

На правах рукописи



Лукин Юрий Станиславович

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
В СВЕРХНИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ, ЛЕГИРОВАННЫХ
ТИТАНОМ, ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОТЖИГЕ**

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2012

Работа выполнена в Липецком государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Чеглов Александр Егорович

Официальные оппоненты: Борсяков Анатолий Сергеевич
доктор технических наук, профессор,
Воронежский государственный
университет инженерных технологий,
заведующий кафедрой естественных
дисциплин

Моляров Валерий Георгиевич
кандидат технических наук, доцент,
ООО «РАН КОМПЛЕКТ», начальник
отдела материаловедения и коррозии

Ведущая организация: ООО «ВИЗ-Сталь», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится « 31» мая 2012 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.01 при Юго – Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго – Западного государственного университета.

Автореферат разослан «27» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.105.01



Лушников
Борис Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Объем производства автомобилей во всем мире с каждым годом увеличивается. Высокая конкуренция на автомобильном рынке требует от производства качественных легковых и грузовых машин с умеренной ценой, доступной для конечных потребителей.

Одним из методов снижения себестоимости автомобиля является снижение его массы за счет применения новых материалов в кузовах автомобилей. Мировые автопроизводители требуют от металлургических предприятий штампуемый стальной лист с определенным комплексом механических и физических свойств.

При производстве автомобилей в последние годы широко применяются высокоштампуемые сверхнизкоуглеродистые стали, легированные титаном или (и) ниобием, так называемые IF-стали (interstitial free – без атомов внедрения). При производстве IF-сталей используется следующая стандартная технология:

- выплавка (с обезуглероживанием при вакуумировании) и разливка;
- горячая прокатка полос на толщину от 1,5 мм до 6 мм;
- холодная прокатка с суммарными обжатами от 55 до 85 %;
- рекристаллизационный отжиг в линиях агрегатов непрерывного отжига (АНО) или колпаковых печах;
- дрессировка.

Степень суммарной деформации при холодной прокатке и рекристаллизационный отжиг IF-сталей являются одними из ключевых технологических процессов, влияющих на получение готовой продукции с высоким комплексом потребительских свойств.

Холодная прокатка осуществляется на бесконечных станах типа «тандем», реверсивных станах и т.д.

Рекристаллизационный отжиг рулонов холоднокатаных полос IF-сталей может проводиться как в линиях АНО, так и в колпаковых печах. В условиях АНО процессы возврата, выделения избыточных фаз и рекристаллизации на всех участках полосы протекают с практически одинаковой скоростью. В результате готовая сталь имеет равномерное распределение структуры и механических свойств по длине и ширине полосы. Таким образом, по сравнению с колпаковыми печами отжиг в АНО обеспечивает получение комплекса механических свойств и совершенной кристаллографической текстуры, необходимых для качественной холодной штамповки. Один из путей улучшения качества стального листа при одновременной экономии энергоресурсов и увеличении производительности оборудования – управление технологическими операциями с помощью математических моделей процессов структурообразования.

Цель работы: совершенствование управления производством IF-стали для получения автомобильного листа с высоким уровнем штампуемости посредством изучения закономерностей формирования структуры и текстуры в процессе производства и создание математической модели прогнозирования конечных свойств металлопроката.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить средство контроля структурных изменений в IF-стали во время непрерывной термической обработки;
- исследовать кинетику рекристаллизации, закономерности формирования структуры и текстуры в процессе отжига холоднодеформированной IF-стали типичного химического состава;
- разработать математическое описание кинетики рекристаллизации холоднокатаной стали и изменения размера зерна феррита при первичной рекристаллизации в процессе промышленного отжига в АНО;
- выполнить анализ структурообразования и разработать принципы совершенствования температурно-скоростного режима рекристаллизационного отжига в АНО (с использованием автоматического управления, основанного на полученной математической модели).

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

- установлены и количественно описаны закономерности формирования зеренной структуры феррита при отжиге IF-сталей в агрегатах непрерывного отжига (АНО);
- разработаны методики для прогноза размера зерна феррита и кинетики рекристаллизации IF-сталей после непрерывного отжига с использованием метода измерения коэрцитивной силы;
- построена обобщенная диаграмма кинетики рекристаллизации холоднокатаных IF-сталей в виде границ структурных состояний сталей (наклепанное, частично рекристаллизованное, рекристаллизованное) в координатах «температура» – «время отжига» – «степень холодной деформации». Разработано математическое описание кинетики рекристаллизации холоднокатаных IF-сталей в процессе отжига;
- определен режим обработки (относительные обжатия при холодной прокатке выше 80 % и температура отжига в линии АНО выше 825 °С), обеспечивающий формирование благоприятной кристаллографической текстуры для холодной штамповки IF-стали;
- установлены зависимости влияния химического состава стали, технологических параметров горячей прокатки для последующего отжига полосы в линии АНО (температуры после черновой группы клетей, температуры после чистовой группы клетей, температуры смотки в рулон), холодной прокатки (относительные обжатия при холодной прокатке), непрерывного отжига (температура и время отжига) на механические свойства (предел текучести, предел прочности и относительное удлинение) IF-сталей, легированных титаном;
- разработан режим отжига IF-стали в АНО, обеспечивающий снижение энергозатрат при ее производстве, путем снижения температуры в зонах выдержки, повторного нагрева и перестаривания АНО ПХПП ОАО НЛМК.

