УДК 669.018.41:620.17

М.В. Голубева[1], *О.В. Сыч*[1], *Е.И. Хлусова*[1], *Г.Д. Мотовилина*[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ НОВОЙ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ГАРАНТИРОВАННЫМ ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 690 МПа

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-19-24

Исследования выполнены с целью определения оптимального режима термической обработки новой экономнолегированной хладостойкой стали, обеспечивающего получение гарантированного предела текучести 690 МПа в сочетании с ударной вязкостью не менее 35 Дж/см^2 при температуре испытаний -70°С. В работе исследовано влияние различных режимов закалки и отпуска на изменение механических свойств, структуры стали и характера разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб при температуре -70°С. Показаны результаты исследования взаимосвязи свойств, структуры и характера разрушения стали. Определен оптимальный режим термической обработки новой экономнолегированной хладостойкой стали.

Ключевые слова: *экономнолегированная высокопрочная сталь, хладостойкость, снижение углеродного эквивалента, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, механические свойства, структура, бейнит, мартенсит, закалка, отпуск.*

Purpose of the present research is to determine the optimal heat treatment parameters that ensure yield strength over 690 MPa in combination with impact toughness of at least 35 J/cm^2 at temperature -70°C in new sparingly alloyed cold-resistant steel. The effect of various quenching and tempering parameters on mechanical properties, structure of steel and fracture mode of samples after impact tests at temperature -70°C has been studied. The interaction between the properties, structure and fracture mode of steel samples are shown. The optimal heat treatment parameters of new sparingly alloyed cold-resistant steel are determined.

Keywords: *sparingly alloyed high-strength steel, cold resistance, reduction of carbon equivalent, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, mechanical properties, structure, bainite, martensite, quenching, tempering.*

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Государственный научный центр Российской Федерации [National Research Center «Kurchatov Institute» Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Structural Materials «Prometey»]; e-mail: npk3@crism.ru

Введение

В настоящее время в России для производства ответственных сварных конструкций, в том числе для подъемно-транспортного оборудования и горнодобывающей техники, целесообразно использовать высокопрочные свариваемые конструкционные стали с гарантированным пределом текучести 690 МПа. Технико-экономическая эффективность применения высокопрочных сталей по сравнению с малоуглеродистыми и обычными низколегированными сталями заключается в снижении массы и повышении несущей способности конструкций, в увеличении их долговечности благодаря повышенной прочности и хладостойкости [1, 2].

В России при производстве сталей хромоникельмолибденовой композиции легирования с пределом текучести >690 МПа широко используется технология закалки с высоким отпуском (термоулучшение).

Цель данной работы – определение оптимального режима термической обработки листового проката из новой экономнолегированной хладостойкой стали хромоникельмолибденовой композиции легирования с гарантированным пределом текучести 690 МПа.

Материал и методика проведения эксперимента

В качестве материала для исследований была выбрана новая разработанная сталь марки 09ХГН2МД, химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав новой исследуемой стали (% по массе)

C	Si	Mn	Ni+Cu	Cr+Mo	Al	N	V+Nb+Ti	P	S	$C_{экв}$
0,09	0,33	0,67	2,24	0,795	0,036	0,006	0,024	0,007	0,003	0,51

Закалку и отпуск заготовок размером 12×300×350 мм проводили в лабораторных условиях. Варьировали следующие параметры термической обработки:
– температуру закалки: 900 и 950°C (выдержка при температуре закалки 60 мин);
– температуру отпуска: 550, 570, 600, 630, 660 и 690°C;
– продолжительность отпуска: 60 и 180 мин.

Охлаждение после закалки производили в воде, после отпуска – на воздухе.

Исследовали влияние данных параметров на механические свойства, структуру и характер разрушения.

Механические испытания образцов из стали на растяжение проводили по ГОСТ 1497–84, на ударный изгиб при температуре -70°C – по ГОСТ 9454–78.

