

УДК 669.15

С.А. Крылов¹, А.А. Макаров¹, М.А. Дружнов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ СО СВЕРХРАВНОВЕСНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ АЗОТА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-3-13

В продолжение совместных работ ФГУП «ВИАМ» и ИМЕТ РАН им. Байкова в области получения низколегированных сталей с повышенными механическими свойствами со сверхравновесным содержанием азота проведены исследования механических свойств, структуры и химического состава полученной стали. Показано, что сталь 10Х3А со сверхравновесным содержанием азота (до 0,2% (по массе)), полученная на полупромышленной установке электрошлакового переплава под давлением ДЭШП-0,1 (ФГУП «ВИАМ»), обеспечивает высокий уровень свойств (предел прочности 1670 МПа) при сохранении высоких пластических характеристиках (удлинение 10%, сужение 50%).

Ключевые слова: высокопрочная сталь, низколегированная сталь, азотсодержащая сталь, азот, сверхравновесное содержание азота, электрошлаковый переплав под давлением, структура, механические свойства.

S.A. Krylov¹, A.A. Makarov¹, M.A. Druzhnov¹**STUDY OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL WITH SUPER-EQUILIBRIUM NITROGEN CONTENT**

In continuation of joint work of FSUE «VIAM» and IMET RAN named after Baikov, in the field of obtaining low-alloy steels with increased mechanical properties with a super-equilibrium nitrogen content, the mechanical properties, structure, and chemical composition of the obtained steel were studied. It is shown that steel 10KH3A with a super-equilibrium nitrogen content (up to 0,2) electroslag remelting under pressure DESHP-0,1 (FSUE «VIAM») provides a high level of properties (ultimate strength 1670 MPa) while maintaining high mechanical characteristics (elongation 10%, constriction 50%).

Keywords: high-strength steel, low-alloy steel, nitrogen-containing steel, nitrogen, super-equilibrium nitrogen content, electroslag remelting under pressure, structure, mechanical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Разработка и исследование экономнолегированных высокопрочных конструкционных сталей для высоконагруженных изделий современной техники – актуальное научное направление в мире [1–4]. Высокоазотистые стали являются прорывными, высокотехнологичными и перспективными материалами для современной металлургии [5–9]. В работе [10] указано, что развитию металлургического процесса с применением давления – основного способа изготовления таких сталей – препятствует ряд серьезных проблем, в том числе отмечены такие, как относительно высокая стоимость полученных сталей при электрошлаковом переплаве под давлением (ЭШПД), недостаточная изученность азота как легирующего элемента, незначительное число разработанных марок высокоазотистых сталей.

Появление во ФГУП «ВИАМ» в 2015 г. установки ДЭШП-0,1 (давление – до 3 МПа) позволило начать получение новых сталей методом ЭШПД, а также их исследование. В ИМЕТ РАН были инициированы работы по созданию и проведению исследований перспективной стали 10X3A [11]. Первый лабораторный слиток этой стали с 0,1% (по массе) С и 0,18% (по массе) N получен под руководством профессора Ц.В. Рашева в Институте металлургии Болгарской академии наук на установке литья с противодавлением азота и исследован в ИМЕТ РАН. Исследование этой и других низколегированных высокоазотистых сталей показало: технологичность, достаточную для горячей пластической деформации; зависимость механических свойств от температуры нагрева под закалку; склонность к дисперсионному твердению с максимумом прочности после отпуска при температуре ~400 °С [12]. У стали 10X3A за счет структуры состаренного азотистого мартенсита обеспечен уникально высокий для низколегированных низкоуглеродистых сталей уровень прочностных свойств ($\sigma_{0,2} \geq 1400$ МПа, $\sigma_b \geq 1600$ МПа) при наличии хорошей пластичности ($\delta \geq 12\%$, $\psi \geq 40\%$) [12, 13].

Метод ЭШПД используется для выплавки высоколегированных коррозионно-стойких высокоазотистых сталей ответственного назначения [14]. При условии использования метода с применением большой сталеплавильной ванны, в разы более производительного и экономичного, чем метод ЭШПД [10], изготовление стали 10X3A в качестве материала для тяжело нагруженных деталей и не подвергаемых сварке конструкций (взамен высокопрочных сталей, легированных Ni, Mo, W, V и другими дорогими и дефицитными элементами) будет экономически более выгодно и целесообразно. На данном этапе получение стали 10X3A методом ЭШПД [15–17] позволит изучить комплекс ее технологических и эксплуатационных свойств, а также будет способствовать совершенствованию технологического процесса в печи ДЭШП-0,1.

Ранее проведенные исследования стали 10X3A [12, 13, 17] не содержали данных о пористости отливок, виде и количестве неметаллических включений в стали после ЭШПД, а также отсутствовала информация об ударной вязкости стали. Цель данной работы – оценить качество металла данной марки стали, полученной во ФГУП «ВИАМ» методом ЭШПД с использованием установки ДЭШП-0,1, и уровень ее механических свойств при испытаниях на растяжение и ударный изгиб.

