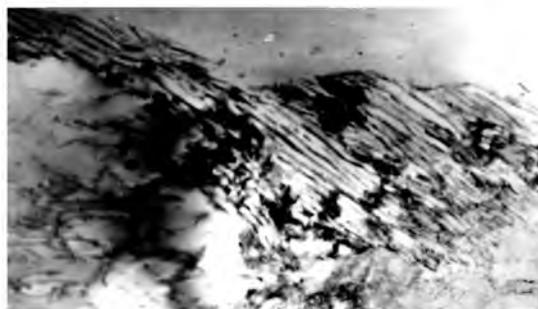


б (×17000)

Рис. 2. Микроструктура стали 10Г2ФБ после охлаждения со скоростями 0,15 °С/сек / Microstructure of the steel 10G2FB after cooling at 0,15 °C/s

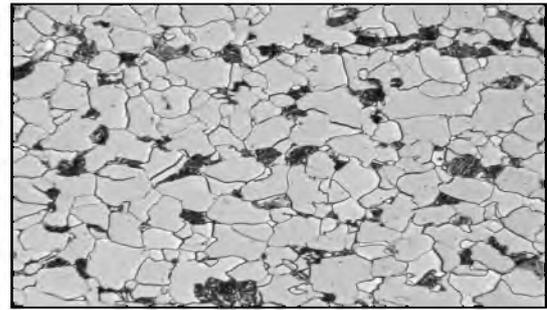


а (×250)

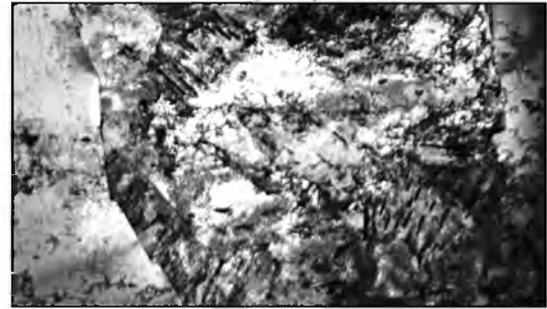


б (×20000)

Рис. 3. Микроструктура стали 10Г2ФБ после охлаждения со скоростями 0,9 °С/сек / Microstructure of the steel 10G2FB after cooling at 0,9 °C/s



а (×250)



б (×10000)

Рис. 4. Микроструктура стали 10Г2ФБ после охлаждения со скоростями 2 °С/сек / Microstructure of the steel 10G2FB after cooling at 2 °C/s

Незначительное количество перлитной фазы оказывается зажатой между зернами феррита (рис. 4 б). При этом, характерной особенностью данной структуры является то, что практически не наблюдаются межфазные границы перлит/бейнит. Это свидетельствует о том, что аустенитные зерна, которые в результате формирования доэвтектоидного феррита обогатились углеродом, могут превращаться по двум равноправным механизмам – бейнитному или эвтектоидному.

С целью определения количественной взаимосвязи параметров колонии квазиэвтектоида и твердости соответствующих образцов от скорости охлаждения была проведена статистическая обработка экспериментальных значений согласно работам [9-11].

Для каждой скорости охлаждения измерялось межпластинчатое расстояние в перлитной колонии и соответствующая твердость. Данные проведенного статистического анализа обобщены и представлены в табл. 1.

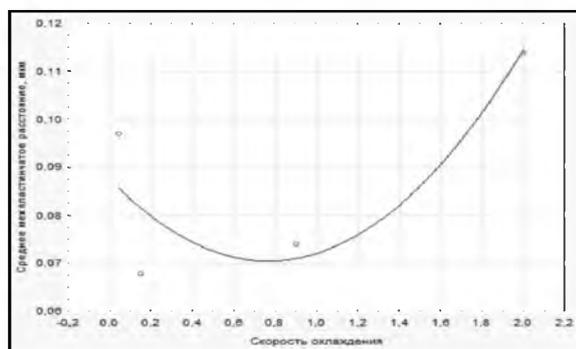
Анализ приведенных данных показывает, что все исследуемые значения с достоверностью 95% описываются нормальным распределением и, следовательно, могут подвергаться последующей обработке с целью построения математической модели [12, 13].

На рис. 5 а приведен график зависимости межпластинчатого расстояния от скорости охлаждения. Проведенный анализ показывает, что зависимость имеет полиномиальный характер и описывается уравнением: $S_0 = b_0 + b_1 \times V + b_2 \times V^2$ где b_0 , b_1 , b_2 – значимые коэффициенты, определяемые из уравнения регрессии.

