

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.15-194.56:539.374

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ САМООТПУСКА И ОТПУСКА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ЗАКАЛЕННОЙ НА ВОЗДУХЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

© 2019 г. Р. А. Воробьев^{а, *}, В. Н. Дубинский^а, В. В. Евстифеева^б

^аНГТУ им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Россия

^бАО ЦНИИ “Буревестник”, Сормовское шоссе, 1а, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: linuxjuicy@gmail.com

Поступила в редакцию 20.02.2019 г.

После доработки 12.03.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

Рассмотрено влияние процессов самоотпуска и отпуска на механические характеристики и структуру низкоуглеродистой мартенситной стали после закалки на воздухе. Начавшиеся при охлаждении процессы распада мартенсита (самоотпуск) продолжают в стали и при последующих отпусках при 200, 300, 400 и 500°C с образованием ферритокарбидной смеси разной степени дисперсности. При этом в интервале температур отпуска 200–400°C отмечается монотонное увеличение предела текучести на 11%, в результате отпуска при 500°C предел текучести снижается на 3%. Характер разрушения образцов изучался с помощью растровой электронной микроскопии, получено подтверждение явления отпускной хрупкости в исследованной стали при температурах 300 и 500°C, что находится в хорошем согласии с результатами механических испытаний.

Ключевые слова: термическая обработка, низкоуглеродистые мартенситные стали, механические испытания, микроструктура, фрактография изломов

DOI: 10.1134/S0015323019100139

ВВЕДЕНИЕ

В 80-е гг. прошлого века был создан новый класс конструкционных низкоуглеродистых мартенситных сталей (НМС), содержащих менее 0.2% С, речная структура мартенсита в которых обеспечивает высокую подвижность дислокаций при их высокой плотности (10^{10-12} см⁻²). НМС обладают лучшим комплексом механических свойств и технологичностью относительно традиционных конструкционных сталей с прочностью 800–1400 МПа [1–3]. Они находят всё более широкое применение в общем и специальном машиностроении для изделий нефтедобывающей промышленности, грузоподъемных механизмов, строительной и специальной техники, работающих в тяжелых условиях, в сложнапряженном состоянии при статических, динамических и циклических нагрузках, при низких (до минус 70°C) и повышенных (до 500°C) температурах. К технологическим преимуществам НМС относится возможность закалки изделий из этих сталей на воздухе.

В данной работе исследовалась сталь 07Х3ГНМЮА, которая относится к чисто мартенситному классу: закаливаясь на воздухе, в отличие от большинства других НМС, она не имеет в структуре бейнита. При этом высокое значение мартенситной точки M_n должно обеспечивать существенное развитие процессов самоотпуска при закалке.

Целью данной работы является исследование процессов структурообразования, протекающих при самоотпуске и отпуске (при разных температурах), и их влияния на механические характеристики и характер разрушения стали 07Х3ГНМЮА после упрочняющей термической обработки (ТО).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Формирование микроструктуры и ее влияние на комплекс механических свойств изучалось на образцах из стали 07Х3ГНМЮА после различных режимов термической обработки: закалка от 910°C на воздухе, отпуск $T_{отп} = 200, 300, 400, 500^\circ\text{C}$

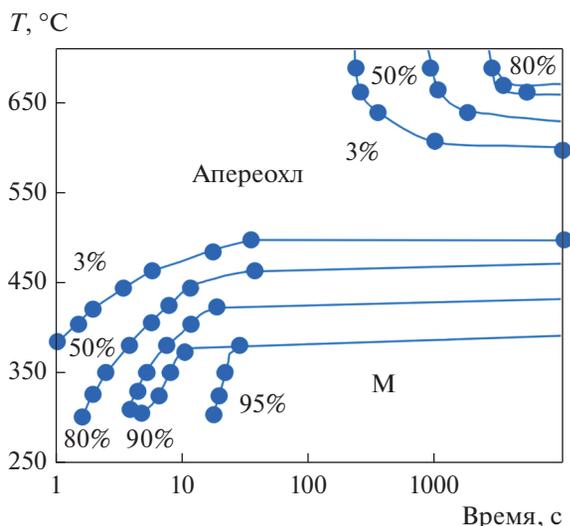


Рис. 1. Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита стали 07X3ГНМЮА.

