ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА РАЗРУШЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ 04X20H6Г11М2АФБ

Л. А. СМЕРНОВ¹, д-р техн. наук, академик РАН, главный научный сотрудник;
С. П. БУРМАСОВ², канд. техн. наук, академик; С. В. БЕЛИКОВ³, канд. техн. наук, доцент, s.v.belikov@urfu.ru;
А. Ю. ЖИЛЯКОВ³, канд. техн. наук, доцент; А. С. ОРЫЩЕНКО⁴, член-корреспондент РАН,
генеральный директор; Г. Ю. КАЛИНИН⁴, д-р техн. наук, доцент, начальник отдела;
И. В. СОЛОВЬЕВ³, аспирант; М. Е. ЖИТЛУХИНА³, студент
(¹ Институт металлургии Уральского отделения, Россия, г. Екатеринбург;
² Российская инженерная академия, Россия, г. Екатеринбург; ³ Уральский федеральный
университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, г. Екатеринбург;
⁴ НИЦ “Курчатовский институт” – ЦНИИ КМ “Прометей”, Россия, г. Санкт-Петербург)

Аннотация. Легирование азотом придает стали высокую прочность, вязкость, коррозионную стойкость и позволяет экономить дорогостоящие легирующие элементы. В результате проведенных в последние десятилетия теоретических и экспериментальных исследований в целом решены проблемы оптимизации состава, пластической обработки и термомеханического упрочнения при создании новых перспективных высокопрочных коррозионностойких сталей, в частности стали 04X20H6Г11М2АФБ. Хорошо изучены вопросы комплексного упрочнения азотсодержащей толстолистовой стали указанного состава. Изучено влияние на механические и коррозионные свойства зеренной и субзеренной структуры металла, рекристаллизации, морфологии вторичных фаз, их состава и др. Однако практически нет работ, посвященных изучению морфологии, химического состава, плотности распределения сульфидных и оксидных неметаллических включений, оценке их влияния на деформируемость и свойства высокопрочных азотистых сталей, в том числе в Z-направлении. Целью настоящей работы является выявление зависимости характера разрушения стали при разрыве от типа и морфологии неметаллических включений. Выполнено исследование морфологии, химического состава, плотности распределения сульфидных и оксидных неметаллических включений, оценено их влияние на свойства горячекатаного листового проката экспериментальной высокопрочной азотистой стали 04X20H6Г11М2АФБ. Установлено, что неметаллические включения оксидов, сульфидов и нитридов могут располагаться в плоскости, параллельной Z-направлению, как равномерно, так и образовывать строчки, причем одна строчка может состоять из частиц различных типов. Относительно низкий уровень пластичности в Z-направлении обусловлен как общей загрязненностью металла оксидными включениями, так и строчечной морфологией скоплений неметаллических включений различных типов. Показано, что при относительно небольшой плотности строчек неметаллических включений основную роль в снижении пластичности в Z-направлении играет их протяженность. Если же строчечных скоплений много, то ведущую роль начинает играть расстояние между ними.

Ключевые слова: легирование стали азотом, высокопрочная азотистая сталь 04X20H6Г11М2АФБ, загрязненность неметаллическими включениями, сульфидные и оксидные неметаллические включения, морфология неметаллических включений, механические свойства стали.

Ссылка для цитирования: Смирнов Л.А., Бурмасов С.П., Беликов С.В., Жилияков А.Ю., Орыщенко А.С., Калинин Г.Ю., Соловьев И.В., Житлухина М.Е. Влияние морфологии неметаллических включений на разрушение перспективной высокопрочной коррозионностойкой стали 04X20H6Г11М2АФБ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 4. С. 372-381.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-372-381

EFFECT OF NONMETALLIC INCLUSIONS MORPHOLOGY ON DESTRUCTION OF A PERSPECTIVE HIGH STRENGTH CORROSION-RESISTANT STEEL 04X20H6Г11М2АФБ