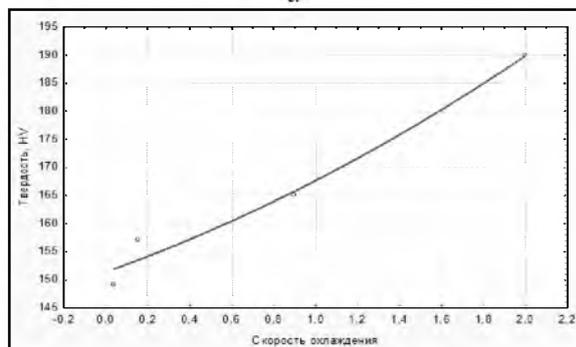
Таблица 1

Статистический анализ результатов измерения межпластинчатого расстояния (S_0) в перлитной колонии и твердости для всех исследуемых скоростей охлаждения / Microstructure of the steel after 10G2FB ohlaStatisticheskyy analysis of measurement results interlamellar distance (S_0) in the pearlite colonies and hardness for all the studied cooling rates

$V_{\text{охл}}$, °C/сек	Число измерений	Среднее, мкм	Медиана, мкм	Минимум, мкм	Максимум, мкм	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
Размер перлитных колоний (D)							
0,04	10	0,097	0,100	0,070	0,120	0,0003	0,0171
0,15	10	0,068	0,070	0,050	0,090	0,0002	0,0139
0,9	10	0,074	0,080	0,050	0,100	0,0003	0,0184
2	10	0,114	0,100	0,100	0,150	0,0004	0,0207
Твердость, HV							
0,04	10	149	149	140	158	54,00	7,3485
0,15	10	157	157	150	164	23,56	4,8534
0,9	10	165	165	160	170	8,44	2,9059
2	10	190	190	186	194	6,67	2,5820



а



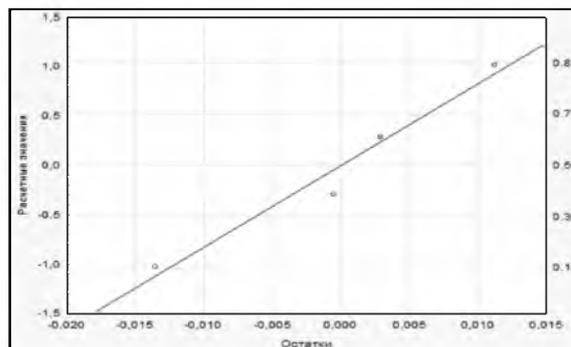
б

Рис. 5. Полученные регрессионные модели: а – зависимость межпластинчатого расстояния от скорости охлаждения; б – зависимость твердости от скорости охлаждения / the resulting regression models: а - interlamellar distance dependence of the cooling rate; б - the hardness and the cooling rate

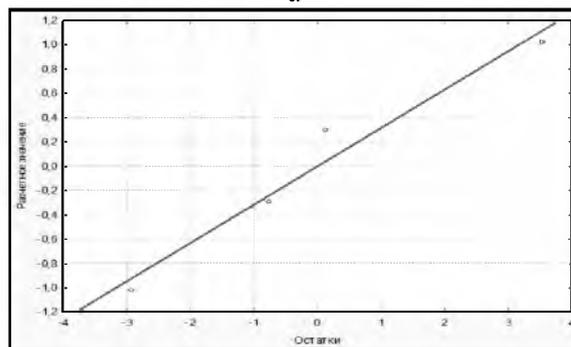
На рис. 5 б приведен график зависимости твердости от скорости охлаждения. Полученная регрессионная модель позволила определить, что зависимость также имеет полиномиальный характер и описывается уравнением: $S_0 = b_0 + b_1 \times V + b_2 \times V^2$ где b_0, b_1, b_2 – значимые коэффициенты, определяемые из уравнения регрессии.

Для проверки адекватности полученных моделей был применен квазинытоновский метод остатков. На рис. 6 а, б приведены графики распределения остатков на нормальной вероятностной бумаге для каждой из полученных моделей. Анализ графиков показывает, что, для обеих моделей, остатки с достаточной степенью точности ложатся на прямую, соответствующую нормальному закону распределения. Поэтому гипотеза о нормальном распределении ошибок принимается.