Исследования микроструктуры образцов выполняли на инвертированном микроскопе Axiovert 25CA и световом металлографическом микроскопе AxioObserverA1M с цифровым анализатором изображения после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования тонкой структуры выполняли на просвечивающем электронном микроскопе Tecnai G2 30 S-TWIN, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром, при ускоряющем напряжении 120 кВ. Исследования поверхности разрушения образцов проводили с применением растрового электронного микроскопа ЕМ 535.

Экспериментальная часть

Влияние температуры закалки на механические свойства и структуру стали

Результаты механических испытаний показывают, что повышение температуры закалки на 50°C не оказывает существенного влияния на механические свойства (табл. 2). Наблюдается незначительное снижение предела текучести (на 32 МПа) и ударной вязкости при температуре испытаний -70°C – на 12 Дж/см^2.

Исследования микроструктуры, выполненные методом оптической металлографии показывают, что после закалки с температур 900 (рис. 1, *а*) и 950°C (рис. 1, *б*) в образцах формируется бейнитно-мартенситная структура, близкая по морфологическим признакам и размеру структурных составляющих. Бóльшую часть поверхности

Таблица 2

Механические свойства новой исследуемой стали в закаленном состоянии

Температура закалки, °C	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Ударная вязкость* KCV^{-70}, Дж/см^2
900	859	$\frac{46,8–85,1}{66,0}$
950	827	$\frac{43,4–64,9}{54,2}$

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

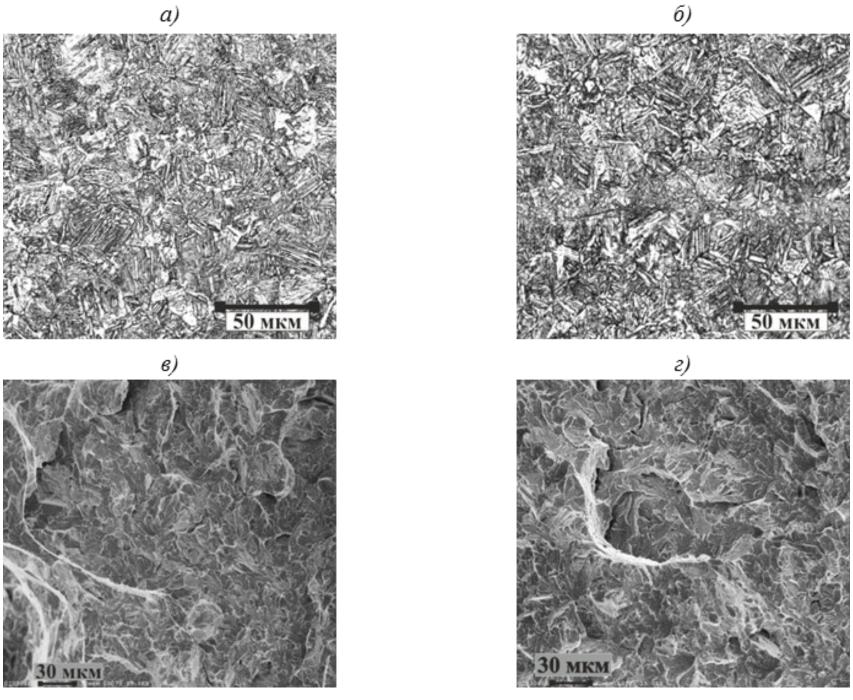

Рис. 1. Микроструктура (*а*, *б*) и характер разрушения (*в*, *г*) исследуемых образцов, закаленных с температур 900 (*а*, *в*) и 950°C (*б*, *г*)