Практическая ценность работы. Разработанная математическая модель позволяет по химическому составу стали, суммарному обжатию при холодной прокатке и режиму отжига в АНО прогнозировать структуру и свойства отожженной IF-стали, дает возможность повысить надежность выходного контроля структуры и механических свойств листа, разрабатывать новые и корректировать существующие режимы отжига с целью воздействия на свойства выпускаемой стали и повышения производительности и

экономичности работы АНО.

Предложены пути совершенствования режимов отжига в АНО. Разработан температурно-скоростной режим отжига, позволяющий при снижении энергозатрат при отжиге обеспечить высокое качество выпускаемой IF-стали. Опробованы средства контроля структурных превращений при непрерывном отжиге. Методика проведения работы может служить примером для аналогичных работ с другими типами материалов. В ОАО «НЛМК» внедрены методики по определению размера зерна феррита и степени рекристаллизации в IF-сталях путем измерения коэрцитивной силы. Опробован новый режим отжига IF-стали в АНО в ОАО «НЛМК».

Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов: п. 2; п. 3; п. 6; п. 8.

Достоверность результатов исследований, основных положений и выводов определяется корректностью постановки задач, согласованностью теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными автором и другими исследователями, работающими в данной области, с общепринятыми представлениями, признанием полученных результатов на различных международных и отечественных семинарах и конференциях; подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, проведением испытаний с использованием известных в материаловедении современных методов и методик, сертифицированной, поверенной и аттестованной аппаратуры, применением современных программных средств автоматизации и обработки полученных результатов, а также сравнением опытных данных с расчетами и апробацией в условиях производства.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Наука в Липецкой области: истоки и перспективы» (2004 г.); международной научно-технической конференции «Теория и практика производства проката», Липецк (2004 г.), Международной конференции молодых специалистов, г. Москва, МИСиС (2009 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 7 научных работ в виде тезисов докладов и статей в журналах, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и библиографического списка из 114 наименований. Общий объем работы составляет 122 страницы машинописного текста, включая 41 рисунок, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе данных, содержащихся в литературных источниках, проведен анализ современного состояния вопроса производства IF-сталей для холодной штамповки, влияния различных технологических параметров на их структуро- и текстурообразование, кинетику рекристаллизации холоднокатаных сталей при отжиге в линии АНО.

Рассмотрены характеристики механических свойств и текстуры IF-сталей,

легированных титаном. Показаны известные соотношения между химическим составом, параметрами зеренной структуры и механическими свойствами готового листового проката IF-сталей. Описано влияние изменения содержания титана, режимов горячей прокатки, технологии холодной прокатки и рекристаллизационного отжига на формирование структуры, кристаллографической текстуры и механических свойств IF-сталей. Рассмотрены вопросы структурных превращений при непрерывном отжиге, представлены известные соотношения для описания кинетики возврата и первичной рекристаллизации холоднокатаных IF-сталей.

Установлено, что определение количественных закономерностей формирования структуры и текстуры при обработке в агрегатах непрерывного отжига и разработка на этой основе математических моделей фазовых и структурных превращений стали для прогнозирования механических свойств готового листа, а также оптимизация температурно-скоростного режима отжига являются актуальной и практически важной задачей.

Во второй главе описаны методики, использованные при проведении экспериментальных исследований.

Исследования кинетики рекристаллизации, преобразования зерна при первичной рекристаллизации, закономерности формирования кристаллографической текстуры и дисперсной фазы проводились на образцах типичного химического состава IF-стали текущего производства ОАО «НЛМК».

Исследование степени возврата и рекристаллизации проведено методом измерения коэрцитивной силы. Степень рекристаллизации в IF-стали, легированной титаном, после отжига определена измерением коэрцитивной силы образцов в нерекристаллизованном, частично рекристаллизованном и полностью рекристаллизованном состояниях.

Количественный металлографический анализ зеренной структуры феррита проведен при увеличении 500 крат методом ориентированных секущих (500 хорд) на анализаторах структуры «Эпиквант» и «Struers» с использованием полуавтоматического и автоматического анализа изображения.

Кристаллографическая текстура листовой стали изучена с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-4-13 методом обратных полюсных фигур. Многокомпонентная текстура листовой стали характеризуется показателем η – отношением полюсных плотностей, благоприятных для штамповки, к неблагоприятным для штамповки:

$$\eta = \frac{P_{222} + P_{211} + P_{321}}{P_{200} + P_{220} + P_{310}}. \quad (1)$$

Изучение характера распределения, формы, размера и количества неметаллических включений в прокате проведено при исследовании экстракционных угольных реплик на просвет на электронном микроскопе «Tesla BS-540» при ускоряющем напряжении 120 кВ на репликах при увеличении 60000 крат по 200 полям зрения.