L. A. SMIRNOV¹, HD (Tech.), Academician of RAN, Chief Res. Ass.; S. P. BURMASOV², PhD (Tech.), Academician; S. V. BELIKOV³, PhD (Tech.), Prof. Ass., s.v.belikov@urfu.ru; A. YU. ZHILYAKOV³, PhD (Tech.), Prof. Ass.; A. S. ORYSHCHENKO⁴, corresponding member of RAN, General Director; G. YU. KALININ⁴, H.D. (Tech.), Head of Dpt.; I. V. SOLOV'EV³, postgraduate; M. E. ZHITLUKHINA³, student

(¹ Institute of Metallurgy, Ural branch of RAN, Russia, Ekaterinburg; ² Russian Engineering Academy, Russia, Ekaterinburg;

³ Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Russia, Ekaterinburg;

⁴ NIZ "Kurchatov Institute" – CNII KM "Prometey", Russia, Sankt-Peterburg)

Abstract. Alloying by nitrogen imparts to a steel high strength, viscosity, corrosion resistance and enables to save expensive alloying elements. As a result of theoretical and experimental studies carried out last decades, the problems of composition optimization, plastic deformation and thermomechanical treatment were solved as a whole. The solutions were used at elaboration of new perspective high strength corrosion-resistant steels, in particular, of steel 04X20H6Г11М2АФБ. The items of comprehensive hardening of nitrogen-bearing steel of the mentioned composition for plates production were studied quite well. Effect of grain and sub-grain metal structure, recrystallization, morphology of secondary phases, their composition and other factors on mechanical and corrosion properties of the steel were studied earlier. However, there are practically no studies dealing with morphology, chemical composition, sulphide and oxide nonmetallic inclusions distribution, evaluation of their influence on deformability and properties of high strength nitrogen-bearing steels, including properties in Z-direction. The aim of this study was revelation of dependence of the steel destruction character at rupture on the type and morphology of nonmetallic inclusions. Study of morphology, chemical composition, sulphide and oxide nonmetallic inclusions distribution density was carried out, as well as evaluation of their influence on properties of hot-rolled sheet, made of experiment high strength steel 04X20H6Г11М2АФБ. It was determined, that nonmetallic inclusions of oxides, sulphides and nitrides can locate in a plane, parallel to Z-direction in both ways: evenly and forming stitches, at that one stitch can contain particles of various types. Comparatively low level of plasticity in Z-direction is stipulated both by general contamination of the metal by oxide inclusions and by stitch morphology of accumulation of nonmetallic inclusions of various types. It was shown, that at comparatively low density of nonmetallic inclusions stitches, their length plays the main role in the plasticity decrease in Z direction. In case of many stitch accumulations, the distance between them begins to play the leading role.

Key words: steel alloying by nitrogen, high strength nitrogen-bearing steel 04X20H6Г11М2АФБ, contamination by nonmetallic inclusions, sulphide and oxide nonmetallic inclusions, morphology of nonmetallic inclusions, mechanical properties of steel.

For citation: Smirnov L.A., Burmasov S.P., Belikov S.V., Zhilyakov A.Yu., Oryshchenko A.S., Kalinin G.Yu., Solov'ev I.V., Zhitlukhina M.E. Effect of nonmetallic inclusions morphology on destruction of a perspective high strength corrosion-resistant steel 04X20H6Г11М2АФБ. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 4, pp. 372-381. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-372-381

К перспективным сталям, разрабатываемым в последние годы, относятся стали, легированные азотом. Использование азота как легирующего элемента позволяет получать стали с высокой прочностью, вязкостью, коррозионной стойкостью и одновременно экономить дорогостоящие легирующие элементы. Проводимые в последние десятилетия теоретические и экспериментальные исследования позволили в целом решить проблемы оптимизации состава, пластической обработки и термомеханического упрочнения при создании новых перспективных высокопрочных коррозионностойких сталей, в частности стали 04X20H6Г11М2АФБ, и приступить к промышленной реализации технологии производства сталей указанного класса [1].

Можно считать, что к настоящему времени хорошо изучены вопросы комплексного упрочнения азотсодержащей толстолистовой стали указанного состава на основе глубокого изучения структуры металла, в том числе тонкой структуры и механических свойств в зависимости от ре-

жимов пластической деформации, температурных условий, термической обработки и ряда других технологических факторов [2–10].

