СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 09Г2С В КОЛЬЦЕВОЙ ЗАГОТОВКЕ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ЛИТЬЕМ

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 09G2S STEEL IN A RING BILLET MADE BY CENTRIFUGAL ELECTRIC SLAG CASTING

Г. Р. Халикова

Gulnara R. Halikova

Институт проблем
сверхпластичности металлов РАН,
Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Institute for Metals
Superplasticity Problems,
Russian Academy of Sciences,
Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Д. Н. Шерматов

Jamshed N. Shermatov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Е. А. Наумкин

Evgeny A. Naumkin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Применение центробежного литья является распространенным при изготовлении изделий для объектов нефтегазовой отрасли. Это связано с высокими показателями износостойкости, возможностью получения отливок из сталей с заданным химическим составом, отсутствием необходимости создания моделей и оснастки для единичных отливок, высокой плотностью металла, отсутствием шлаковых и неметаллических включений.

В связи с этим в работе исследована микроструктура и механические свойства стали 09Г2С в кольцевой заготовке Ду 500, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем. Структурные исследования и анализ механических свойств проводили на середине высоты кольцевой заготовки в периферийной области вблизи внешней поверхности, в центре и на периферии вблизи внутренней поверхности в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Показано, что в структуре исследуемой стали имели место неметаллические включения, образующие преимущественно компактные скопления из отдельных частиц (оксиды) и образующие цепочки (сульфиды). Пораженность неметаллическими включениями стали 09Г2С была незначительной: подавляющее их большинство имели протяженность до 5,6 мкм в 96,3–100 % случаев (1-я группа НВ по методу Л2 ГОСТ 1778-70), расчетные индексы загрязненности находились в пределах от $2,7 \times 10^{-3}$ до $4,7 \times 10^{-3}$. Микроструктура исследуемой стали была ферритно-перлитной. Полосчатость перлитной составляющей отсутствовала. Средний размер ферритных зерен изменялся в пределах $9,17 \pm 0,20$ – $12,13 \pm 0,33$ мкм, что соответствовало 9–10 номеру зерна. При этом уровень механических свойств при комнатной температуре составлял: $\sigma_b = 785$ МПа, $\sigma_t = 528$ МПа, $\sigma_{\text{шц}} = 315$ МПа, $\delta = 36$ %, $\psi = 77$ %.

The use of centrifugal casting is common in the manufacture of products for oil and gas industry facilities. This is due to high wear resistance, the possibility of producing castings from steels with a given chemical composition, the absence of the need to create models and equipment for single castings, the high density of the metal, and the absence of slag and non-metallic inclusions.

Microstructure and mechanical properties of 09G2S steel in a ring billet Du 500 made by centrifugal electroslag casting were investigated.

Ключевые слова

центробежное электрошлаковое литье; сталь; кольцевая заготовка; ферритно-перлитная структура; неметаллические включения; РЭМ; механические свойства

Key words

centrifugal electroslag casting; steel; ring blank; ferrite-pearlite microstructure; nonmetallic inclusions; SEM; mechanical properties

Structural studies and analysis of mechanical properties were performed at the mid-height of the annular blank in the edge region near the outer surface, in the center and in the edge near the inner surface in the three mutually perpendicular planes. It was shown that nonmetallic inclusions (NMIs) took place in the structure of the steel, forming mainly compact clusters of individual particles (oxides) and forming chains (sulfides). The affection of the NMIs of steel 09G2S was insignificant: the overwhelming majority of NMIs had a length of up to $5.6\text{ }\mu\text{m}$ in 96.3–100 % of cases (first group of the NMIs according to L2 method of the State Standard 1778-70), the calculated pollution indices ranged from 2.7×10^{-3} to 4.7×10^{-3} . The ferritic-pearlitic microstructure of the steel was observed. The banding of the pearlite component was absent. The average size of ferrite grains varied from 9.17 ± 0.20 to $12.13 \pm 0.33\text{ }\mu\text{m}$, which corresponded to 9–10 grain number. The level of mechanical properties at room temperature was: UTS = 785 MPa, YS = 528 MPa, PL = 315 MPa, $\delta = 36\%$, $\psi = 77\%$.

Центробежное литье нашло широкое применение во многих отраслях промышленности. Применение технологии центробежного литья имеет существенные преимущества по сравнению с такими способами изготовления деталей, какковка, прокат и др.: высокая износостойкость за счет особой кристаллической решетки центробежной отливки; высокая плотность металла и отсутствие раковин; отсутствие шлаковых и неметаллических включений; возможность изготовления единичных отливок без создания моделей и оснастки; возможность получения центробежных отливок из сталей с химическим составом по требованию заказчика [18].