Проверка адекватности разработанных математических моделей проведена по результатам промышленных отжигов в АНО термического отделения ПХПП ОАО «НЛМК».

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и

текстуры IF-стали, построения многомерной диаграммы рекристаллизации и математическая модель, созданная на основе этих исследований.

Анализ структуры проведен на плавке с типичным химическим составом, показанным в таблице 1. Для изучения кинетики рекристаллизации данного типа стали, наряду с металлографическим анализом, дополнительно измерялась коэрцитивная сила.

Таблица 1

Химический состав IF-стали, легированной титаном

Содержание элементов, % масс.					
C	S	P	Al	Ti	N
0,006	0,008	0,009	0,046	0,093	0,007

Проведено измерение коэрцитивной силы холоднокатаного образца без термической обработки, затем проводились отжиги холоднокатаных образцов в интервале температур $400 \div 900$ °C в течение 10 минут. После каждого отжига проводилось измерение коэрцитивной силы. Установлено, что в холоднокатаном состоянии и в интервале температур отжига $400 \div 625$ °C в образцах сохраняются деформированные зерна, вытянутые вдоль направления прокатки, при этом значение коэрцитивной силы снижается с 802 до 627 А/м. Изменение коэрцитивной силы в интервале температур $400 \div 625$ °C связано с прохождением процессов аннигиляции точечных дефектов, полигонизации и возврата. Дальнейший нагрев стали в интервале температур $650 \div 750$ °C приводит к протеканию первичной рекристаллизации с образованием новых зерен в деформированной матрице, значение коэрцитивной силы в этом интервале температур уменьшается с 627 до 536 А/м в зависимости от степени прохождения первичной рекристаллизации (рис. 1, а). В интервале температур $750 \div 850$ °C изменения микроструктуры не наблюдаются, процессы первичной рекристаллизации прошли полностью, и коэрцитивная сила имеет постоянное значение. При дальнейшем увеличении температуры отжига до 900 °C отмечается незначительный рост зерна с 12 мкм до 13 мкм (рис. 1, б), при этом коэрцитивная сила снижается с 536 до 524 А/м.

Анализ полученных данных показывает, что скорость протекания рекристаллизации возрастает при повышении температуры отжига. Так, при отжиге при температуре 700 °C для завершения рекристаллизации необходимо менее двух минут при суммарных обжатиях 81 %, а при температуре 625 °C процесс рекристаллизации не завершается на протяжении 2-х часов. При температуре 700 °C увеличение суммарного обжатия с 54 % до 81 % приводит к сокращению времени, необходимого для завершения первичной рекристаллизации, с 20-ти до 2-х минут.

Процессы возврата и рекристаллизации, протекающие во время нагрева, приводят к изменению механических, электрических и магнитных характеристик металла. Изменение данных характеристик может быть использовано для количественного описания кинетики возврата и рекристаллизации конкретного металла или сплава. В качестве оптимального метода для количественного описания кинетики возврата и рекристаллизации

принят метод измерения коэрцитивной силы (H_c).