Материалы и методы

Установка ДЭШП-0,1, подготовка электрода и процесс выплавки

Выплавку стали 10X3A проводили в полупромышленной установке ДЭШП-0,1 путем электрошлакового переплава под давлением. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1, а. Расходуемый электрод состоял из катаного прутка из стали 10 диаметром 60 мм и приваренных к нему с двух сторон тонкостенных (толщина 1 мм) трубок из стали 20, заполненных азотированным феррохромом марки ФХН10 мелкой фракции. (Предварительно феррохром равномерно распределяли внутри трубок вибрационным методом, концы трубок зажимали на ковочном молоте и сплющивали по всей длине.) Схема сборки электрода представлена на рис. 1, б. Переплав сборного электрода производили в кристаллизаторе диаметром 130 мм.

Подготовка к переплаву включала следующие технологические операции:

- установка электрода в «стартовый пакет»;
- заполнение бункеров-дозаторов флюсом и раскислителями;
- откачка камеры плавки до давления <0,05 МПа;
- напуск инертной среды (азота) при давлении 2,5 МПа;
- прогрев электрода, наведение шлаковой ванны;
- напуск давления до 3 МПа.

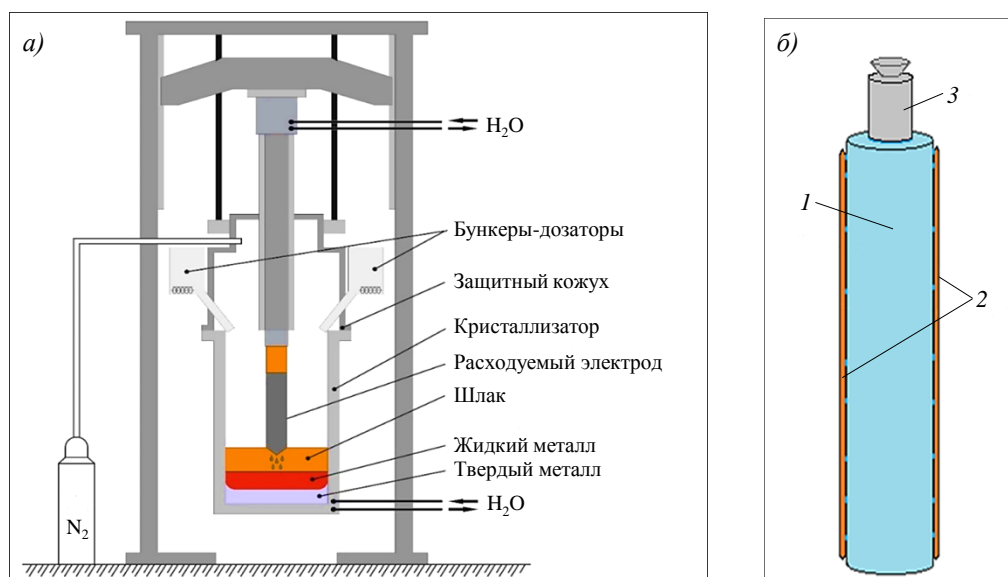


Рис. 1. Принципиальная схема установки ДЭШП-0,1 (а) и расходный сборный электрод (б): 1 – переплавляемый электрод; 2 – приваренные трубки с лигатурой; 3 – инверторная головка

Затем начинали процесс плавки.

Для наведения шлаковой ванны использовали флюс марки АНФ-6, содержащий пониженные значения массовых долей кремния и углерода – элементов, снижающих растворимость азота в твердых растворах на основе железа. Состав флюса по ГОСТ 30756–2001 следующий: основа – CaF_2 ; 25–31% Al_2O_3 ; $\leq 8\%$ CaO ; $\leq 2,5\%$ SiO_2 .

Электрический режим плавки представлен на рис. 2. Выход на рабочий режим плавки происходил в течение 3–4 мин, так как за это время на дне кристаллизатора наводится ванна расплава. Для ЭШПД выбраны следующие параметры:

Масса электрода, кг	27,3
Количество флюса, кг	3,0
Частота тока, Гц	50
Сила тока, кА	До 3,2
Напряжение, В	До 39
Средняя скорость плавки, мм/мин	17
Защитная атмосфера	Азот
Давление, МПа	3