Одним из возможных недостатков применения кремнемарганцовистых сталей (09Г2С, 10Г2С1) в качестве деформированных полуфабрикатов (поковок, проката) является неоднородность и полосчатость ферритно-перлитной структуры, негативное влияние которых на комплекс механических свойств (при проявлении анизотропии) общеизвестно. Такая структура носит наследственный характер и связана с наличием дендритной ликвации в исходном слитке (полученным традиционными методами литья), устранение которой не всегда возможно последующими методами термической и/или термомеханической обработки [1,2].

Сформировать в структуре стали бесполосчатость ферритно-перлитной структуры можно методом центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ). При этом структура характеризуется однородностью ферритно-перлитной структуры и равноосностью ферритных зерен [3,4]. Такой слиток не требует специальных последующих производственных операций термомеханической обработки для устранения дефектов литой структуры.

С другой стороны, на уровень механических свойств сталей оказывают влияние и неметаллические включения в зависимости от степени различия их физических свойств (твердость, прочность, коэффициент термического расширения) с металлической матрицей. Существенное значение имеет и то, что сталь представляет собой гетерогенный материал, компоненты которого в форме оксидов, сульфидов, нитридов и т.п. входят в состав сложных, а часто и многофазных неметаллических включений.

Следует отметить, что комплексная оценка влияния структурных параметров, таких как средний размер зерен, тип, размер, состав и морфология неметаллических включений, на уровень механических свойств стали, изготовленной методом ЦЭШЛ, в литературе мало изучена. Поэтому целью настоящей работы явилось оценить уровень механических свойств стали 09Г2С с учетом выявленных структурных изменений по сечению кольцевой заготовки для фланцевых соединений, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем.

Материал и методики исследований

Объектом исследования служила кольцевая заготовка Ду 500 (для фланцевых соединений), изготовленная методом центробежного электрошлакового литья на ОАО «Салаватнефтемаш» из конструкционной низколегированной стали 09Г2С, химический состав которой соответствовал ГОСТ 19281-89 [5].

Для микроструктурных исследований из кольцевой заготовки был вырезан темплет в поперечном вертикальном направлении, из которой электроискровым способом были вырезаны образцы. Последовательность вырезки и схема вырезки образцов приведены на рисунке 1.

Рисунок 1. Эскиз и схема вырезки образцов из кольцевой заготовки Ду 500 стали 09Г2С для микроструктурных исследований

Исследования микроструктуры проводили в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях (долевом — ДН, поперечном — ПН и по нормали к поверхности — НН) и трех зонах отливки (периферия в близи внешней поверхности кольцевой заготовки (1), центр кольцевой заготовки (2), периферия в близи внутренней поверхности кольцевой заготовки (3)) (рисунок 2). Для выявления зеренной структуры образцы погружали в 5 %-ый раствор HNO_3 в этиловом спирте. Время травления подбирали экспериментально.

Рисунок 2. Схема исследуемых плоскостей образцов под микроструктурные исследования (см. рисунок 1)

Исследование неметаллических включений (НВ) проводили на полированной поверхности образцов с помощью оптического микроскопа AxioTech 100-HD-3D. Средний размер и загрязненность НВ осуществляли согласно ГОСТ 1778-70 [6], метод Л2 — линейный подсчет включений, использующийся при оценке литой структуры.

Энергодисперсионный (EDS) анализ НВ исследуемой стали проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan VEGA 3 SBH, оснащенного приставкой фирмы Oxford Instruments. Полученные в

ходе съемки спектры обрабатывались в программе AZtec 2.1.

Зеренную микроструктуру стали анализи-
ровали с помощью оптического микроскопа
AxioTech 100-HD-3D. Количественную оценку
среднего размера зерен осуществляли со-
гласно ГОСТ 5639-82 [7].

Для анализа уровня механических свойств в отливке исследуемой стали провели статические испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497-84 [8]. Чертеж образца на растяжение приведен на рисунке 3.

Рисунок 3. Чертеж образца для испытания на растяжение при комнатной температуре

Результаты и их обсуждение

Известно, что неметаллические включения являются одним из основных факторов, определяющих «металлургическое» качество стали. В частности, механические, технологические и эксплуатационные свойства сталей во многом зависят от неметаллических включений. Так, НВ способствуют охрупчиванию сталей, поскольку образование трещины вблизи включения снижает работу ее зарождения, которая связана с удельным количеством включений, например сульфидов [9].

Влияние включений кристаллизационного происхождения на механические свойства сталей однозначно [10, 11]: чем больше их содержится в стали, тем ниже уровень как пластических, так и прочностных свойств. Эти зависимости четко прослеживаются, если влияние на механические свойства других факторов значительно слабее и одинаково для условий проводимых испытаний.

В работах, например [12, 13], описывается негативное влияние сульфидных включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей. Отмечают, что присутствие строчечных выделений (Fe, Mn) S может способствовать коррозионному разрушению труб по механизмам водородного охрупчивания и/или сульфидного коррозионного растрескивания.