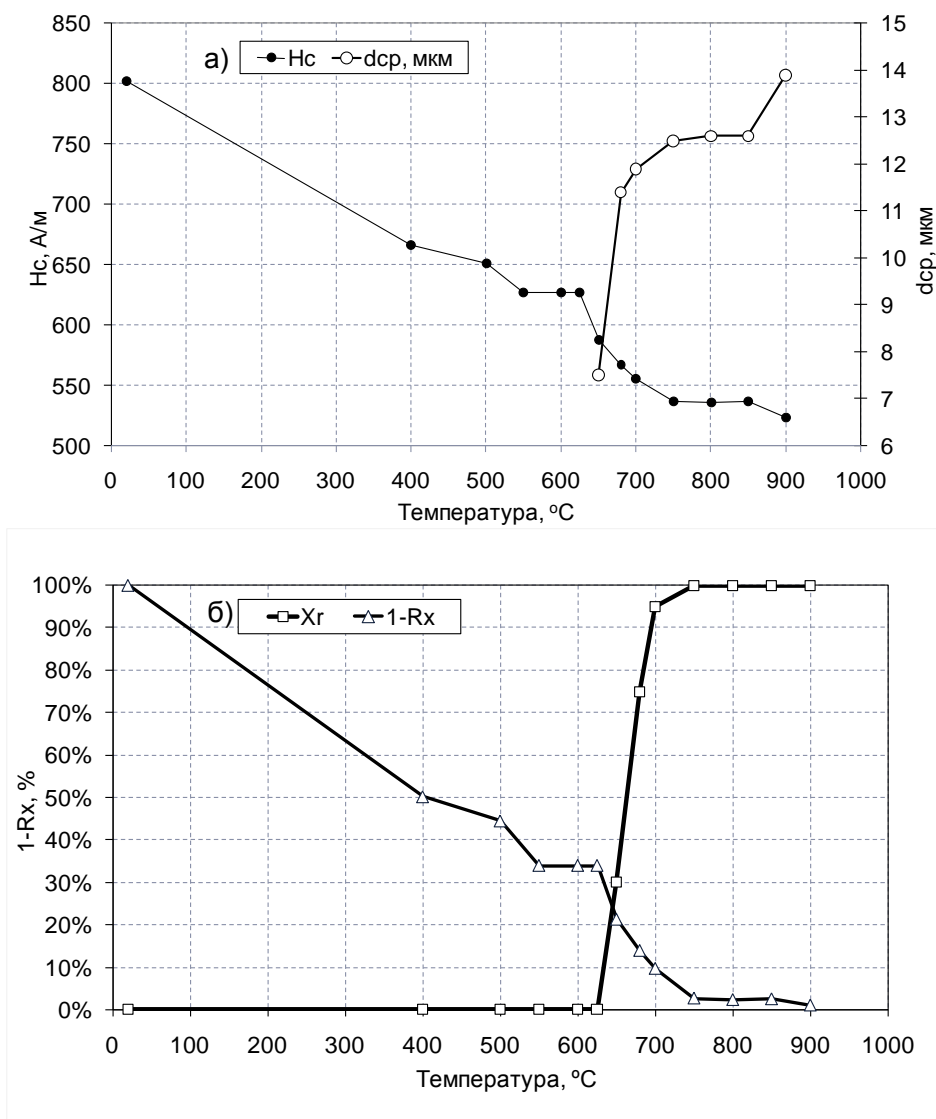


Рис. 1. Изменение физических величин от температуры отжига: а – коэрцитивной силы H_c , размера зерна d_{cp} первичной рекристаллизации; б – степени возврата $1-R_x$ и степени рекристаллизации X_r

Из литературных источников установлено, что существует взаимосвязь между H_c и плотностью дислокаций ρ_{disc} . Плотность дислокаций ρ_{disc} является характеристикой металла, определяющей его напряженное состояние. Таким образом, измерение коэрцитивной силы может быть использовано для количественного исследования кинетики возврата и рекристаллизации деформированного металла при отжиге.

В качестве количественного параметра описания кинетики возврата и рекристаллизации в работе использована степень остаточных напряжений, определенная по соотношению:

$$1-R_x = 1 - X_{H_c} = \frac{H_c(T) - H_{cf}}{H_{co} - H_{cf}}, \quad (2)$$

где R_x – степень изменения внутренних напряжений, %; X_{H_c} – изменение коэрцитивной силы, %; $H_c(T)$ – значение коэрцитивной силы на определенном

этапе отжига, А/м; H_{co} и H_{cf} – значение коэрцитивной силы в холоднокатаном и полностью рекристаллизационном состоянии соответственно, А/м.

Соотношение (2) адекватно описывает кинетики возврата и рекристаллизации (рис. 1, б).

Из известных источников установлено, что размер зерна феррита d обратно пропорционален коэрцитивной силе H_c . В результате проведенного линейного регрессионного анализа получена зависимость между коэрцитивной силой и размером зерна феррита после рекристаллизации:

$$d = (-39,4 \pm 8,8) + \frac{(25580 \pm 4850)}{H_c}. \quad (3)$$

Полученное уравнение (3) является адекватным по критерию Фишера с коэффициентом детерминации $R^2=0,76$. Используя соотношение (3) и измерение коэрцитивной силы в потоке, возможно контролировать размер зерна феррита в IF-стали при непрерывном отжиге в АНО.

По массиву из 19 экспериментальных точек определен размер зерна феррита в горячекатаном состоянии ($D = 20,30 \pm 1,12$ мкм) и размер зерна феррита d_{cp} после первичной рекристаллизации, который определялся в зависимости от степени обжатий при холодной прокатке (от 60 % до 76 %) и составил от 14,0 до 18,5 мкм.

Согласно известной модели первичной рекристаллизации размер зерна после рекристаллизации d_{cp} линейно связан с исходным (горячекатаным) размером зерна D и убывает с увеличением степени деформации ε^n :

Получено уравнение размера зерна для IF-сталей:

$$d_{cp} = D \cdot (0,59 \pm 0,03) \varepsilon^{-0,60 \pm 0,08} \quad (4)$$

Полученное уравнение является адекватным по критерию Фишера с коэффициентом детерминации $R^2=0,868$. Значение теоретического степенного показателя исходного уравнения $n = -2/3$ не отличается от уравнения (4).