в течение 3 ч, охлаждение так же, как и при закалке – на воздухе.

Химический состав стали определялся с помощью спектроанализатора Foundry Master фирмы OXFORD INSTRUMENTS. Содержание основных химических элементов (в %) следующее: Fe = 94.20, C = 0.064, Si = 0.271, Mn = 0.914, P = 0.003, S = 0.011, Cr = 2.98, Mo = 0.23, Ni = 1.00, Al = 0.021, Co = 0.021, Cu = 0.21, V = 0.009, W = 0.015.

Измерение твердости проводилось на твердомере Роквелла “Rockwell 574” (ГОСТ 9013–59).

Ударная вязкость образцов Менаже (размером 10 × 10 × 55 мм) с U-образным надрезом определялась на копке РН-300 фирмы Walter + Bai AG, с энергией удара 300 Дж (ГОСТ 9454-78).

Механические характеристики были измерены на испытательной машине “Inspekt 100 table”.

Фотографии микроструктур и изломов получены методом РЭМ на микроскопе VEGA 3 ХМН производства компании TESCAN с катодом из гексаборида лантана (LaB₆) с термоэмиссией. Изображения регистрировались детектором вторичных электронов при условиях съемки: уско-

ряющее напряжение 20 кВ, интенсивность пучка электронов 10–13 А, рабочее расстояние 6–22 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диаграмма изотермического распада аустенита стали 07X3ГНМЮА представлена на рис. 1. Высокая устойчивость аустенита стали 07X3ГНМЮА в области перлитного превращения, отсутствие верхнего бейнита, высокая температура мартенситного превращения M_n (390°C), обеспечивающая самоотпуск в ходе охлаждения, способствуют формированию даже при замедленном охлаждении структуры отпущенного низкоуглеродистого мартенсита. Такая структура и слабая зависимость вязкости от величины зерна гарантируют благоприятное сочетание характеристик прочности, пластичности и вязкости [4, 5]. Развитие самоотпуска приводит к образованию пакетного “бесструктурного” мартенсита, чередующегося с участками феррита (рис. 2а).

В исследуемом интервале температур отпуска (200–500°C) в стали 07X3ГНМЮА после закалки на воздухе формируются структуры различного фазового состава, различающиеся типом и соотношением фаз, их дисперсностью, взаимным расположением, что приводит к различным сочетаниям стандартных механических характеристик стали, обычно определяемых в производственной практике. Механические характеристики стали 07X3ГНМЮА после термической обработки представлены в табл. 1.

В результате процессов самоотпуска при охлаждении стали 07X3ГНМЮА на воздухе рейки мартенсита начинают фрагментироваться (см. рис. 2а), мартенсит становится “бесструктурным”. Наличие в структуре стали отпущенного мартенсита свидетельствует о том, что уже при охлаждении на воздухе в образовавшемся мартенсите начинает происходить: перераспределение атомов углерода в твердом растворе, перемещение их к дислокациям; распад мартенсита с образованием областей, обогащенных углеродом (сегрегаций), а затем и карбидных выделений [6, 7].

Начавшиеся процессы распада мартенсита при закалке на воздухе продолжают при последующих отпусках при 200, 300, 400 и 500°C.

Таблица 1. Механические свойства стали 07X3ГНМЮА

Режим ТО	KCU, Дж/см ²	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ , %	δ , %	HRC
Закалка 910°C на воздухе	129	747	1019	65.8	14.8	31
Закалка 910°C на воздухе, отпуск 200°C	141	782	1021	66.2	15.0	30
Закалка 910°C на воздухе, отпуск 300°C	133	822	1016	67.0	14.4	30
Закалка 910°C на воздухе, отпуск 400°C	142	829	995	65.9	15.6	30
Закалка 910°C на воздухе, отпуск 500°C	111	805	1001	65.8	16.0	26