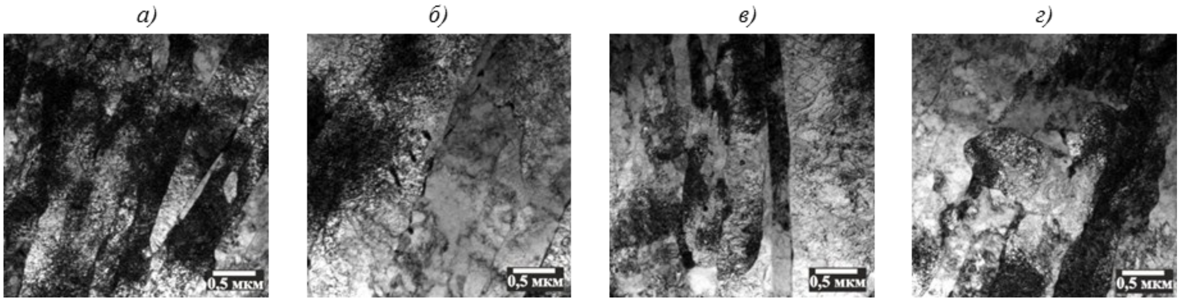

Рис. 2. Особенности структурных составляющих в образце из стали, закаленном с температуры 950°С: *а* – реечный мартенсит; *б* – высокотемпературный мартенсит; *в* – реечный бейнит; *г* – гранулярный бейнит

изломов образцов Шарпи, испытанных при температуре -70°С, занимают области хрупкого транскристаллитного разрушения, образованного фасетками квазискола и микроскола, окруженные участками вязкого зернограничного излома (рис. 1, *в*, *г*).

Исследования тонкой структуры образцов после закалки с температуры 900°С показали, что основными структурными составляющими являются реечный бейнит (до 50%) и высокотемпературный мартенсит (до 40%). В структуре также присутствует до 10% реечного мартенсита. Средняя ширина реек в реечном бейните составляет 0,68 мкм, а в реечном мартенсите 0,13 мкм. Плотность дислокаций в реечном бейните составляет $2{,}9\cdot10^{14}$ м$^{-2}$, что на порядок ниже, чем в высокотемпературном ($2{,}4\cdot10^{15}$ м$^{-2}$) и реечном ($3{,}2\cdot10^{15}$ м$^{-2}$) мартенсите.

Повышение температуры закалки до 950°С приводит к изменению структуры стали: объемная доля реечного бейнита снижается до 30% (рис. 2, *в*), а высокотемпературного мартенсита – до 20% (рис. 2, *б*), доля реечного мартенсита увеличивается до 40% (рис. 2, *а*). В структуре образцов из стали выявлено также ~10% гранулярного бейнита с плотностью дислокаций $2{,}9\cdot10^{14}$ м$^{-2}$ (рис. 2, *г*), наличие которого и могло привести к незначительному снижению прочностных характеристик. Плотность дислокаций в реечном бейните, высокотемпературном и реечном мартенсите практически не изменяется по сравнению с образцами после закалки с температуры 900°С.

Следует отметить, что при увеличении температуры закалки в высокотемпературном мартенсите увеличивается объемная плотность карбидов самоотпуска внутри зерна – с $4\cdot10^{20}$ до $7\cdot10^{20}$ м$^{-3}$, при этом их средние размеры составляют 170–200 нм. В реечном мартенсите наблюдаются более мелкие частицы карбидов со средними размерами 10–40 нм.

Влияние температуры и продолжительности отпуска на механические свойства и структуру стали

На рис. 3 представлены графики зависимости механических свойств от температуры отпуска и продолжительности выдержки при нем. Требуемое сочетание прочности и ударной вязкости образцов из стали достигается в интервале температур отпуска 550–630°С и при температурах закалки как 900, так и 950°С. Увеличение продолжительности выдержки при отпуске с 60 до 180 мин способствует повышению значений ударной вязкости при температуре испытаний -70°С (рис. 3 *б*, *г*) при сохранении значений предела текучести не менее 690 МПа до температуры отпуска 630°С (рис. 3, *а*, *в*).

Исследования структуры образцов из стали показали, что после отпуска при температуре 570°С в образцах, закаленных с температуры 950°С, реечный характер структуры сохраняется (рис. 4, *а*), наблюдается уменьшение плотности дислокаций в дислокационном мартенсите – с $3{,}2\cdot10^{15}$ до $2{,}0\cdot10^{14}$ м$^{-2}$, что сопровождается снижением предела текучести на 50–70 МПа (рис. 3, *а*, *в*). Одновременное повышение низкотемпературной ударной вязкости образцов из стали до значений не менее 90 Дж/см^2 (рис. 3, *б*, *г*) может быть связано с разбиением реек α-фазы на фрагменты и выходом углерода из α-решетки с образованием дисперсных карбидов цементитного типа на границах этих фрагментов внутри зерен [3, 4].