При заданных параметрах полосы: химического состава (содержание С, Ti, N, S и т.д.), горячей прокатки (режим нагрева сляба в методической печи, температура конца черной прокатки, температура конца чистовой прокатки и температура смотки в рулон) и холодной прокатки (степень обжатий), используя метод измерения коэрцитивной силы в потоке и закон преобразования зерна феррита, возможно за счет варьирования температурно-скоростного режима отжига АНО улучшить контроль технологического процесса производства IF-стали для получения оптимального уровня механических свойств.

Для описания кинетики рекристаллизации использован метод построения многомерных диаграмм. Для каждого образца, характеризующегося определенными значениями степени деформации (ε), температуры отжига (T) и времени выдержки (τ), определено структурное состояние стали. Отобраны все точки, принадлежащие одной области, с одинаковым структурным состоянием. Затем в многомерном пространстве переменных или их явных функций найдены разделяющие эти области границы.

Преимуществом описания кинетики рекристаллизации феррита многомерными диаграммами кинетики превращений является определение положения каждого контура равной степени рекристаллизации по

совокупности всех экспериментальных точек вместе, что обеспечивает высокую надежность при умеренном объеме эксперимента. Вместе с тем многомерные диаграммы «дискретно» описывают кинетику превращения (от контура к контуру) и не несут информации о развитии процесса между контурами.

По результатам исследования микроструктуры и замеров коэрцитивной силы структурное состояние отожженных образцов в интервале температур отжига 625÷700 °С относили к следующим пяти типам: нерекристаллизованной (степень рекристаллизации $X_r=0$), полностью рекристаллизованной ($X_r=1$) и трем типам промежуточных состояний: $0 < X_r < 0,5$; $X_r=0,5$; $0,5 < X_r < 1$.

Известно, что время первичной рекристаллизации τ зависит от температуры T как $\tau = \tau_0 \exp(Q/(RT))$, где τ_0 – время, с; Q – энергия активации первичной рекристаллизации, R – универсальная газовая постоянная.

Поэтому естественны следующие линеаризующие координаты для построения диаграммы кинетики рекристаллизации: $x_1 = 1/T$, $x_2 = \lg \tau$ и $x_3 = \lg \varepsilon$.

В этих координатах границы между областями с разной степенью рекристаллизации (контуров равной степени рекристаллизации $X_r = \text{const}$) имеют вид плоскостей:

$$a_0 + a_1/T + a_2 \lg \tau + a_3 \lg \varepsilon = 0. \quad (5)$$

Уравнения границ (5) рассчитаны с использованием рекуррентного алгоритма разделения точечных множеств. Коэффициенты уравнений границ a_i областей с разной степенью рекристаллизации стали приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений границ диаграммы кинетики рекристаллизации феррита IF-стали, легированной Ti

X_r , Доли	Коэффициенты уравнения (5)			
	a_0	$a_1 \cdot 10^{-4}$	a_2	a_3
0	12,77	-0,23	1	1,27
0,5	12,05	-0,26	1	3,94
1,0	12,53	-0,33	1	7,95

Положения границ в пространстве координат $1/T - \lg \tau - \lg \varepsilon$ вместе со всеми экспериментальными точками, использованными для их построения, показаны на рис. 2.

Из совместного рассмотрения уравнения Аврами:

$$X_r = 1 - \exp \left[-A_0 \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \tau^n \right] \quad (6)$$

и уравнений границ (5) следует, что модель кинетики рекристаллизации IF-стали между границами описывается соотношением

$$X_r = 1 - \exp(-\varepsilon^s \tau^n C_0 \exp(-Q/(RT))), \quad (7)$$

где C_0 – константа, зависящая от природы материала, τ – время отжига, T – температура отжига, $s = n \bar{a}_3 / \bar{a}_2$, $\lg C_0 = n \bar{a}_0 / \bar{a}_2 + \lg \ln(1/(1 - X_r))$, $Q = -n R (\bar{a}_1 / \bar{a}_2) \ln 10$.

Среднее по границам значение $s=7,72$, $\lg C_0 = 26,379$ или $C_0 = 1,001 \cdot 10^{21}$.

Разработанное математическое описание (7) кинетики рекристаллизации холоднокатаной IF-стали при отжиге использовано как при совершенствовании существующих режимов отжига, так и при разработке новых режимов отжига.

При выплавке для удаления углерода, азота и серы из твердого раствора IF-стали легируются титаном, который образует устойчивые соединения TiN и TiS. Их влияние на микроструктуру и текстуру готовой IF-стали не установлено.

Мелкодисперсные карбиды титана TiC выделяются в стали во время охлаждения после горячей прокатки, и их дальнейшая коагуляция происходит при обработке в АНО. Размер и дисперсность карбидов TiC определяют их влияние на процесс рекристаллизации и текстуру IF-стали. Наличие в стали частиц TiC приводит к тому, что при первичной рекристаллизации в IF-сталях преимущественно начинают расти субзерна с ориентировкой $\{111\}\langle uvw \rangle$.