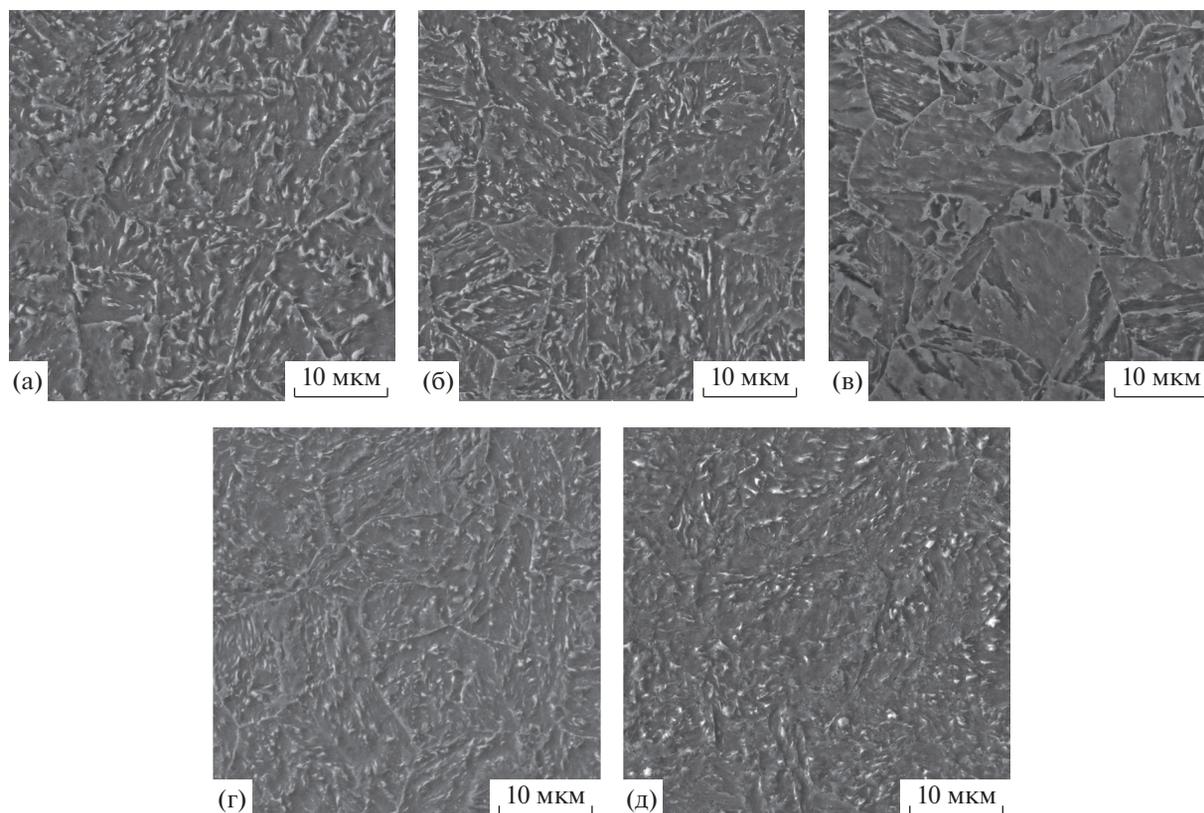


Рис. 2. Структура стали 07X3ГНМЮА: после охлаждения на воздухе (а); после отпуска 200°C (б); после отпуска 300°C (в); после отпуска 400°C (г); после отпуска 500°C (д).

Снижение пересыщенности твердого раствора углеродом в интервале температур отпуска 200–400°C и происходящие процессы возврата первого рода (отдыха) приводят к частичной релаксации внутренних напряжений, чем, вероятно, обусловлено повышение ударной вязкости по сравнению с ее значением в закаленном состоянии. Однако после отпуска на когерентных межфазных границах возникают упругие микронапряжения по причине увеличения сопротивления движению дислокаций за счет их закрепления сегрегациями углерода [8], в результате твердость сохраняется на уровне 30 HRC, повышается предел текучести.