Повышение температуры отпуска до 630°С способствует нарушению реечного характера структуры (рис. 4, *б*). В отдельных областях реечного мартенсита и бейнита реечной морфологии происходит исчезновение малоугловых границ реек и внутренних фрагментов с образованием областей сорбитоподобной феррито-карбидной смеси, размеры которых растут при увеличении температуры отпуска (рис. 4, *б*, *в*). Такие структурные изменения при отпуске приводят к снижению значений прочностных характеристик и росту значений низкотемпературной ударной вязкости (рис. 3).

Исследования тонкой структуры образца после отпуска при температуре 630°С показали, что в дислокационном мартенсите реечного типа происходит диссоциация карбидов самоотпуска и рост карбидов по границам реек. По границам кристаллитов бейнита реечного и гранулярного типа наблюдается коагуляция частиц цементитного типа, происходит их легирование хромом и марганцем.

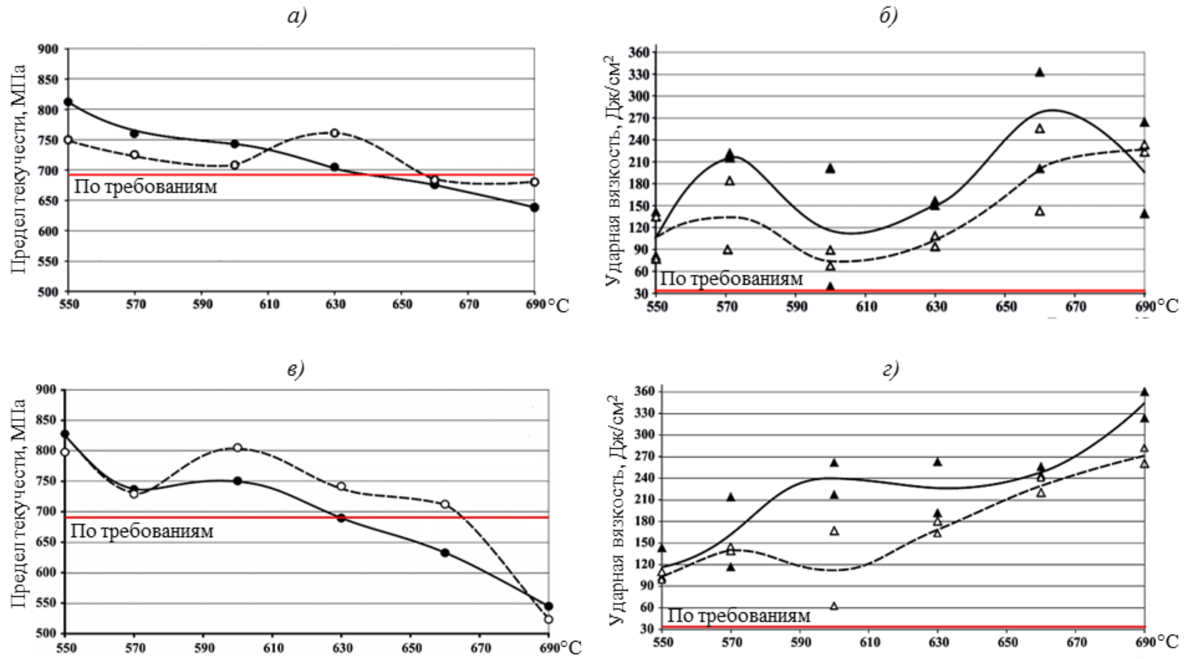

Рис. 3. Зависимости механических свойств от температуры и продолжительности выдержки при отпуске при температурах закалки 900 (●, ▲) и 950°C (○, △):
а, *б* – в течение 60 мин; *в*, *г* – в течение 180 мин