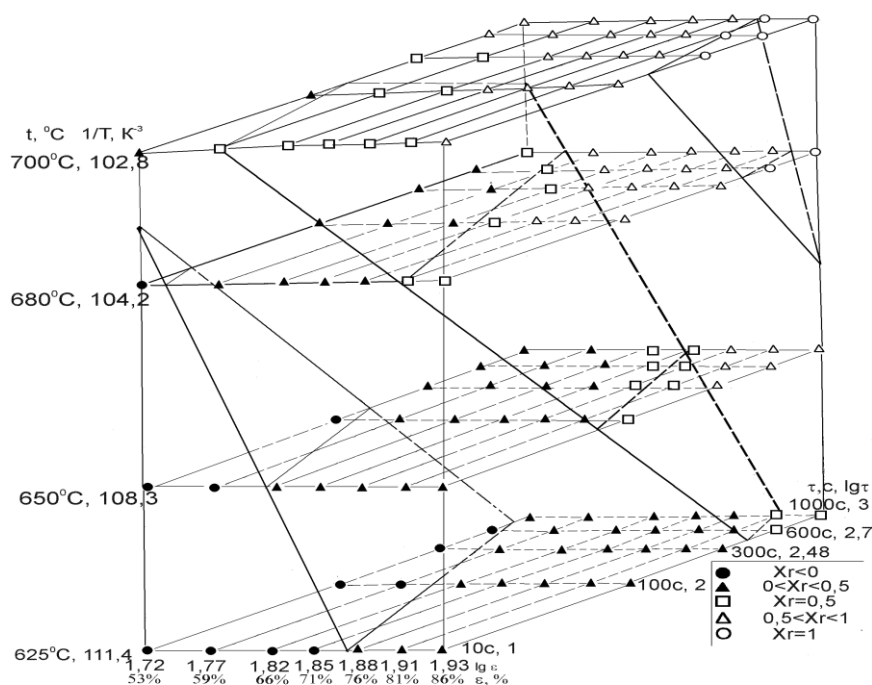


Рис. 2 Многомерная диаграмма рекристаллизации IF-стали

Исследовано изменение плотности (ρ) дисперсных частиц в зависимости от температуры отжига в стали после холодной прокатки с относительным обжатием 76,0 %. Установлено, что с повышением температуры рекристаллизационного отжига от 650 °C до 850 °C плотность дисперсных частиц увеличивается с $0,80 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $1,6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, максимальное значение плотности (ρ) дисперсных частиц имеет при температуре 825 °C. Увеличение плотности частиц совпадает с интервалом первичной рекристаллизации, что, как известно, ведет к получению большей полюсной плотности ориентировки $\{111\}\langle uvw \rangle$.

Целью технологии производства IF-стали является получение с максимальным количеством зерен ориентировки $\{111\}\langle uvw \rangle$.

Проведено исследование закономерностей текстурообразования в IF-стали. Многокомпонентную текстуру IF-стали характеризовали показателем η (общепринятый коэффициент пластичности).

Исследованы образцы в горячекатаном состоянии, после холодной прокатки с различной степенью суммарного обжатия, а также на различных стадиях отжига.

Установлено, при увеличении обжатий при холодной прокатке с 71,5 % до 85 % происходит рост коэффициента пластичности η с 12 до 22 и снижается температура начала первичной рекристаллизации с 700 °С до 650 °С.

По полученным результатам установлено, что оптимальное значение коэффициента пластичности η находится при относительных обжатиях при холодной прокатке выше 80 % и температуре рекристаллизационного отжига 825 °С. Результаты по исследованию структуры и текстуры IF-стали могут быть использованы при разработке новых режимов отжига в АНО (снижение себестоимости, энергозатрат и т.д. при производстве IF-сталей).

Абсолютное подобие состава шихты, режимов выплавки и последующих технологических операций невозможно. Это ведет к изменению химического состава и структуры стали и, соответственно, ее свойств. Однако возможна нивелировка структуры и свойств стали за счет коррекции режимов таких технологических операций, как горячая, холодная прокатки и отжиг для каждого конкретного химического состава стали. Инструментом такой коррекции является математическая модель, созданная в данной работе на основе анализа режимов технологических операций, химического состава, структуры и свойств стали.

В четвертой главе приведены результаты проверки адекватности математической модели прогноза структурных превращений и механических характеристик IF-сталей при отжиге в агрегате непрерывного отжига.

Проверка адекватности прогноза структурных превращений проведена на стандартном режиме отжига в АНО для IF-сталей.

При отжиге холоднокатаных сталей в АНО контроль температурного режима проводится по показаниям пирометров, контролирующих температуру полосы после каждой секции (нагрева, выдержки, ускоренного охлаждения, повторного нагрева и перестаривания).