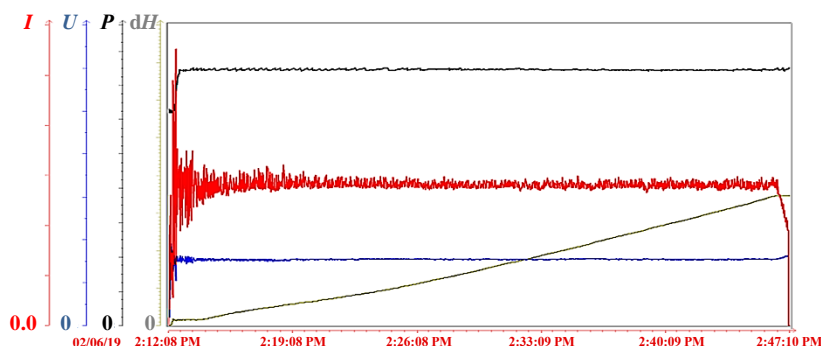


Рис. 2. Параметры режима электрошлакового переплава под давлением азота при получении слитка из стали 10Х3А (где I – сила тока, U – напряжение, P – давление газа в камере печи, dH – перемещение электрода)

Плавка заканчивалась выводом усадочной раковины и выдержкой слитка в камере печи под давлением. По окончании выдержки проводили выгрузку и «раздевание» слитка, а также визуальный контроль его поверхности на наличие дефектов. На рис. 3 представлен внешний вид слитка, полученного методом ЭШПД.



Рис. 3. Внешний вид выплавленного в печи ДЭШП-0,1 слитка экспериментальной стали 10X3A диаметром 130 мм

На гладкой поверхности слитка отсутствовали дефекты типа «шагрени», газовые поры и нерасплавленные частицы азотосителя. На поперечном срезе слитка также визуально не выявлено газовой пористости.

После обточки и резки слитка на заготовки массой 5–7 кг с удалением прибыльной и донной части, на прессе с усилием 1000 тс производили деформацию заготовок на сутунки квадратного сечения 30×30 мм. Характерных поверхностных деформационных дефектов на сутунках не обнаружено. В дальнейший передел сутунки переданы без дополнительной поверхностной зачистки, но с подрезкой торцов. Ковку сутунок производили за один проход на молоте массой 400 кг в диапазоне температур 750–1000 °С на прутки диаметром 16 мм. Затем прутки разрезали на заготовки для изготовления образцов для проведения испытаний.

Химический состав слитка. Расчетная и полученная концентрация азота

Исследования химического состава проводили на гомогенизированном за счет термообработки и горячей пластической деформации металле прутков из стали 10X3A со сверхравновесным содержанием азота. Химический состав стали определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре Varian AA240FS в соответствии с ГОСТ 23859.3–79 и ГОСТ Р ИСО 13898-4-2–2007. Содержание газов и примесей контролировали при помощи анализаторов Leko TC-600 (анализ азота и кислорода) и Leko CS-600 (анализ углерода и серы). Прутки для проведения газового и химического анализов отбирали из металла нижней, средней и верхней частей слитка. Результаты исследования химического состава стали 10X3A в указанных частях слитка и усредненные данные по слитку в целом приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа содержания легирующих и примесных элементов в слитке стали 10X3A

Части слитка	Содержание элемента, % (по массе)								
	C	N	Cr	Mn	Ni	Si	S	P	O
Прибыльная	0,121	0,17	3,32	0,40	0,14	0,041	0,021	0,0042	0,0015
Средняя	0,134	0,17	3,30	0,40	0,15	0,06	0,025	0,004	0,0012
Донная	0,127	0,18	3,32	0,39	0,11	0,052	0,024	0,0034	0,0011
Среднее значение	0,127	0,173	3,31	0,40	0,13	0,05	0,023	0,004	0,0013

Термическую обработку образцов проводили в термических печах Nabertherm 15/56 НА по следующим режимам:

1 – без дополнительной термообработки, образцы изготавливали из горячекованных прутков после охлаждения на воздухе;

2 – закалка с последующим охлаждением в воде;

3 – закалка с охлаждением в воде + средний отпуск с охлаждением в воде.

Испытания механических свойств при температуре 20 °С проводили: при растяжении – на испытательной машине Tiratest 2300/1 по ГОСТ 1497–84 на пятикратных образцах; на ударный изгиб – на маятниковом копре ИО 5003-0,3 по ГОСТ 9454–78 с энергией удара копра 300 Дж. Микротвердость по Виккерсу определяли на твердомере ИТБРВ-187,5М по ГОСТ 9450–76.

Для проведения металлографических исследований в соответствии с ГОСТ 8233–56 и ГОСТ 1778–70 изготовили образцы размером 10×10×10 мм. Количественную оценку микропор в металле слитка и исследование микроструктуры проводили с использованием светопольного оптического микроскопа Olympus GX53. Микропоры изучали на нетравленном шлифе. Травление металлографических шлифов для анализа микроструктуры проводили в 8%-ном спиртовом растворе HNO₃.