В микроструктуре стали 07X3ГНМЮА при повышении температуры отпуска интенсифицируется фрагментация мартенсита, происходит распад твердого раствора и выделение карбидной фазы глобулярной формы, повторяющей ориентацию бывших речечных пакетов (рис. 2б–2г). Соответственно, при повышении температуры отпуска в интервале 200–400°C отмечается повышение сопротивления пластической деформации: происходит монотонное увеличение предела текучести $\sigma_{0.2}$ закаленных на воздухе образцов примерно на 11% (от 747 до 829 МПа). При дальнейшем повышении температуры отпуска до

500°C предел текучести уменьшается на 3% ($\sigma_{0.2} = 805$ МПа). При этом предел прочности образцов σ_B во всем интервале температур отпуска 200–500°C снижается, но незначительно – от 1021 до 1001 МПа (рис. 3).

После отпуска при 500°C снижение предела текучести стали происходит за счет коагуляции

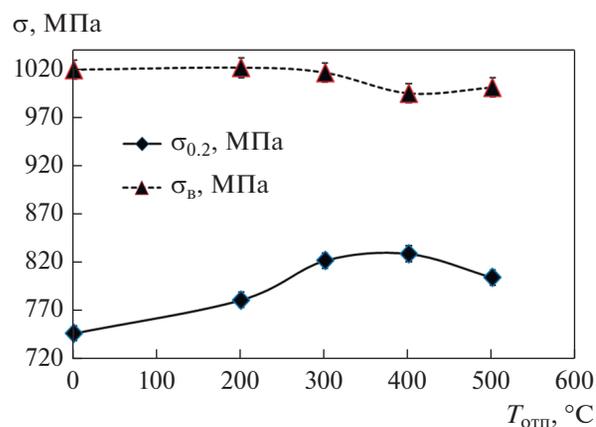


Рис. 3. Зависимость прочностных характеристик закаленной на воздухе стали 07X3ГНМЮА от температуры отпуска.

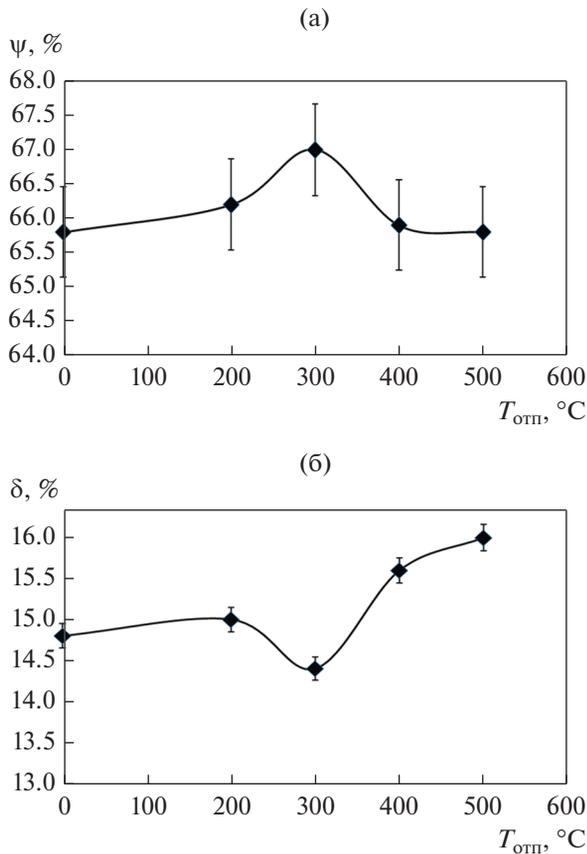


Рис. 4. Пластические характеристики закаленной на воздухе стали 07X3ГНМЮА в зависимости от температуры отпуска: относительное сужение ψ , % (а); относительное удлинение δ , % (б).

карбидной фазы, уменьшения ее дисперсности. Реечная ориентировка карбидной фазы визуально не выявляется, структура состоит из высокодисперсной ферритокарбидной смеси (рис. 2д).

Характеристики пластичности стали 07X3ГНМЮА в зависимости от температуры отпуска изменяются незначительно. Изменения относительного сужения ψ (от 65.8 до 67.0%) были в пределах погрешности измерения (погрешность измерения $\epsilon < 1\%$).