При этом большое внимание уделено рассмотрению влияния на механические и коррозионные свойства зеренной и субзеренной структуры металла, рекристаллизации, морфологии вторичных фаз (простых и комплексных нитридов ванадия, ниобия и хрома), их состава, условий их выделения, плотности дислокаций.

Однако практически нет работ, посвященных изучению морфологии, химического состава, плотности распределения сульфидных и оксидных неметаллических включений, оценке их влияния на деформируемость и свойства высокопрочных азотистых сталей, в том числе в Z-направлении.

Целью настоящей работы является выявление зависимости характера разрушения стали при разрыве от типа и морфологии неметаллических включений.

Материалы и методики исследования

Материалы исследования

Материалом исследования служили образцы из горячекатаного листового проката экспериментальной высокопрочной азотистой стали двух плавок, испытанные на растяжение и дове-

денные до разрушения. Маркировка образцов и их механические свойства представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. МАРКИРОВКА ОБРАЗЦОВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 04X20H6Г11М2АФБ ПО ТОЛЩИНЕ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

TABLE 1. SAMPLES MARKING AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 04X20H6Г11М2АФБ ALONG THICKNESS OF THE PLATE

№ п/п	Номер плавки	Маркировка образца	Толщина листового проката, мм	Сертификатные данные						Z-свойства	
				σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, %	δ_5 , %	KCV ⁺²⁰ , Дж/см ²	KCV ⁻⁴⁰ , Дж/см ²	Ψ_z , %	δ_{diag} , %
1	1	11	35	960	650	34	58	233	186	30,6	—
2		12		960	650	35	59	246	186	11,1	—
3	2	21	45	890	650	40	61	133	114	17,1	6,5
4		22	60	900	660	40	60	133	113		
				890	640	43	60	160	137	32,5	30,0
				930	680	37	58	158	136		

Аттестационный химический состав исследуемой стали в соответствии с данными заказчика приведен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. АТТЕСТАЦИОННЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИССЛЕДУЕМОЙ СТАЛИ, %

TABLE 2. ATTESTATIVE CHEMICAL COMPOSITION OF THE STUDIED STEEL, %

Номер плавки	C	N	Cr	Mn	Ni	Mo	Si	V	Nb	S	P	Al	Cu
1	0,05	0,50	19,0	10,8	7,0	1,44	0,20	0,15	0,14	0,003	0,012	0,010	0,09
2	0,06	0,47	19,0	10,8	7,1	1,33	0,15	0,16	0,17	0,007	0,015	0,006	0,10

Методики исследования

Абразивная резка с принудительным охлаждением образцов эмульсией осуществлялась на отрезном станке Brilliant 220 фирмы АТМ корундовым диском. Затем образцы шлифовали наждачной бумагой зернистостью 180, 360, 800, 1200, 2500 с финишной полировкой на сукне с применением суспензии коллоидного кремния. Для выявления зеренной структуры образцы подвергали электролитическому травлению в электролите, содержащем 95 % (об.) C₂H₅OH, 4 % (об.) HClO₄, 1 % (об.) H₂O, при напряжении 20 В.

Фрактографическое, металлографическое исследования и определение локального химического состава проводили с применением растровой электронной микроскопии. Использовали растровый электронный микроскоп Jeol JSM 6490LV (ускоряющее напряжение — 20 кВ; ток

зонда — 41 мкА, диаметр зонда — 50–60 нм; источник электронов — катод из гексаборида лантана) с приставкой для микрорентгеноспектрального (МРСА), энергодисперсионного анализа Inca DryCool (разрешение не хуже 130 eV) и электронно-ионный микроскоп Zeiss Auriga CrossBeam. Боковую поверхность разрывных образцов исследовали при наклоне столика 35 град. Исследование распределения частиц и химического состава проведено с помощью программно-аппартного комплекса Inca 350. Модуль Inca Point ID использован для определения среднего и локального химического состава.