Идентификацию типа неметаллических включений проводили на основе рентгеноспектрального анализа состава включений по ГОСТ Р 8.628–2007 с использованием растрового электронного микроскопа JSM-840. Оценка количества неметаллических включений проводили в соответствии с ГОСТ 1778–70, подсчитывая, в том числе, число полей зрения с неметаллическими включениями размером свыше определенного балла (анализировали цифровые изображения).

Тонкую структуру стали 10X3A изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг на микроскопе Jeol TEM 2005.

Результаты и обсуждение

Достигнутая концентрация азота

В полученном методом ЭШПД металле стали 10X3A при переплаве под давлением азота 3 МПа (30 ат) достигнута концентрация азота 0,173% (по массе) (табл. 1). Расчет предельной растворимости азота при выплавке стали среднего химического состава, указанного в табл. 1, в равновесных условиях (под давлением 1 МПа) и при выплавке под давлением 3 МПа, проведенный по методике, изложенной в работе [17], по формуле (1) показал, что в первом случае растворимость азота [N] составляет 0,062% (по массе), а во втором: 0,338% (по массе). Обычно максимально возможное содержание азота в твердом, без пузырей и газовой пористости металле определяют, используя эмпирически определенный коэффициент композиционной устойчивости, по формуле (2) [18]. Для аустенитных хромоникельмарганцевых сталей этот коэффициент равен 0,78. Для полученного металла стали 10X3A данный коэффициент составил 0,51:

$$\lg[N]_{(T)} = -560/T - 1,06 - (2600/T - 0,39) \{ -0,048([Cr] + 0,5[Mn] - 2,45[C] - 0,9[Si] - 0,23[Ni] + 0,27[Mo] + 2,04[V] - 0,12[Cu] - 0,15[S] - [P]) + 3,5 \cdot 10^{-4}([Cr] + 0,5[Mn] - 2,45[C] - 0,9[Si] - 0,23[Ni] + 0,27[Mo] + 2,04[V] - 0,12[Cu] - 0,15[S] - [P])^2 + 0,13[N] \} + (700/T - 0,37) + 0,51 \lg P_{N_2}; \quad (1)$$

$$[N]_K = [N] \cdot K_y, \quad (2)$$

где K_y – эмпирически определенный коэффициент композиционной устойчивости.

Исследование качества металла слитка

Как отмечалось ранее, в опубликованных работах [12, 13, 17], посвященных исследованиям стали 10X3A, не содержалось данных о пористости отливок, виде и количестве неметаллических включений в стали после ЭШПД. Полученные при исследовании пористости результаты приведены в табл. 2. Как показали исследования металла слитка, ему все же присуще наличие небольшого количества пор (рис. 4, а). Проведенная

в данной работе горячая пластическая деформация ковкой способствовала уменьшению площади, занимаемой порами относительно всей площади исследуемого образца, – с 0,07 до 0,013%, вероятно за счет их частичного «схлопывания» (табл. 2). Дополнительное газоизостатическое прессование (ГИП) снизило этот параметр уже незначительно – до 0,010%. Деформация и ГИП не оказали существенного влияния на минимальный размер пор (4–5 мкм).

Таблица 2

Характеристики пористости металла высокоазотистой стали 10X3A

Состояние металла	Площадь, занимаемая порами относительно всей площади исследуемого образца, %	Диаметр пор, мкм		СКО*
		минимальный	максимальный	
Литой	0,07	5,00	24,00	4,84
Послековки	0,013	5,64	33,53	5,90
Послековки и ГИП	0,01	4,00	23,30	5,80

*Среднее квадратическое отклонение.

Известно, что электрошлаковый переплав способствует существенному рафинированию металла, особенно по сере; снижается также количество кислорода и водорода в металле. Исходный материал электрода для ЭШПД представлял собой сталь 20 с достаточно высокой степенью загрязненности по неметаллическим включениям [19–22]. Поэтому даже проведенный ЭШПД не устранил неметаллические включения в структуре стали (рис. 4, б). Энергодисперсионный (микрорентгеноспектральный) анализ горячекованой стали показал, что в стали поле ЭШПД присутствуют в основном оксидные включения размером 2–5 мкм и частицы сульфидов (FeS, MnS), строчечные и глобулярные. Размер сульфидов не превышает 12 мкм, оксидов 5 мкм, карбидов и нитридов <5 мкм, не превышающих 2 баллов шкалы оценки содержания неметаллических включений.