Относительное удлинение δ оказалось несколько более чувствительной к отпуску характеристикой (рис. 4): при отпуске стали на 200, 400 и 500 °C относительное удлинение δ повышается с 14.8 до 15.0, 15.6 и 16.0%, соответственно (ϵ не превышает 1%). После отпуска при 300 °C на графике наблюдается провал, относительное удлинение уменьшается до 14.4%, закономерное повышение пластичности с ростом температуры отпуска не соблюдается.

Аномальные провалы в результате отпуска при 300 и 500 °C (отпускная хрупкость) наблюдаются при проведении испытаний на ударную вязкость

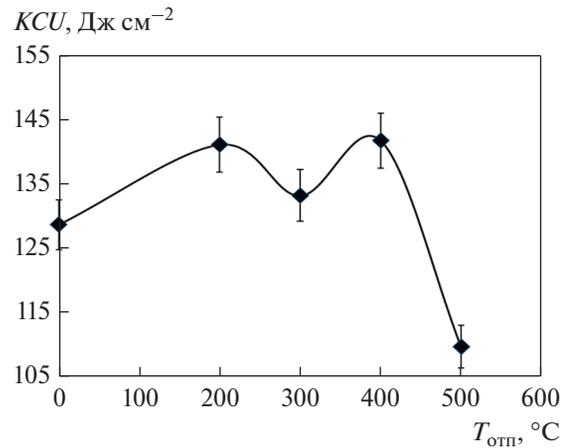


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости закаленной на воздухе стали 07X3ГНМЮА от температуры отпуска.

образцов с U-образным концентратором (рис. 5). Изменения ударной вязкости при увеличении температуры отпуска связано с изменением характера разрушения образцов (рис. 6).

После закалки на воздухе и самоотпуска излом представляет собой участки хрупкого разрушения сколом, чередующегося с участками ямочного вязкого разрушения (рис. 6а). Доля ямочного (вязкого) разрушения не превышает 10%. Четко различимые ручьистые узоры (типичные признаки разрушения сколом) представляют собой ступеньки между различными локальными фасетками скола одной и той же общей плоскости скола [9].

После отпуска при 200 °C полностью исчезают признаки хрупкого разрушения в результате релаксации закалочных напряжений. На поверхности изломов наблюдаются ямки (ячейки) различных размеров и ямки-конусы (рис. 6б). Разрушение происходит по механизму слияния микропор. На дне ямок отчетливо видны пластины второй фазы: карбиды размером не более 1–2 мкм. Соответственно, значение вязкости разрушения увеличивается от 129 Дж/см² у закаленной на воздухе стали до 141 Дж/см² после отпуска при 200 °C.

Примерно такой же уровень ударной вязкости сохраняется и после отпуска при 400 °C (142.0 Дж/см²). В изломе доля ямок-конусов значительно возрастает (рис. 6г), доминирующим механизмом разрушения является образование и слияние микропор. На гладких участках ручьистый узор не наблюдается, и эти участки не должны идентифицироваться, как фасетки скола или квазискола. Скорее всего, это не что иное, как граница зерна или слияние мелких чашечек в одну большую ямку-конус. Излом характеризуется наличием большого количества частиц второй фазы (карбидов).