Для прогноза температуры полосы при отжиге в АНО использовали методику по расчету нагрева тонких тел:

$$t = t_n - (t_n - t_{нач}) \cdot \exp\left(-\frac{K \cdot \alpha \cdot \tau}{S \cdot \rho \cdot c_p}\right), \quad (8)$$

где t_n – температура окружающей среды, °С; $t_{нач}$ – начальная температура нагрева, °С; K – коэффициент формы, для пластины $K=1$; α – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м²·К); τ – продолжительность нагрева, с; $S=\mu\delta$ – характерный размер тела, м; μ – коэффициент несимметричности нагрева (при двухстороннем нагреве $\mu=0,5$); δ – толщина нагреваемого изделия, мм; ρ – плотность нагреваемого изделия, кг/м³; \bar{c}_p – средняя теплоемкость тела в интервале от $t_{нач}$ до $t_{кон}$, кДж/(кг·К).

Средняя ошибка расчета температуры металла в АНО составляет $\pm 10,7^\circ\text{C}$ и близка к погрешности измерения температуры пирометра $\pm 12^\circ\text{C}$.

В связи с тем, что структурные превращения проходят во время нагрева полосы, в работе использована методика эквивалентного времени перехода неизотермических условий к изотермическим условиям. Кривая нагрева разбивалась на изотермические ступеньки малой длительности, на каждой из которых последовательно рассчитывались степень развития возврата, степень рекристаллизации, при этом в расчете на последующем шаге учитывали степень развития процессов на предыдущем шаге.

Моделирование механических свойств проведено на 124 рулонах IF-стали текущего производства ОАО НЛМК. Плавочный химический состав (содержание химических элементов в стали), режимы горячей (температура конца горячей прокатки после черной группы клетей, температура конца горячей прокатки после чистовой группы клетей, температура смотки в рулон), холодной прокатки (относительные обжатия), размер зерна феррита и механические свойства стали исходного массива приведены в таблице 3.

Толщина полос горячекатаной стали изменялась в пределах от 2,0 до 4,2 мм, после холодной прокатки – от 0,77 до 1,00 мм (относительные обжатия при холодной прокатке - от 50 до 81 %).

Таблица 3

Технологические параметры использованных партий IF-стали для разработки регрессионных зависимостей механических свойств

Содержание элементов в стали, % масс.					
C	S	Al	Ti	$Ti^* = Ti - \frac{48}{32}S - \frac{48}{12}N$	N
0,002-0,010	0,006-0,016	0,025-0,060	0,050-0,100	0,014-0,070	0,003-0,007
Параметры горячей прокатки					
Температура конца горячей прокатки после черной группы клетей, $T_{\text{черн.}}, ^\circ\text{C}$	Температура конца горячей прокатки после чистовой группы клетей, $T_{\text{кп}}, ^\circ\text{C}$		Температура смотки в рулон, $T_{\text{см}}, ^\circ\text{C}$		
950-1050	710-880		540-750		
Относительные обжатия при холодной прокатке (ε), размер зерна после горячей прокатки (D) и в готовой (d) стали					
ε , %	D, мкм		d, мкм		
50-81	17-22		13-20		
Механические свойства					
Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, МПа		Относительное удлинение δ_4 , %		
110-185	265-315		34-49		

Значения влияющих факторов изменяются в широких пределах (см. табл. 3). Это находит отражение в том, что после горячей прокатки размер

зерна изменяется от 17 до 22 мкм, а в готовой стали – от 13 до 20 мкм, при этом предел текучести σ_T готовой стали имеет широкий предел варьирования - от 110 до 185 МПа.

В работе получены регрессионные уравнения для расчета механических характеристик σ_T , σ_B и δ_4 . Совокупность этих уравнений позволит автоматизировать процесс управления производством IF-стали.

Адекватность полученных моделей проверена при проведении промышленных отжигов на 245 рулонов IF-стали. Абсолютная ошибка прогноза предела текучести $\sigma_T - 9,7 \text{ Н/мм}^2$, временного сопротивления разрыву $\sigma_B - 10,6 \text{ Н/мм}^2$, относительного удлинения – 2,3 %.

По результатам исследования структуро- и текстурообразования проведено опробование нового режима отжига в линии АНО для IF-стали. Снижение температуры в секциях нагрева и выдержки до 825 °С, повторного нагрева до 300 °С и перестаривания до 150 °С приводит к получению оптимальной кристаллографической текстуры для получения необходимого уровня механических характеристик со снижением энергозатрат при производстве IF-стали. Полное отключение секций повторного нагрева и перестаривания может привести к повреждению футеровки АНО в этих зонах.

Результаты обработки по действующему и новому режиму отжига приведены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнение результатов на модели по действующему режиму
с предложенным режимом в АНО

Режим отжига АНО	Предел текучести, Н/мм^2	Предел прочности, Н/мм^2	Относительное удлинение, %
ДЕЙСТВУЮЩИЙ	129 ÷ 137	287 ÷ 299	43 ÷ 45
ПРЕДЛОЖЕННЫЙ	130 ÷ 139	283 ÷ 297	43 ÷ 45

Уровень механических свойств на новом и действующем режиме сопоставим.