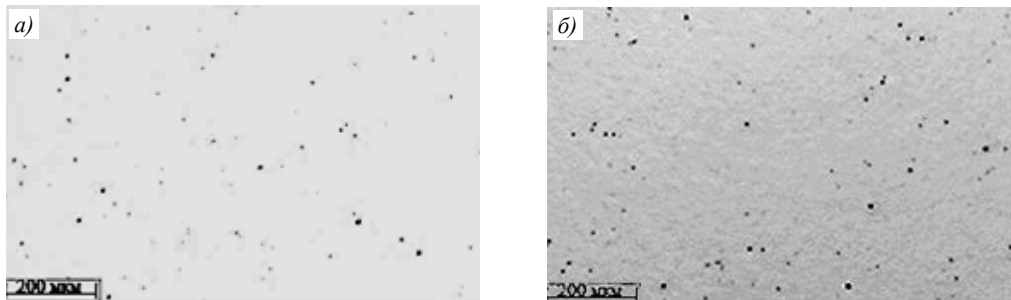


Рис.4. Поры в металле до проведенияковки и газоизостатического прессования (а) и неметаллические включения в металле послековки (б)

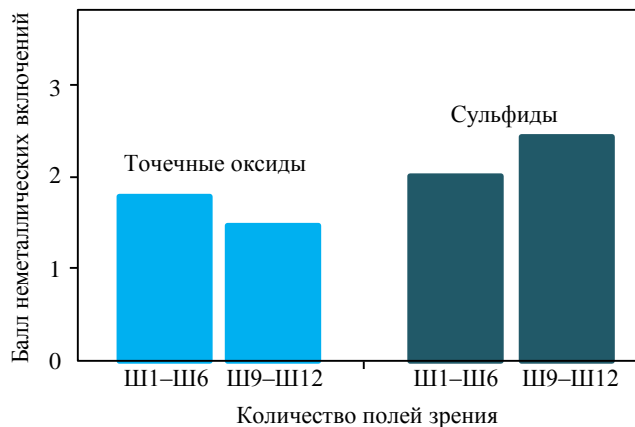


Рис. 5. Балльная оценка неметаллических включений в стали 10X3A

На рис. 5 представлена гистограмма с балльной оценкой неметаллических включений в горячекованой стали. Видно, что в составе стали представлены приблизительно в равном количестве включения от Ш1 до Ш6 и от Ш9 до Ш12, где диаметр поля зрения микроскопа соответствует диаметру фотоэталона, деленному на увеличение.

Микроструктура и фазовый состав стали в литом состоянии и после термомодеформационной обработки

Литой металл имеет дендритное строение (рис. 6, а) и характеризуется ликвационной неоднородностью химического состава. В состоянии без термообработки сталь имеет мелкозернистую феррито-перлитную структуру (рис. 6, б) – средний размер зерна составляет 4,2 мкм. Строение перлитных участков выявляется при использовании метода ПЭМ (рис. 7).