Использована оригинальная методика определения загрязненности стали неметаллическими включениями, позволяющая найти место расположения каждого включения на поверхности исследуемого шлифа путем сканирования пуч-

ком электронов предельно малого сечения при перемещении предметного столика с заданным шагом. По заданному уровню черного и белого происходит запоминание координат попиксельно, определение размера включений — по количеству пикселей и химического состава включений путем одновременного сбора спектров рентгеновского характеристического излучения при сканировании участков шлифа. Используемая методика обеспечивает повышение точности и производительности определения количества, размера, распределения и химического состава неметаллических включений в изделиях из стали. Дополнительно разработан способ наглядной и информативной визуализации распределения

частиц семи различных условных групп (табл. 3) на большой площади шлифа с применением модуля Inca Feature. Предложенный способ позволяет легко выявить неоднородность распределения неметаллических включений и установить ее влияние на морфологию поверхности разрушения. Исследование структуры металла проводили в режиме детектирования обратнорассеянных электронов с получением контраста от ориентации кристаллической решетки. Металлографический анализ выполнялся с использованием оптического микроскопа Nikon EpiPhot 200 с цифровой камерой Nikon Ds Fi1 и программной оболочкой Nikon NIS Elements.

ТАБЛИЦА 3. КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ЧАСТИЦ К ОПРЕДЕЛЕННОМУ ТИПУ

TABLE 3. CRITERIA OF PARTICLES REFERRING TO A DEFINITE TYPE

№ п/п	Тип частиц	Химический элемент	Содержание химического элемента в частице, % (мас.)	
			минимальное	максимальное
1	Частицы с ниобием	Nb	1	80
2	Частицы с серой	S	1	25
3	Оксиды с Ca	O	5	45
		Ca	0,5	15
4	Оксиды с Al	O	5	45
		Al	1	60
5	Оксиды с Mg	O	5	50
		Mg	1	22
6	Оксиды с Al и Mg	O	5	50
		Mg	1	22
		Al	1	60
7	Оксиды с Al и Ca	O	5	50
		Al	0,5	55
		Ca	0,2	15

Результаты и их обсуждение

Относительное сужение образцов 11 и 12, изготовленных из стали плавки 1, различается в 3 раза. Фрактографический анализ при малом увеличении не позволяет установить причину такого существенного различия в свойствах образцов. Поверхность разрушения обоих образцов (рис. 1) характерна для сталей в высокопрочном состоянии, имеются фасетки большой площади. При большем увеличении видно, что,

несмотря на наличие фасеток и отсутствие зоны среза, характер разрушения вязкий, ямочный. Ямки в обоих случаях уплощенные, но принципиальным различием является то, что в образце с низким сопротивлением сосредоточенной деформации они гораздо более крупные и в значительном количестве случаев их зарождение происходило на плоских скоплениях неметаллических включений.

Рис. 1. Поверхности разрушения образцов 11 и 12 и характерные неметаллические включения на поверхностях разрушения: а, б — общий вид (образцы 11 и 12 соответственно); в — сложные нитриды, содержащие ниобий (образец 11); г — оксиды алюминия (образец 12); д — сульфиды (образец 11); е — оксид, содержащий алюминий и магний (образец 12)

Fig. 1. Destruction surfaces of samples 11 and 12 and character nonmetallic inclusions on the destruction surface: а, б — general view (samples 11 and 12 correspondently); в — compound nitrides, containing niobium (sample 11); г — aluminum oxides (sample 12); д — sulphides (sample 11), е — oxide, containing aluminum and magnesium (sample 12)

Подробное исследование поверхностей разрушения позволило установить качественные и количественные характеристики состава типичных неметаллических включений. Возможность корректного количественного химического анализа методом МРСА обусловлена малой высотой гребней отрыва и общим фасеточным характером изломов. Наиболее часто на поверхности разрушения обнаруживаются сложные нитриды, содержащие ниобий, оксиды алюминия, сульфиды, а в случае образца 12 еще и оксиды, содержащие алюминий и магний (см. рис. 1).

Необходимо отметить, что если на поверхности излома образца 11 включения всех типов встречаются практически с одинаковой частотой, то образование протяженных плоских фасеток разрушения в изломе образца 12 контролируется преимущественно частицами оксида алюминия.