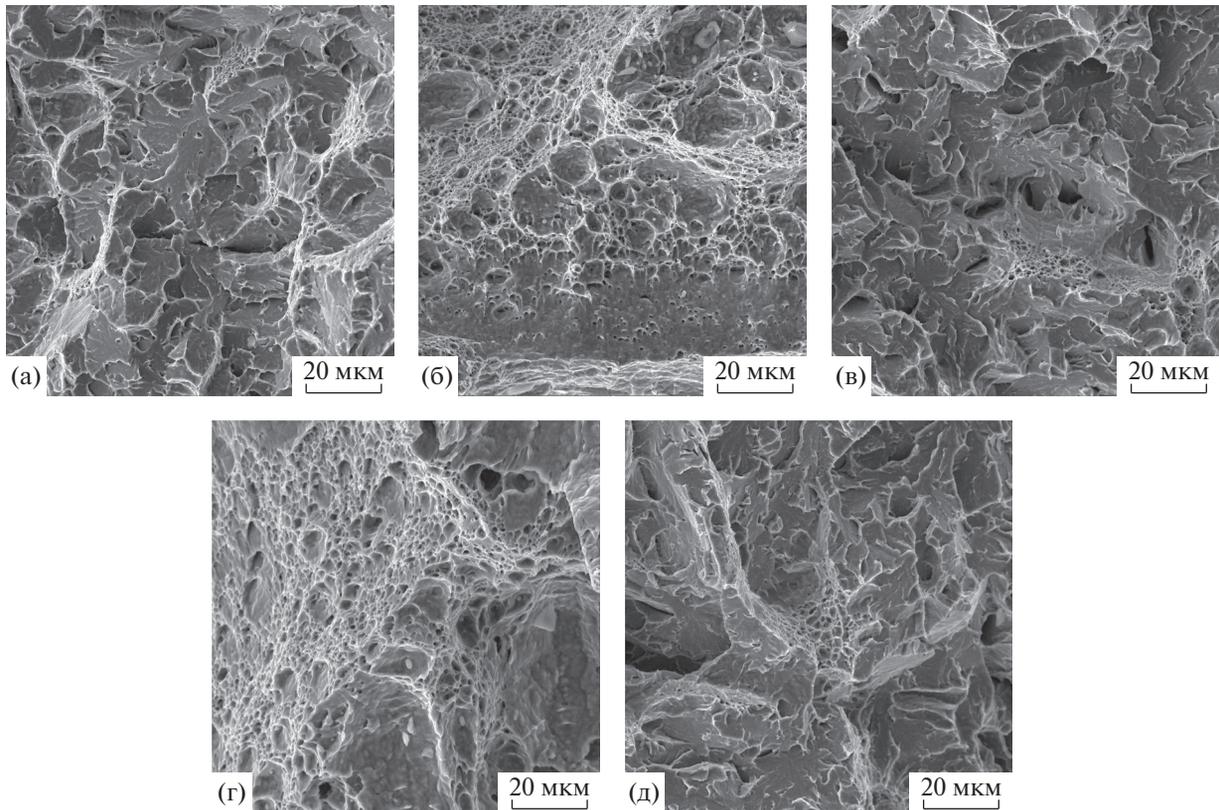


Рис. 6. Характер разрушения образцов из стали 07X3ГНМЮА: после закалки (а); после отпуска 200°C (б); после отпуска 300°C (в); после отпуска 400°C (г); после отпуска 500°C (д).

Резкому снижению ударной вязкости стали 07X3ГНМЮА в результате отпуска при 300°C (133 Дж/см²) и 500°C (110 Дж/см²), связанному с явлением отпускной хрупкости, соответствует изменение вида излома. Ямочный, вязкий характер излома после отпуска при 200 и 400°C после отпуска при 300 и 500°C сменяется на смешанный с признаками интеркристаллитного. Данное разрушение классифицируется как скол (на рис. 6в, д четко различимы ручьистые узоры) и происходит по внутренним объемам мартенситных реек и по границам между ними вследствие образования при отпуске межреечных карбидов.

Необходимо отметить, что на изломе после отпуска при 300°C все же присутствует небольшое количество ямок и ямок-конусов, которые образовались в результате слияния микропор. Дисперсность ячеек выше, чем после отпуска при 200°C, что связано с тем, что очагами зарождения микропустот в основном служат обособившиеся дисперсные карбидные частицы. Излом после отпуска при 300°C носит смешанный характер, где доля хрупкой составляющей разрушения значительно превышает вязкую.

После отпуска при 500°C межзеренное разрушение идет путем катастрофического хрупкого расщепления границ раздела зерен за счет ослаб-

ления их карбидными частицами и сегрегациями неметаллических примесей, в основном фосфора [10]. Неоднородность сегрегаций на границах зерен приводит к смешанному механизму разрушения, в результате в межзеренном изломе наблюдаются участки ямочного рельефа. Предпочтительный путь разрушения по границам зерен не является непрерывным, и в изломе в небольшом количестве присутствуют участки разрушения сколом с ярко выраженным ручьистым строением.

Таким образом, представленные фотографии изломов позволяют показать четкую связь между характером разрушения и механическими характеристиками стали 07X3ГНМЮА, которые зависят, в первую очередь, от структурного состояния стали, формирующегося при термической обработке, как на микро, так и на субмикроуровне.