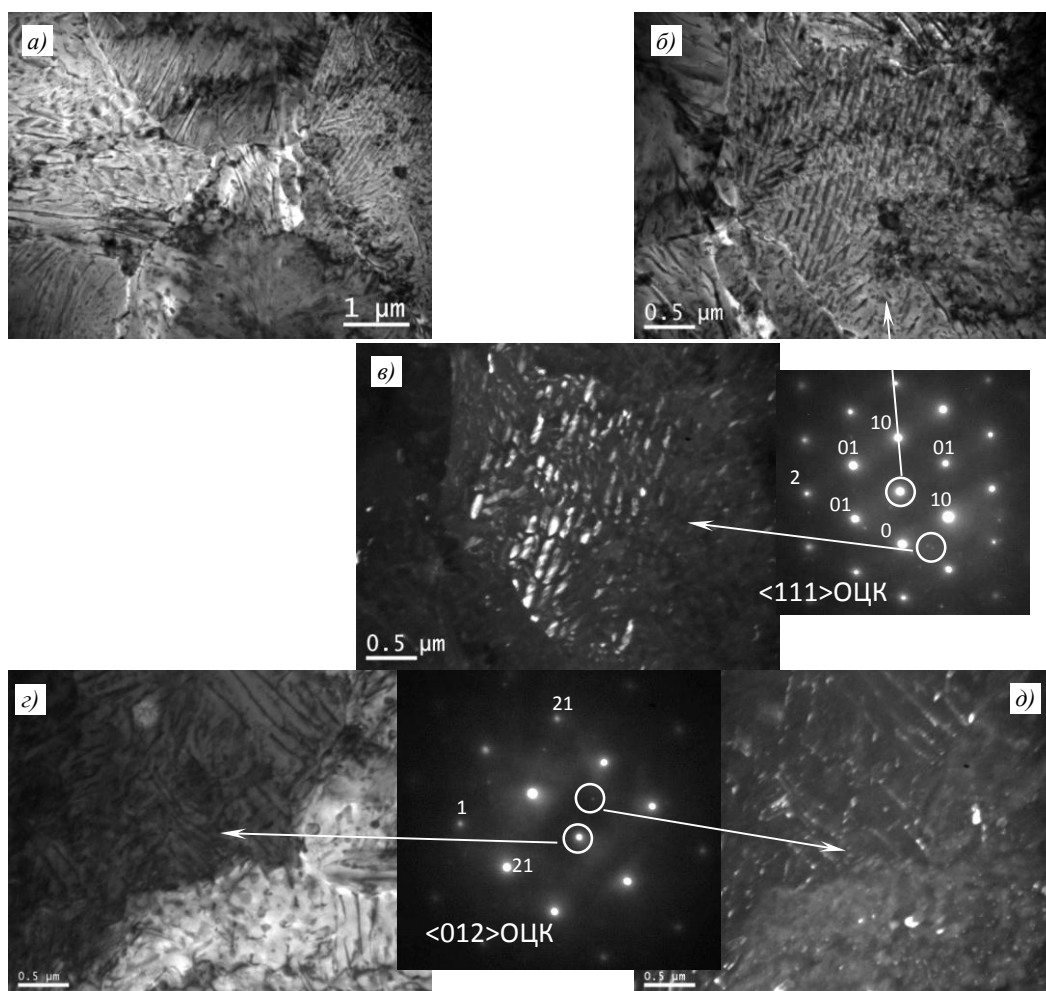


Рис. 6. Тонкая структура стали 10X3A без термообработки: а – зеренная структура; б – светлопольный снимок зерна α -Fe, близкого к оси зоны $\langle 111 \rangle$; в – темнопольный снимок зерна, близкого к оси зоны $\langle 111 \rangle$, в рефлексе карбидов Fe_3C ; г – светлопольный снимок зерна α -Fe, близкого к оси зоны $\langle 012 \rangle$; д – темнопольный снимок зерна, близкого к оси зоны $\langle 012 \rangle$, в рефлексе карбидов Fe_3C (на вставках электронограммы с рефлексами, соответствующими осям зон $\langle 111 \rangle$ и $\langle 012 \rangle$ ОЦК-решетки)

После ковки и термообработки (закалка) структура стали 10X3A мелкозернистая, средний размер зерна составляет 9 мкм (по данным световой микроскопии).

Структура представляет собой пакетный мартенсит (рис. 6, б и 7). На границах зерен выявлены карбиды в виде точечных включений [23].

На рис. 6 и 7 представлены изображения тонкой структуры литой и закаленной стали. Размер многих зерен мартенсита не превышает 2,5–3 мкм. Пластины пакетного мартенсита разделены малоугловыми границами. Для структуры характерна высокая плотность дислокаций. На кольцевой электронограмме (рис. 7, д) присутствуют рефлексы карбидов железа Fe_3C . Следует отметить, что эти рефлексы имеются также и на электронограммах, полученных для металла стали 10X3A, во всех изученных структурных состояниях: литого металла, металла послековки и закалки,ковки с последующей закалкой и отпуском. На рис. 7, а по границам зерен видны наноразмерные неидентифицированные частицы. Вероятно, именно они ответственны за снижение ударной вязкости стали 10X3A в состоянии после закалки, по сравнению с литым состоянием.

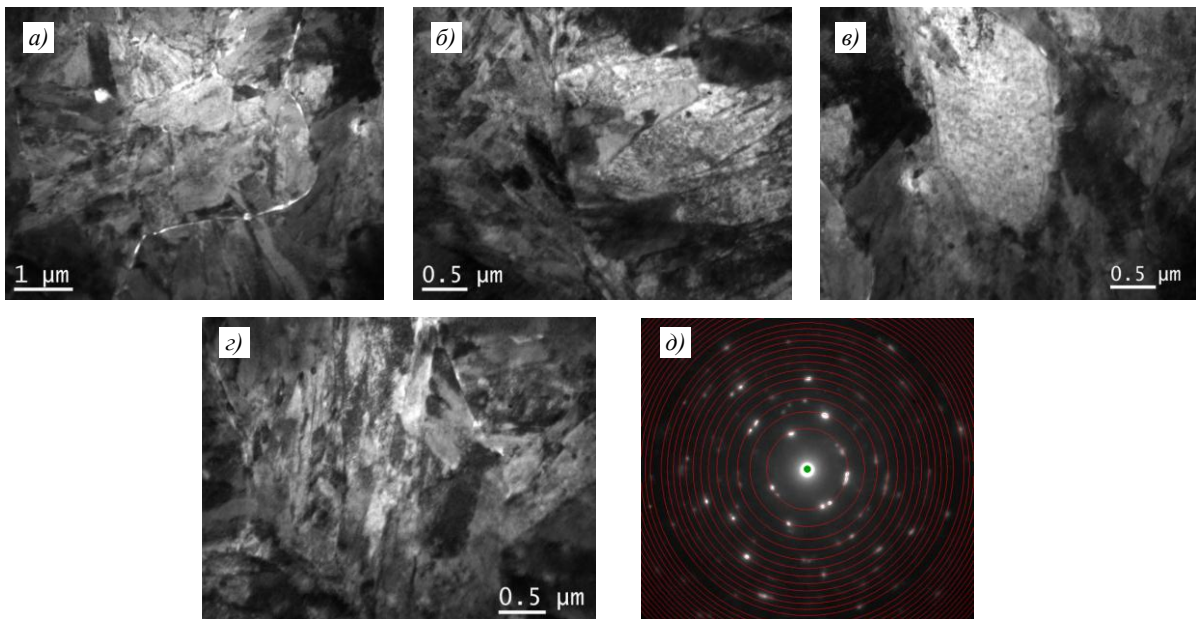


Рис. 7. Тонкая структура стали 10X3A после закалки с температуры 950 °С:

а–с – светлопольные снимки, полученные в дифракционном контрасте, который зависит от ориентировки кристаллической решетки; д – электронограмма, полученная от нескольких зерен с различной ориентировкой (кольцам соответствуют межплоскостные расстояния ОЦК-железа с соответствующими индексами; рефлексы, не лежащие на кольцах, соответствуют карбидам Fe_3C)

Поскольку в стали присутствует 3% (по массе) хрома и содержится ~0,17% (по массе) азота, можно ожидать наличия в стали нитридов хрома. Для выявления нитридной фазы, размер которой (по известным научно-техническим литературным данным) может составлять несколько нанометров (нитриды CrN), необходимы дополнительные исследования методом ПЭМ.

Механические свойства

На рис. 8 представлена гистограмма, характеризующая механические свойства стали 10X3A. В образцах литой стали феррито-перлитная структура определяет невысокий уровень прочностных характеристик и высокие пластические свойства [24]. Сталь в литом состоянии характеризуется высокими значениями ударной вязкости (288 Дж/см²). Твердость литой стали составляет 15,5 HRC.

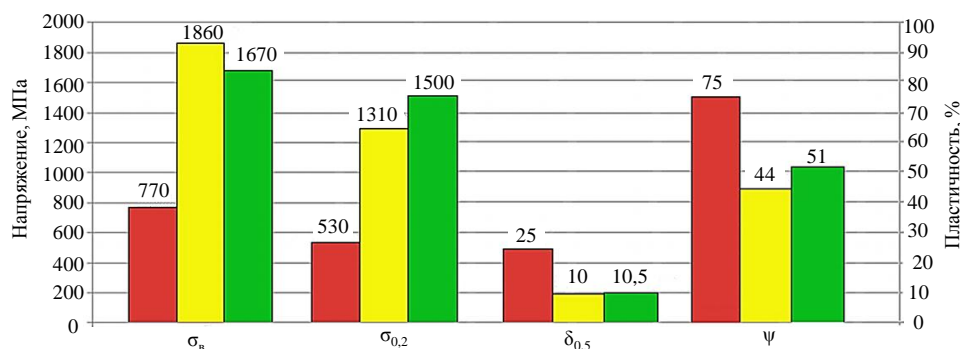


Рис. 8. Механические свойства стали 10X3A в литом состоянии (■), после ковки и закалки (■) и после ковки, закалки и старения (■)

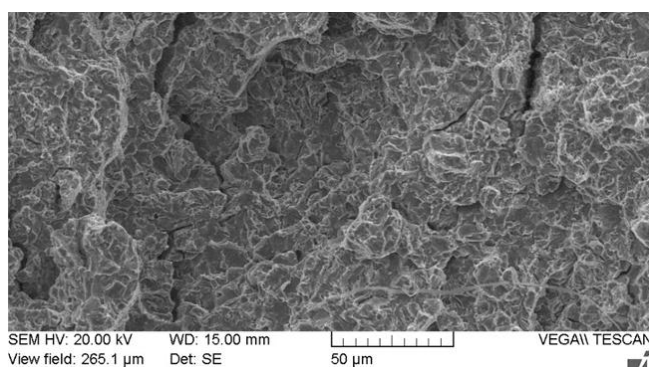


Рис. 9. Участок излома состаренной стали 10X3A

Высокоазотистая сталь 10X3A после закалки и закалки со старением характеризуется высокой твердостью 48 HRC. Закалка обеспечивает высокий уровень прочности при сохранении удовлетворительной пластичности 10%. Старение позволяет повысить предел текучести с 1310 до 1500 МПа. Ударная вязкость после закалки снижается до 66 Дж/см², а после старения – до 30 Дж/см². При фрактографическом анализе изломов закаленной и состаренной стали не выявлено особенностей структуры, которые способствовали бы снижению ударной вязкости, в том числе – негативной роли пор в трещинообразовании (рис. 9).