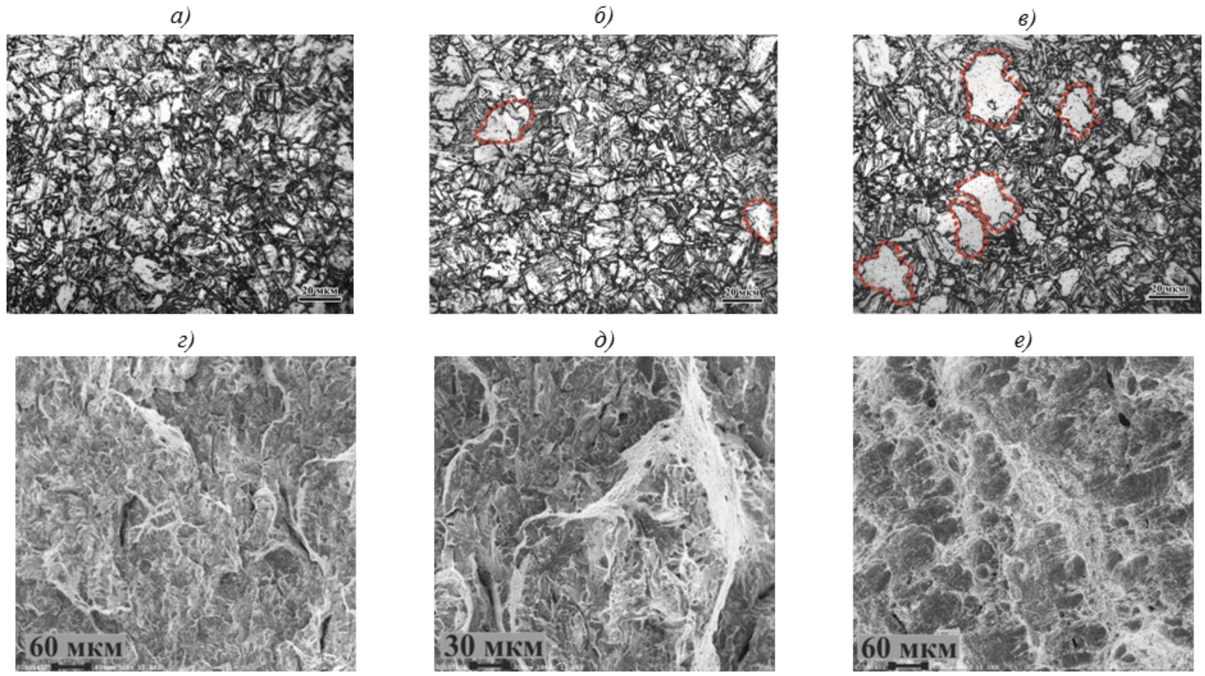

Рис. 4. Микроструктура (*а*–*в*) и характер разрушения (*г*–*е*) исследованных образцов после закалки с температуры 950°C и отпуска продолжительностью 180 мин при температурах 570 (*а*, *г*), 630 (*б*, *д*) и 690°C (*в*, *е*)

Более высокие температуры отпуска 660–690°C приводят к росту отдельных зерен α-фазы (рис. 4, *в*), интенсификации процессов коагуляции частиц, что вызывает существенное снижение предела текучести до значений <690 МПа (рис. 3, *а*, *в*).

Структурные изменения при отпуске существенно влияют на характер разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб при температуре -70°C.

После закалки с 950°C и отпуска при температуре 570°C в изломах ударных образцов реализуется разрушение микросколом и квазисколом (рис. 4, *г*). Повышение температуры отпуска до 630°C приводит к получению излома образца, образованного преимущественно мелкими фасетками микроскола, порядка 30–35% излома представлены областями квазискола, ограниченными вязким контуром зернограничного излома (рис. 4, *д*). Однако, несмотря на преимущественно хрупкий вид излома образцов после отпуска при температурах 570–630°С, значения низкотемпературной ударной вязкости значительно выше требуемых.

Отпуск при температурах 660 и 690°С приводит к получению вязкого чашечного вида излома ударных образцов (рис. 4, *е*). Изменение характера разрушения образцов при повышении температуры отпуска обусловлено нарушением реечного характера структуры.