Образцы 21 и 22 отобраны от плавки 2. Хотя прочностные свойства и относительное удлинение этих образцов практически одинаковы, но относительное сужение в Z-направлении (17,1 и 32,5 %) и морфология поверхности излома различаются. В изломе более пластичного образца 22, изготовленного из листа толщиной 60 мм, практически нет крупных фасеток, тогда как у менее пластичного листа толщиной 45 мм они ярко выражены (рис. 2). Фасетки вытянутые в форме языков, отношение длины к ширине составляет от 3:1 до 2:1. В целом излом образца 22 значительно менее рельефный. В обоих случаях характер разрушения вязкий, на поверхности ямочный рельеф, в уплотненных ямках обнаружены частицы неметаллических включений трех основных типов:

- сложные нитриды, содержащие ниобий;
- оксиды алюминия;
- сульфиды.

Рис. 2. Поверхности разрушения образцов 21 (а, в) и 22 (б, г):
а, б — общий вид; в, г — ямки и неметаллические включения на поверхности излома

Fig. 2. Destruction surfaces of samples 21 (а, в) and 22 (б, г):
а, б — general view; в, г — pits and nonmetallic inclusions on the fracture surface

Основное отличие от образцов плавки 1 состоит в том, что оксиды имеют преимущественно ограниченную форму.

Металлографический анализ плавки 1 (рис. 3) позволил выявить следующие особенности морфологии неметаллических включений. Крупные, до 10 мкм, светлые частицы имеют сложный химический состав и обогащены азотом, хромом и ниобием. Кроме них присутствуют дисперсные (100–400 нм) темные выделения. Они располагаются в теле аустенитных зерен, часто цепочками. Малые размеры этих частиц не по-

зволяют с помощью МРСА однозначно установить их химический состав, однако можно предположить, что эти частицы являются нитридами с повышенным содержанием хрома, возможно CrN и Cr₂N (см. рис. 3, б), тем более что такие частицы обнаруживали в аналогичной стали ранее [10]. По границам аустенитных зерен обнаружены еще более дисперсные (около 100 нм) частицы. Кроме нитридов в обоих образцах плавки 1 обнаружено большое количество оксидов алюминия, в некоторых случаях дополнительно содержащего магний.

Рис. 3. Неметаллические включения и их химический состав:
а, б — сложные нитриды, содержащие ниобий; в — сульфиды; г — оксиды алюминия

Fig. 3. Nonmetallic inclusions and their chemical composition:
а, б — compound nitrides, containing niobium; в — sulphides; г — aluminum oxides

Построение карт распределения неметаллических включений позволило обнаружить в образце 12 сильно развитую полосчатость в расположении частиц (рис. 4, а). Причем наиболее ярко она проявляется для частиц оксида алюминия. На исследованной поверхности 14,8 мм² наряду с более мелкими наблюдается плотная

строжка длиной 0,8 мм и еще одна длиной 0,5 мм. В образце с относительно высокой пластичностью оксиды распределены равномерно. В обоих случаях следует отметить присутствие коротких строчек сложных нитридов, обогащенных ниобием.

Рис. 4. Карта распределения частиц на образцах 11 (а), 12 (б), 21 (в), 22 (г)

Fig. 4. Map of particles distribution on samples 11 (a), 12 (б), 21 (в), 22 (г)

Электронно-микроскопическое изучение металлографических шлифов образцов плавки 2 позволило выявить только те типы неметаллических включений, которые уже были обнаружены на поверхности изломов, т. е. сложных нитридов, содержащих ниобий, оксидов алюминия и сульфидов. Нитриды располагаются в плоскости шлифа в виде протяженных строчек (до 100 мкм и более) разной частоты. Сульфиды отличаются характерной вытянутой формой. Их длина составляет 15–20 мкм, а ширина в 3–5 раз меньше (см. рис. 3, в). Оксидные включения имеют глобулярную форму и размеры до 10 мкм (см. рис. 3, г).