На рис. 7 а, б приведены графики распределения остатков. Из графиков следует, что, для обеих моделей, остатки хаотично разбросаны на плоскости и в их поведении нет закономерностей. Это свидетельствует о том, что остатки некоррелированы между собой. Следовательно, можно сделать вывод о том, что регрессионные модели достаточно адекватно описывают исследуемые зависимости.



а



б

Рис. 6. Проверка адекватности модели. График распределения остатков на нормальной вероятностной бумаге: а – зависимость межпластинчатого расстояния от скорости охлаждения; б – зависимость твердости от скорости охлаждения / Checking the adequacy of the model. Schedule distribution of residues on normal probability paper: а - interlamellar distance dependence of the cooling rate; б - the hardness and the cooling rate

Совместный анализ полученных результатов показал, что регрессионные модели описываются одинаковой зависимостью. Это может свидетельствовать о существовании функциональной зависимости между значениями твердости и межпластинчатого расстояния в колониях перлита.

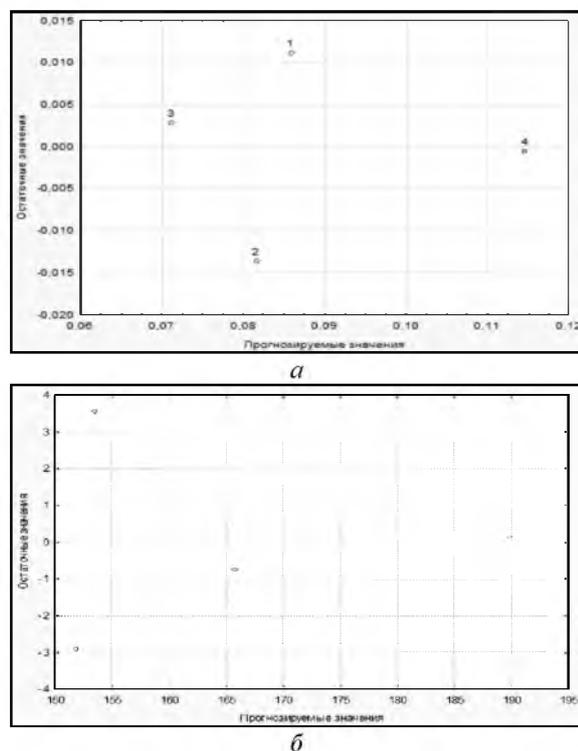


Рис. 7. Проверка адекватности модели.

Распределение остатков: а – зависимость межпластинчатого расстояния от скорости охлаждения; б – зависимость твердости от скорости охлаждения /
Checking the adequacy of the model. Distribution residues: a - interlamellar distance dependence of the cooling rate; b - the hardness and the cooling rate

Результаты

Проведенный комплекс исследований показал изменения параметров перлитной составляющей структуры стали 09Г2С в зависимости от скорости охлаждения. При этом, не выявлено значительных изменений в морфологии ферритной составляющей. Получены регрессионные модели взаимосвязи межпластинчатого расстояния в перлите и твердости от скорости охлаждения.

Научная новизна и практическая ценность

Для стали 09Г2С установлено количественную связь между параметрами перлитной составляющей (межпластинчатое расстояние) и свойствами (твердость). Понимание механизмов структурных изменений и получение количественных закономерностей, описывающих процесс формирования структурных составляющих, позволит управлять структурой и свойствами готового

металлопроката для строительных металлических конструкций.

Выводы

1. Проведенный комплекс исследований показал, что при охлаждении стали 09Г2С со скоростями 0,04...0,9°С/сек в структуре металла присутствуют доэвтектоидный феррит и перлитная составляющая, которую можно классифицировать как квазиэвтектоид. Ферритные зерна имеют разную плотность дислокаций и разделены малоугловыми границами (угол разориентировки между соседними областями по обе стороны от границ порядка 1°). Области квазиэвтектоида состоят из нескольких перлитных колоний, выделения цементита в которых имеют форму тонких пластин и содержит дефекты роста.

2. При охлаждении стали 09Г2С со скоростью 2°С/сек в структуре металла совместно с доэвтектоидным ферритом и перлитом появляется бейнит. Незначительное количество перлитной фазы оказывается зажатым между зернами феррита. При этом, характерной особенностью данной структуры является то, что практически не наблюдаются межфазные границы перлит/бейнит.

3. Микроструктурный анализ показал, что параметры ферритной фазы для всех исследуемых скоростей охлаждения остаются практически неизменными. Это свидетельствует о том, что увеличение твердости с увеличением скорости охлаждения объясняется изменением в строении квазиэвтектоида.