Разработанная модель позволяет оперативно прогнозировать кинетику структурных превращений, конечную структуру и механические свойства в IF-сталях и может быть использована для совершенствования режимов отжига в АНО с целью обеспечения необходимого уровня механических свойств, увеличения производительности АНО и снижения энергозатрат.

По результатам эксперимента разработан новый режим отжига для IF-стали. Разработанный режим отжига позволяет снизить энергозатраты на производство IF-сталей, при этом качество готовой металлопродукции не снижается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе изучения структуры определен и реализован метод контроля размера зерна феррита в потоке с использованием измерения коэрцитивной силы при обработке IF-стали на АНО. Установлена регрессионная зависимость

между размером зерна феррита после рекристаллизационного отжига и коэрцитивной силой. Определено средство контроля в потоке, позволяющее осуществлять управление производством IF-стали.

2. Разработаны и внедрены в ОАО «НЛМК» методики для прогноза размера зерна феррита и кинетики рекристаллизации IF-сталей после непрерывного отжига с использованием метода измерения коэрцитивной силы.

3. Исследованы и описаны закономерности изменения размера зерна феррита при первичной рекристаллизации. Установлены коэффициенты в уравнении закона преобразования размера зерна феррита для IF-стали.

4. Построена обобщенная диаграмма рекристаллизации в координатах «температура» – «время отжига» – «степень холодной деформации». Разработано математическое описание кинетики рекристаллизации феррита, позволяющее прогнозировать структурообразование стали в зависимости от суммарного обжатия при холодной прокатке, от температуры и длительности отжига.

5. Исследована кристаллографическая текстура листовой стали на разных стадиях отжига в АНО. Установлены относительные обжатия при холодной прокатке выше 80 % и температура отжига в линии АНО выше 825 °С для формирования благоприятной кристаллографической текстуры для холодной штамповки IF-стали.

6. Установлены зависимости по влиянию химического состава стали, технологических параметров горячей прокатки для последующего отжига полосы в линии АНО (температуры после черновой группы клетей, температуры после чистовой группы клетей, температуры смотки в рулон), холодной прокатки (относительные обжатия при холодной прокатке), непрерывного отжига (температура и время отжига) на механические свойства (предел текучести, предел прочности и относительное удлинение) IF-сталей, легированных титаном;

7. С использованием разработанных математических моделей выполнен анализ изменения структуры при рекристаллизационном отжиге холоднокатаной IF-стали в АНО. Установлено, что полученные зависимости механических свойств могут использоваться для адекватного прогноза механических свойств в IF-сталях в промышленных условиях.

8. Разработан режим отжига IF-стали в АНО, обеспечивающий снижение энергозатрат при производстве IF-стали, путем снижения температуры в зонах выдержки, повторного нагрева и перестаривания АНО ПХПП ОАО «НЛМК», при этом качество готовой металлопродукции не изменяется. Режим отжига IF-сталей опробован в АНО в ОАО «НЛМК».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. **Лукин, Ю.С.** Закономерности формирования механических свойств в IF-сталях / Ю.С. Лукин, С.В. Бахтин, А.С. Лукин // Производство проката. 2011. № 5. С. 9-13.
2. **Лукин, Ю.С.** Исследование кристаллографической текстуры в IF-

сталиях / Ю.С. Лукин, С.В. Бахтин, А.С. Лукин // Производство проката. 2011. № 6. С. 16-19.

3. **Лукин, Ю.С.** Управление механическими свойствами титаносодержащих IF-сталей / С.В. Бахтин, Ю.С. Лукин, А.А. Заверюха // Сталь. 2011. № 9. С. 51-53.

4. **Лукин, Ю.С.** Формирование текстуры в легированных титаном IF-сталиях / Ю.С. Лукин, С.В. Бахтин, А.С. Лукин, А.А. Заверюха // Сталь. 2009. №11. С. 85-87.

статьи и материалы конференций:

5. Бахтин, С.В. Технология обработки горячекатаных травленных сталей 08Ю, 08пс и их аналогов / С.В. Бахтин, Ю.Ю. Бабушко, **Ю.С. Лукин** //Сборник трудов 5-ой международной конференции молодых специалистов. М.: МИСиС, 2009. С.272-278.

6. Шкатов, В.В. Кинетика рекристаллизации холоднокатаной сверхнизкоуглеродистой стали при отжиге / В.В.Шкатов, А.С. Лукин, **Ю.С. Лукин** // Наука в Липецкой области: истоки и перспективы. Липецк: ЛГТУ, 2004. Ч. 3. С.142.

7. Шкатов, В.В. Кинетика рекристаллизации холоднокатаной IF-стали при отжиге // В.В Шкатов, А.С. Лукин, **Ю.С. Лукин** // Вестник ЛГТУ-ЛЭГИ. 2004. №1(12). С.44-47.