Карты распределения неметаллических включений в образцах плавки 2 в обоих случаях демонстрируют присутствие относительно протяженных (до 0,5 мм) цепочек. Анализ отдельных классов включений показал, что в образце 21 достаточно продолжительные цепочки образуют только сложные нитриды, содержащие ниобий, тогда как в образце 22 строчки образуют и оксиды алюминия. Необходимо отметить, что образцы отличаются не столько длиной отдельных строчек, сколько их «густотой», которая растет с повышением степени деформации металла, т. е. с уменьшением толщины проката.

Анализ результатов исследования

Обобщение полученных в работе данных по неметаллическим включениям в двух плавках экспериментальной высокопрочной азотистой стали (табл. 4) позволило установить, что во всех случаях в структуре присутствуют нитриды, сульфиды и оксиды, подавляющее большинство из которых оксиды алюминия.

Однако отдельные образцы имеют особенности. Самое большое количество оксидов алюминия (22,5 и 31,5 шт/мм²) характерно для плавки 1 (образцы 11 и 12 соответственно). В плавке 2

загрязненность оксидами этого типа была на уровне 17,3–19,5 шт/мм². Самым чистым по оксидам оказался образец 21 плавки 2, наиболее загрязненными — образцы плавки 1, особенно образец 12.

Количество сложных нитридов, содержащих хром, ванадий и ниобий, в таком же соотношении (примерно 1:3), как и во вторичных фазах, описанных в работах [1, 10], варьируется от образца к образцу, наибольшее их количество наблюдается в образцах плавки 2 (55,3 и

77 шт/мм²). Кроме того, в структуре металла плавки 1 (образцы 11 и 12) обнаружены дисперсные частицы, предположительно нитридов хрома, размером менее 400 нм. Особенности их

расположения и литературные данные [10] позволяют предположить, что они выделились в результате термомеханической обработки исследуемой стали.

ТАБЛИЦА 4. СРЕДНЕЕ КОЛИЧЕСТВО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА 1 мм² ШЛИФА

TABLE 4. AVERAGE NUMBER OF NONMETALLIC INCLUSIONS PER 1 mm² OF A SECTION

Тип частиц	Плавка 1		Плавка 2	
	образец 11	образец 12	образец 21	образец 22
	$\psi_z = 30,6 \%$	$\psi_z = 11,1 \%$	$\psi_z = 32,5 \%$	$\psi_z = 17,1 \%$
Нитриды с Nb и Cr	14,8	15,3	55,3	77,0
Частицы с S	14,2	16,0	19,5	19,0
Оксиды с Al	22,5	31,5	17,3	19,5
Оксиды с Al и Mg	1,4	12,4	0,6	2,0
Оксиды с Al и Ca	1,4	8,5	3,1	5,1
Всего проанализировано частиц, шт.	482	1240	1034	908
Исследованная площадь, мм ²	8,87	14,8	10,8	7,4
Общая плотность частиц, шт/мм ²	55,8	84,7	97,8	125,7

Загрязненность сульфидами в основном колеблется на уровне 14–19 шт/мм². Максимальное их количество (19,5 и 19 шт/мм²) обнаружено в образцах 21 и 22 плавки 2.

Фрактографический анализ позволил установить, что характерной особенностью поверхностей разрушения исследованных образцов является наличие фасеток различных размеров и формы, которые при ближайшем рассмотрении оказываются совокупностью уплощенных ямок, характерных для вязкого разрушения сталей в упрочненном состоянии. В образцах с пониженной пластичностью ямки зарождались преимущественно на частицах вторых фаз, причем это могли быть как нитриды (образец 22), так и оксиды (образец 12). Таким образом, относительно низкая (по сравнению с другими сталями аустенитного класса) пластичность в Z-направлении исследованных экспериментальных сталей может быть объяснена совокупным действием двух факторов: высокой прочностью матрицы и наличием скоплений неметаллических включений неблагоприятной формы.