Нелинейный характер зависимостей механических характеристик от температуры отпуска необходимо учитывать при разработке упрочняющих технологий для деталей машин и конструкций, изготовленных из данной стали.

ВЫВОДЫ

1. В процессе закалки на воздухе в стали 07X3ГНМЮА развиваются процессы самоотпус-

ка, образуется пакетный “бесструктурный” мартенсит, чередующийся с участками феррита. Начавшиеся процессы распада мартенсита при охлаждении на воздухе продолжают в стали и при последующих отпусках при 200, 300, 400 и 500°C с образованием ферритокарбидной смеси разной степени дисперсности.

2. Характеристики пластичности стали 07Х3ГНМЮА в зависимости от температуры отпуска изменяются немонотонно. При температурах отпуска 300 и 500°C наблюдается аномальное уменьшение ударной вязкости (на 6 и 23% соответственно). Относительное удлинение δ после отпуска при 300°C снижается на 4%.

3. В интервале температур отпуска 200–400°C в стали отмечается повышение сопротивления пластической деформации – происходит монотонное увеличение предела текучести (на 11%). Дальнейшее повышение температуры отпуска до 500°C приводит к его снижению (на 3%).

4. Повышение температуры отпуска сопровождается изменением характера разрушения образцов. Если после закалки и самоотпуска излом представляет собой участки хрупкого разрушения сколом, чередующегося с участками ямочного вязкого разрушения, то после отпуска при 200 и 400°C разрушение уже происходит полностью по механизму слияния микропор.

5. После отпуска при 300 и 500°C ямочный, вязкий характер излома, наблюдающийся после отпуска при 200 и 400°C, сменяется на хрупкий интеркристаллитный, что связано с явлением отпускной хрупкости. Данные полученные с помощью растровой электронной микроскопии находятся в хорошем согласии с результатами механических испытаний.

6. Нелинейный характер зависимостей механических характеристик от температуры отпуска необходимо учитывать при разработке упрочняющих технологий для деталей машин и конструкций, изготовленных из данной стали с пределом текучести до $\sigma_{0.2} = 830$ МПа.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-6069.2018.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Клейнер Л.М.* Конструкционные высокопрочные низкоуглеродистые стали мартенситного класса / Учеб. пособие. Пермь: Перм. Гос. Техн. Ун-т, 2008. 303 с.
2. *Клейнер Л.М.* Новые конструкционные материалы: низкоуглеродистые мартенситные и порошковые стали / Приклад. металловедение. Учеб. пособие для студентов вузов. Пермь: Перм. Гос. Техн. Ун-т, 2004. 141 с.
3. *Новиков И.И.* Металловедение. В 2 т-х. Т. 1. Основы металловедения; Т. 2. Термическая обработка. Сплавы. М.: МИСИС, 2014. 1020 с.
4. *Клейнер Л.М., Симонов Ю.Н.* Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей // МИТОМ. 1999. № 8. С. 46–48.
5. *Клейнер Л.М., Симонов Ю.Н., Ермолаев А.С., Закирова М.Г.* Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей, закаленных из межкритического интервала температур // Конструкции из композиционных материалов. 2006. Вып. 4. С. 172–177.
6. *Гуляев А.П.* Металловедение. 7-е изд. М.: Металлургия, 2015. 544 с.
7. *Белоус М.В., Черепнин В.Т., Васильев М.В.* Превращения при отпуске стали. М.: Металлургия, 1973. 232 с.
8. *Воробьев Р.А., Дубинский В.Н., Евстифеева В.В.* Оценка трещиностойкости среднеуглеродистой хромникельмодифицированной стали на основе комплексного исследования изломов, микроструктуры и физико-механических свойств // ФММ. 2017. Т. 118. № 10. С. 1065–1071.
9. *Феллоуз Дж.* Фактография и атлас фактограмм / Справочник. Пер. с англ. Шур Е.А. М.: Металлургия, 1982. 489 с.
10. *Утевский Л.М., Гликман Е.Э., Карк Г.С.* Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. М.: Металлургия, 1987. 222 с.