На основании комплексного анализа, результатов механических испытаний, исследования структуры и характера разрушения образцов из стали определены оптимальные параметры закалки и отпуска новой экономнолегированной хладостойкой стали, обеспечивающие получение гарантированного предела текучести 690 МПа в сочетании с требуемыми значениями низкотемпературной ударной вязкости, рекомендованные для опробования изготовления образцов толстолистового проката в условиях опытного производства. Температурные режимы термической обработки определяли с учетом опыта адаптации результатов лабораторных исследований к оборудованию научно-производственного комплекса. Для опробования изготовления листового проката толщиной 30 мм предложены следующие параметры:

– температура закалки 930°С;
– температура отпуска 570°С;
– продолжительность отпуска 100 и 180 мин.

Опробование рекомендованного режима термической обработки в условиях опытного производства

Результаты механических испытаний опытных образцов листового проката толщиной 30 мм после закалки с температуры 930°С и отпуска при 570°С в течение 100 и 180 мин показали, что требуемое сочетание прочности и ударной вязкости достигается при продолжительности отпуска не более 100 мин (рис. 5).

Исследование структуры образцов листового проката, изготовленных в условиях опытного производства по рекомендованным режимам термической обработки, показало, что основными структурными составляющими являются реечный мартенсит, объемная доля которого составляет 50% (рис. 6, *а*, *д*), реечный бейнит – до 20% (рис. 6, *в*, *ж*) и гранулярный бейнит – до 25% (рис. 6, *г*, *з*). Высокотемпературный мартенсит занимает незначительную долю структуры – всего 5% (рис. 6, *б*, *е*). Плотность дислокаций в реечном мартенсите составляет (2,8–3,0)·10^{14} $м^{-2}$; она выше, чем в реечном бейните ((1,5–2,0)·10^{14} $м^{-2}$).

Увеличение длительности выдержки при отпуске со 100 до 180 мин приводит к растворению мелкой упрочняющей карбидной фазы внутри зерен и увеличению размеров карбидных частиц по границам бейнитных реек, что способствует снижению предела текучести и низкотемпературной ударной вязкости. Одновременно наблюдается рост карбидов по границам гранулярного бейнита. Объемная плотность распределения карбидов самоотпуска в дислокационном мартенсите при этом практически не изменяется и остается на уровне (2,8–3,0)·$10^{20}$$м^{-3}$.

Заключения

На основании проведенных исследований новой экономнолегированной хладостойкой стали установлено следующее.

1. Достижение требуемых прочностных характеристик обеспечивается при формировании бейнитно-мартенситной структуры с долей реечного мартенсита 40–50% с высокой плотностью дислокаций и равномерно распределенной мелкодисперсной карбидной фазой размером 10–40 нм

Рис. 5. Изменение механических свойств после закалки с температуры 930°С и последующего отпуска при температуре 570°С в течение 100 (■) и 180 мин (□)