Сопоставляя данные табл. 1 и 4, можно отметить определенное влияние некоторых групп неметаллических включений, в частности на основе глинозема и нитридов, на пластичность в Z-направлении. При этом строгой корреляции общей плотности частиц и пластичности выявить не удалось. Однако, как было упомянуто выше, особую роль в процессах разрушения играет

взаимное расположение отдельных частиц. Частые строчки (а вернее, плоские вытянутые скопления) отдельных включений могут оказывать влияние, аналогичное влиянию индивидуальной частицы вытянутой формы. Например, в областях, подвергнутых большой пластической деформации (в области шейки доведенного до разрушения образца), обнаружены многочисленные трещины, возникшие на цепочках неметаллических включений (рис. 5). Развитие подобной трещины приводит к образованию уплощенной фасетки на поверхности разрушения.

Рис. 5. Трещина, возникшая на цепочке неметаллических включений в области шейки

Fig. 5. A crack, arose in the line of nonmetallic inclusions in the area of the neck

Следовательно, определяющим фактором снижения пластичности в Z-направлении исследуемой

дованных образцов является как общая загрязненность неметаллическими включениями, так и строчечная морфология их скоплений. Причем серьезно ухудшать свойства металла могут как плоские скопления оксидов алюминия, так и сложных нитридов, содержащих ниобий.

На основании проведенных исследований можно выделить две особенности влияния строчек неметаллических включений на величину ψ_z :

– при относительно небольшом их количестве основную роль играет протяженность дефекта (образцы 11 и 12);

– если строчки расположены часто, то ведущую роль начинает играть расстояние между ними (образцы 21 и 22), которое связано со степенью пластической деформации проката.

Заключение

Поверхности разрушения всех исследованных образцов на макроуровне характеризуются отсутствием зоны среза, т. е. материал во всех случаях относительно плохо сопротивляется распространению трещины. Плоские фасетки на поверхности изломов говорят о малой локальной пластической деформации, предшествовавшей разрушению. На микроуровне фасетки состоят из уплощенных ямок, свидетельствующих о том, что преимущественным механизмом разрушения является зарождение и слияние микропор. Таким образом, изломы имеют вязкий характер с уплощенным рельефом, типичным для сталей и сплавов в высокопрочном состоянии. Для образцов с пониженной пластичностью установлено, что практически все ямки, составляющие фасетки, заполнены частицами неметаллических включений, причем это могут быть как оксиды, так и нитриды сложного состава, содержащие ниобий.

Исследование микрошлифов позволило установить, что все исследованные образцы имеют

аустенитную матрицу, содержащую включения оксидов, сульфидов и нитридов.

Установлено, что неметаллические включения оксидов, сульфидов и нитридов могут располагаться в плоскости, параллельной Z-направлению, как равномерно, так и образовывать строчки, причем одна строчка может состоять из частиц различных типов. Определяющими факторами снижения пластичности исследованных образцов в Z-направлении являются общая загрязненность металла оксидными включениями и строчечная морфология скоплений неметаллических включений. Причем ухудшать свойства металла могут как строчки (а точнее, плоские скопления) оксидов алюминия, так и сложных нитридов, содержащих ниобий. Показано, что при относительно низкой плотности скоплений неметаллических включений на единицу объема металла основную роль в снижении пластичности в Z-направлении играет их протяженность, если же строчечных скоплений много, то ведущую роль начинает играть расстояние между ними.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горынин И.В., Малышевский В.А., Калинин Г.Ю. и др. Коррозионностойкие высокопрочные аустенитные стали // Вопросы материаловедения. 2009. № 3 (59). С. 7–16.
2. Калинин Г.Ю., Легостаев Ю.Л., Малышевский В.А. и др. Новая коррозионностойкая азотсодержащая аустенитная сталь НС-5Т // Вопросы материаловедения. 1996. № 3 (6). С. 5–15.
3. Калинин Г.Ю., Малышевский В.А., Мушникова С.Ю. и др. Влияние степени горячей пластической деформации на микроструктуру и механические свойства аустенитной высокопрочной коррозионностойкой стали 05X19H5Г12AM2БФ // Вопросы материаловедения. 2003. № 4 (36). С. 5–11.
4. Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Нестерова Е.В. и др. Исследования структуры и свойств высокопрочной коррозионностойкой азотистой стали 04X20H6Г11M2АФБ // Вопросы материаловедения. 2006. № 1 (45). С. 45–54.
5. Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. Исследование эволюции структуры азотистой коррозионностойкой аустенитной стали 06X21АГ10Н7МФБ при термдеформационном и термическом воздействии // Вопросы материаловедения. 2006. № 1 (45). С. 9–20.
6. Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. и др. Влияние режимов горячей прокатки и термической обработки на структуру, механические и технологические свойства аустенитной азотсодержащей стали 05X22АГ15Н8М2Ф-Ш // Металлы. 2006. № 4. С. 33–41.