Заключения

Проведенные исследования подтвердили возможность получения методом ЭШПД на российском оборудовании высокоазотистой низколегированной стали 10X3A с 0,173% (по массе) азота и возможность получения у такой стали после закалки и закалки со старением по режимам, предложенным в работах [12, 13], высокого уровня твердости (48 HRC) и прочностных свойств ($\sigma_b=1670$ МПа, $\sigma_{0,2}=1500$ МПа) при удовлетворительной пластичности ($\delta=10\%$, $\psi=51\%$). Впервые для данной стали оценена ударная вязкость в литом, закаленном и состаренном состоянии и показано, что она является высокой у феррито-перлитной литой стали (288 Дж/см²) и снижается после образования мартенсита при закалке до 60 Дж/см².

Впервые проведены исследования пористости высокоазотистой стали 10X3A после ЭШПД, а также после проведенной ковки и ковки с ГИП. Показано, что при выплавке по использованному режиму ЭШПД сталь содержит микропоры размером от 5 до 24 мкм. Ковка и ковка с ГИП способствуют снижению пористости: площадь, занимаемая порами относительно всей площади исследуемого образца, снизилась после этих обработок с 0,07 до 0,013 и 0,010% соответственно.

Впервые проведены исследования чистоты по неметаллическим включениям после ЭШПД высокоазотистой стали 10X3A. Показано, что в стали присутствуют оксидные и сульфидные включения. Благодаря ЭШПД их размеры и количество невелики.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // *Металлы Евразии*. 2010. №2. С. 6–11.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
5. Рашев Ц.В., Елисеев А.В., Жекова Л.Ц., Богев П.В. Высокоазотистые стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. №7. С. 503–510. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-503-510.
6. Gavriljuk V.G., Berns H. High Nitrogen Steels: Structure, Properties, Manufacture, Applications. Berlin: Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1999. 379 p.
7. Stein G., Hucklenbroich I. Manufacturing and Applications of High Nitrogen Steels // *Journal Materials and Manufacturing Processes*. 2004. Vol. 19. Issue 1. P. 7–17.
8. High Nitrogen Steels and Stainless Steels. Manufacturing, Properties and Applications / ed. B. Raj. Woodhead Publishing, 2004. 224 p.
9. Speidel M.O. Nitrogen Containing Austenitic Stainless Steels // *Mathematischnaturwissenschaftlichen und Werkstofftechnik*. 2006. Vol. 37. No. 10. P. 876–880.
10. Рашев Ц.В., Жекова Л.Ц., Богев П.В. О развитии металлургии под давлением // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. №1. С. 60–66 DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-60-66.
11. Высокопрочная низколегированная азотосодержащая мартенситная сталь: пат. 2638873 Рос. Федерация; заявл. 26.12.16; опубл. 18.12.17.
12. Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. Структура и свойства низколегированных высокоазотистых мартенситных сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. №2. С. 3–7.
13. Блинов В.М., Костина М.В., Лукин Е.И., Блинов Е.В., Ригина Л.Г., Мурадян С.О. Влияние термической обработки на структуру и механические свойства низколегированной стали 10X3A со сверхравновесным содержанием азота // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. №7. С. 38–41.
14. Ригина Л.Г. Исследование и разработка технологии ЭШП и ЭШПД хромомарганцевых сталей, легированных азотом: дис. ... канд. тех. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 2005. 146 с.
15. Крылов С.А., Евгенов А.Г., Щербakov А.И., Макаров А.А. Новая электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1: освоение и перспективы развития // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2016. №5 (41). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-4-4.
16. Крылов С.А., Евгенов А.Г., Макаров А.А., Тоньшева О.А. Слиток электрошлакового переплава под давлением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2017. №3 (51). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-3-3.

17. Костина М.В., Ригина Л.Г., Блинов В.М., Мурадян С.О., Крылов С.А. Технология получения низколегированной мартенситной стали 10X3A со сверхравновесным содержанием азота // *Электromеталлургия*. 2019. №2. С. 18–26. DOI: 10.31044/1684-5781-2019-0-2-18-26.
18. Ригина Л.Г., Васильев Я.М., Дуб В.С. и др. Легирование сталей азотом // *Электromеталлургия*. 2005. №2. С. 14–19.
19. Крылов С.А., Щербаков А.И., Макаров А.А., Тонышева О.А. Снижение содержания неметаллических включений в коррозионностойкой азотсодержащей стали // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2017. №5 (53). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-1-1.
20. Шестаков И.И., Вознесенская Н.М., Тонышева О.А. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и свойства высокопрочной коррозионностойкой стали марки 17X13H4K6CAM3ч // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №6 (42). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-2-2.
21. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. М.: *Металлургия*, 1969. 472 с.
22. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: *Металлургия*, 1977. 431 с.
23. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю.П. Солнцева. СПб.: *Профессионал; Мир и семья*, 2003. 1066 с.
24. Barannikova S.A., Zuev L.B. The effect of Interstitial Impurity Content in Austenitic Steel Monocrystals. High Nitrogen Steels, 2009 (MISIS, Moscow, 2009). 189 p.