4. Полученная регрессионная модель зависимости среднего межпластинчатого расстояния в колонии перлита от скорости охлаждения имеет полиномиальный характер и описывается уравнением: $S_0 = b_0 + b_1 \times V + b_2 \times V^2$.

5. Полученная регрессионная модель зависимости твердости от скорости охлаждения имеет полиномиальный характер и описывается уравнением: $S_0 = b_0 + b_1 \times V + b_2 \times V^2$.

6. Совместный анализ полученных регрессионных моделей показывает, что изменение твердости и межпластинчатого расстояния в перлитной колонии описывается одинаковой зависимостью. Этот факт подтверждает предположение о функциональной зависимости между значениями твердости и параметрами квазиэвтектоида (межпластинчатого расстояния).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Пикеринг Ф.Б. Физическое материаловедение и разработка сталей (пре. с англ.). М.: Металлургия, 1982. – 184с.
1. Pikerin F.B. Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka staley (pre. s angl.). M.: Metallurgiya, 1982. – 184p.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1047403/>

2. Мейл Р. Ф., Хагель У. К. Аустенитно-перлитное превращение / В кн. «Успехи физики металлов». Пер. с англ. М.: Metallurgizdat, – 1960, – С. 86 – 156.

Meyl R. F., Khagel' U. K. Austenitno-perlitnoe prevrashchenie / V kn. «Uspekhi fiziki metallov». Per. s angl. M.: Metallurgizdat, – 1960, – Р. 86 – 156.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://u-i-n.com.ua/ru/catalog_main/

3. 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.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://himlib.ru/index.php?book=11&page=273>

4. Понов А.А., Понова Л.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. М.: Metallurgiya, 1965. – 495 с.

Porov A.A., Porova L.E. Izotermicheskie i termokinetichekie diagrammy raspada pereokhlazhdennogo austenita. M.: Metallurgiya, 1965. – 495 p.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lib-bkm.ru/load/88-1-0-1406>

5. 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.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ntb.misis.ru:591/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:508003/>

6. 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.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1065794/>

7. Большаков В.И. Методика построения регрессионных моделей зависимостей основных механических свойств толстолистового проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей от температуры конца горячей деформации // В.И. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухин, А.В. Бекетов, А.В. Мурашкин, Н.В. Сахник, А.А. Кривцова / Новини науки Придніпров'я. – №1, 2. – 2011. – С. 83-96

Bol'shakov V.I. Metodika postroeniya regressionnykh modeley zavisimostey osnovnykh mekhanicheskikh svoystv tolstolistovogo prokata iz nizkouglerodistykh mikrolegirovannykh staley ot temperatury kontsa goryachey deformatsii // V.I. Bol'shakov, G.D. Sukhomlin, D.V. Laukhin,

A.V. Beketov, A.V. Murashkin, N.V. Sakhnik, A.A. Krivtsova / Novini nauki Pridniprov'ya. – №1, 2. – 2011. – S. 83-96

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=939238

8. <http://www.statsoft.ru>

9. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных / Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

Ayvazyan S.A. Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh / Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. – M.: Finansy i statistika, 1983. – 471 s.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=936697>

10. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений / Сизиков В.С. – Санкт-Петербург: Специальная литература, 1999. – 240 с.

Sizikov V.S. Ustoychivye metody obrabrtki rezul'tatov izmereniy / Sizikov V.S. – Sankt-Peterburg: Spetsial'naya literatura, 1999. – 240 s.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/43165/>

11. Фадеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента / Фадеев М.А. – Нижний Новгород: Из-во Нижегородского государственного университета, 2002. – 108 с.

Fadeev M.A. Elementarnaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta / Fadeev M.A. – Nizhniy Novgorod: Iz-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta, 2002. – 108 s.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/75787/>

12. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

Spirin N.A. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenerного eksperimenta / N.A. Spirin, V.V. Lavrov. – Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2004. – 257 s.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/69980/>

13. Антонец И.В. Математическая обработка результатов эксперимента / И.В.Антонец, Н.В. Еремин. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 21 с.

Antonets I.V. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta / I.V.Antonets, N.V. Eremin. – Ulyanovsk: UGTU, 2004. – 21 s.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/789424/>

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.С. Вахрушевою (Україна), д-ром. фіз.-мат. наук, проф. Ю.І. Дубровим (Україна)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015