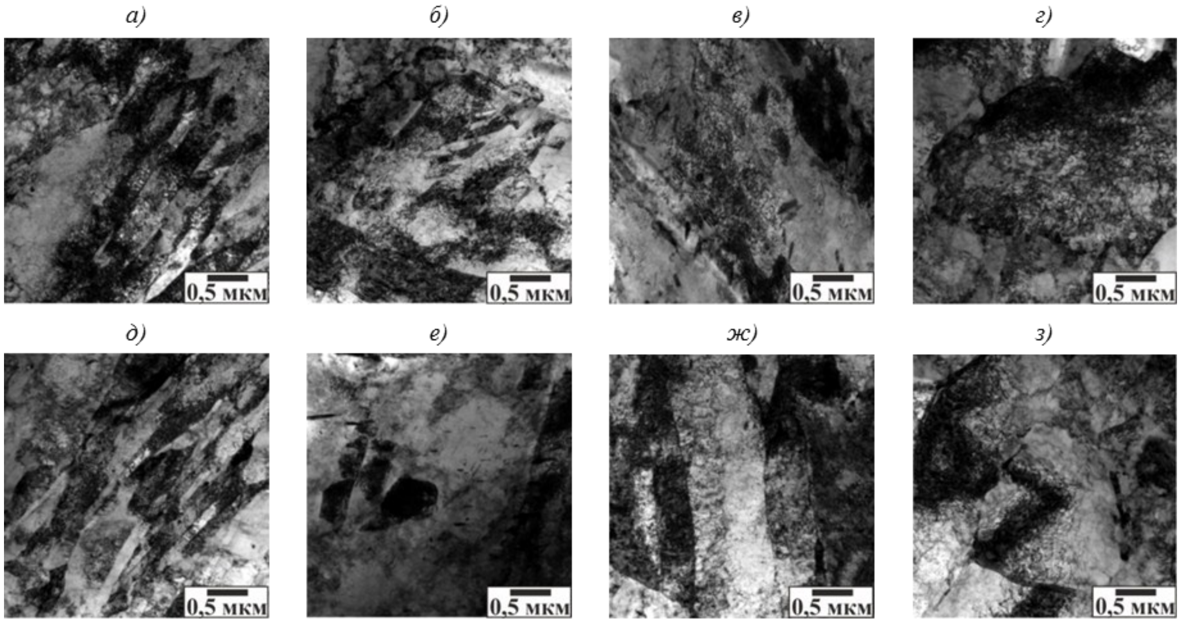

Рис. 6. Структурные составляющие в исследованных образцах листового проката толщиной 30 мм после закалки с температуры 930°С и отпуска при температуре 570°С в течение 180 (*а–г*) и 100 мин (*д–з*):
а, *д* – реечный мартенсит; *б*, *е* – высокотемпературный мартенсит с карбидами самоотпуска; *в*, *ж* – реечный бейнит; *г*, *з* – гранулярный бейнит

внутри кристаллов при полном отсутствии структурно-свободного феррита.

2. Показано, что повышение температуры закалки с 900 до 950°С не оказывает существенного влияния на значения предела текучести и низкотемпературной ударной вязкости, однако способствует изменению соотношения структурных составляющих в бейнитно-мартенситной структуре:

– 10% реечного мартенсита+40% высокотемпературного мартенсита+50% реечного бейнита после закалки с температуры 900°С;

– 40% реечного мартенсита+20% высокотемпературного мартенсита+30% реечного бейнита+10% гранулярного бейнита после закалки с температуры 950°С.

3. Установлено, что при повышении температуры отпуска в диапазоне 570–690°С происходит:

– снижение прочностных характеристик с одновременным повышением значений низкотемпературной ударной вязкости;

– нарушение реечного характера структуры, снижение плотности дислокаций и плотности распределения карбидных частиц;

– изменение вида излома образцов после испытаний на ударный изгиб – от хрупкого до вязкого чашечного, а также механизма разрушения.

4. Определен оптимальный режим термической обработки на примере листового проката толщиной 30 мм из новой экономнолегированной хладостойкой стали: закалка с температуры 930°С с последующим отпуском при температуре 570°С в течение не более 100 мин. Данный режим гарантирует получение предела текучести не менее 690 МПа в сочетании с ударной вязкостью не менее 35 Дж/см^2 при температуре испытаний -70°С за счет формирования дисперсной бейнитно-мартенситной структуры, содержащей 50% реечного мартенсита и 45% бейнита (соотношение бейнита реечной и гранулярной морфологии 20 и 25%) при незначительной доле высокотемпературного мартенсита – порядка 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барун В.Н., Белокуров В.Н., Павленко П.Д. Снижение металлоемкости несущей системы автомобиля-самосвала КамАЗ // Автомобильная промышленность. 1983. №9. С. 12–14.
2. Павленко П.Д., Фасхиев Х.А. Автомобили КамАЗ. Рама повышенной надежности // Автомобильная промышленность. 1992. №12. С. 10–11.
3. Никитин В.Н., Лазько В.Г. Высокопрочные свариваемые стали с пределом текучести 600–900 Н/мм^2, состояние и перспективы развития / Черметинформация. М., 1988. 31 с.
4. Сыч О.В., Орлов В.В., Круглова А.А., Хлусова Е.И. Изменение структуры высокопрочной трубной стали класса прочности К70-К80 при варьировании режимов высокотемпературного отпуска после термомеханической обработки // Вопросы материаловедения. 2011. №1 (65). С. 89–99.