7. Сагарадзе В.В., Уваров А.И., Печеркина Н.Л. и др. Структура и механические свойства толстолистовой азотсодержащей аустенитной стали // Физика металлов и металловедение. 2006. Т. 102. № 2. С. 250–256.
8. Сагарадзе В.В., Печеркина Н.Л., Завалишин В.А. и др. Влияние скорости охлаждения в интервале 1100–800 °С на механические свойства и структуру азотсодержащей аустенитной стали // Вопросы материаловедения. 2011. № 3 (67). С. 5–12.
9. Сагарадзе В.В., Уваров А.И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей. — Екатеринбург: РИО УрО РАН. 2013. — 720 с.
10. Малышевский В.А., Калинин Г.Ю., Тепленичева А.С. и др. Высокопрочные аустенитные свариваемые стали для судостроения // Вопросы материаловедения. 2014. № 2. С. 26–35.
11. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.

Поступила 8 февраля 2020 г.

REFERENCES

1. Gorynin I.V., Malyshevskii V.A., Kalinin G.Yu. etc. Corrosion-resistant high strength austenite steels. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, no. 3 (59), pp. 7–16. (In Russ.).
2. Kalinin G.Yu., Legostaev Yu.L., Malyshevskii V.A. etc. A new corrosion-resistant nitrous austenite steel HC-5T. *Voprosy materialovedeniya*, 1996, no. 3 (6), pp. 5–15. (In Russ.).
3. Kalinin G.Yu., Malyshevskii V.A., Mushnikova S.Yu. etc. Effect of hot plastic deformation degree on microstructure and mechanical properties of austenite high strength corrosion-resistant steel 05X19H5Г12АМ2БФ. *Voprosy materialovedeniya*, 2003, no. 4 (36), pp. 5–11. (In Russ.).
4. Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu., Nesterova E.V. etc. Study of structure and properties of high strength corrosion-resistant nitrous steel 04X20H6Г11М2АФБ. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1 (45), pp. 45–54. (In Russ.).
5. Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V. Study of structure evolution of nitrous corrosion-resistant austenite steel 06X21АГ10Н7МФБ at thermos-deformation and thermal impact. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1 (45), pp. 9–20. (In Russ.).
6. Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V. etc. Effect of hot rolling and heat treatment modes on structure, mechanical and technological properties of austenite nitrogen-bearing steel 05X22АГ15Н8М2Ф-III. *Metally*, 2006, no. 4, pp. 33–41. (In Russ.).
7. Sagaradze V.V., Uvarov A.I., Pecherkina N.L. etc. Structure and mechanical properties of plate nitrogen-bearing austenite steel. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2006, vol. 102, no. 2, pp. 250–256. (In Russ.).
8. Sagaradze V.V., Pecherkina N.L., Zavalishin V.A. etc. Effect of cooling rate within the interval 1100–800 °C on mechanical properties and structure of nitrogen-bearing austenite steel. *Voprosy materialovedeniya*, 2011, no. 3 (67), pp. 5–12. (In Russ.).
9. Sagaradze V.V., Uvarov A.I. *Uprochnenie i svoistva austenitnykh staley* [Hardening and properties of austenite steels]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN, 2013, 720 p. (In Russ.).
10. Malyshevskii V.A., Kalinin G.Yu., Teplenicheva A.S. etc. High strength austenite weldable steels for ship-building. *Voprosy materialovedeniya*, 2014, no. 2, pp. 26–35. (In Russ.).
11. Gol'dshtein Ya.E., Mizin V.G. *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modification and micro-alloying of cast iron and steel]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russ.).

Received February 8, 2020