Химический и фазовый состав неметаллических включений, как правило, сложный, а морфология может быть многоуровневой. Но качество стали зависит не столько от общего количества (объемной доли) включений, сколько от их формы, химического состава, размеров и размерного распределения неметаллических включений, прочности связи неметаллических включений с матрицей, прочности стали и величины приложенных напряжений [12, 13].

На рисунке 4 приведена типичная структура полированной поверхности стали 09Г2С, наблюдаемая в РЭМ. В структуре исследуемой стали встречались неметаллические включения эндогенного типа, образующие преимущественно компактные скопления из отдельных частиц (темного цвета) и образующие цепочки из отдельных частиц (светлого цвета). При этом НВ имели сферическую, округлую, сложную формы без острых углов.

Для анализа элементного состава НВ провели картирование по основным элементам. Максимальная плотность окраски на каждой карте соответствовала наибольшему содержанию элемента в НВ. Затем для идентификации НВ провели анализ спектров с областей, соответствующих наибольшему содержанию элементов на картах. На рисунках 5 и 6 приведены карты с участка, проиллюстрированного на рисунке 4.

Рисунок 4. Типичная микроструктура неметаллических включений на полированной поверхности образца стали 09Г2С после ЦЭШЛ (РЭМ)

В структуре стали были проидентифицированы следующие НВ (содержание химических элементов приведено в таблице 1), являющиеся либо однофазными либо двух-/трехфазными (комплексными), плотно прилегающими друг к другу (и, в некоторых случаях, трудноразделимых при ЭДС анализе):

1. $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ — герцинит (железная шпинель);
2. Al_2O_3 — корунд;
3. $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ алюмомагнелиевая шпинель;
4. $(\text{Mn,Fe})\text{S}-(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO})$ — сульфид марганца и железа в присутствии алюмината кальция;
5. $\text{MnS}-\text{Al}_2\text{O}_3$ — сульфид марганца с корундом;
6. MnS — сульфид марганца;
7. $\text{FeO}-\text{SiO}_2$ — фаялит.

Рисунок 5. РЭМ-изображение и картирование на этом участке по основным легирующим и примесным элементам для стали 09Г2С (см. рисунок 4 левый нижний угол)

Рисунок 6. РЭМ-изображение и картирование на этом участке по основным легирующим и примесным элементам для стали 09Г2С (см. рисунок 4 правый верхний угол)

Таблица 1. Содержание химических элементов в неметаллических включениях

Хим. элемент	Спектр						
	1	2	3	4	5	6	7
	Содержание, $\frac{\text{вес.}\%}{\text{ат.}\%}$						
C	–	$\frac{4,55}{9,03}$	–	$\frac{3,91}{11,36}$	$\frac{11,46}{23,43}$	$\frac{5,13}{15,45}$	$\frac{5,96}{16,87}$
O	$\frac{47,79}{61,03}$	$\frac{31,69}{47,21}$	$\frac{47,48}{60,45}$	$\frac{7,66}{16,7}$	$\frac{22,21}{34,07}$	$\frac{1,33}{3,00}$	$\frac{12,25}{26,05}$
F	–	–	–	$\frac{1,78}{3,27}$	–	$\frac{2,88}{5,49}$	–
Mg	$\frac{1,37}{1,15}$	$\frac{1,13}{1,11}$	$\frac{7,86}{6,58}$	$\frac{0,29}{0,42}$	–	$\frac{0,22}{0,32}$	–
Al	$\frac{49,11}{37,19}$	$\frac{34,13}{30,16}$	$\frac{42,74}{32,26}$	$\frac{7,28}{9,42}$	$\frac{14,12}{12,85}$	$\frac{1,15}{1,54}$	$\frac{0,60}{0,75}$
Si	–	–	–	–	–	–	$\frac{10,32}{12,50}$
S	–	$\frac{0,17}{0,13}$	–	$\frac{18,84}{20,50}$	$\frac{18,72}{14,33}$	$\frac{32,61}{36,80}$	$\frac{0,26}{0,28}$
Ca	–	$\frac{1,64}{0,97}$	–	$\frac{1,13}{0,99}$	$\frac{2,21}{1,35}$	$\frac{0,33}{0,30}$	$\frac{2,28}{1,93}$
Mn	–	$\frac{0,44}{0,19}$	–	$\frac{40,05}{25,43}$	$\frac{29,74}{13,29}$	$\frac{54,61}{35,97}$	$\frac{1,27}{0,79}$
Fe	$\frac{1,73}{0,63}$	$\frac{26,26}{11,21}$	$\frac{1,93}{0,70}$	$\frac{19,06}{11,91}$	$\frac{1,54}{0,68}$	$\frac{1,75}{1,13}$	$\frac{67,06}{40,84}$
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Как видно, сульфидная часть представляет собой сульфид марганца с железом или сульфид марганца, а оксидная — алюминия с магнием (алюмомагнезиальная шпинель $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$), алюминия с железом (вероятнее всего железная шпинель $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$), корундом (Al_2O_3), алюминия с кальцием (вероятнее всего алюминат кальция $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$) или железа и кремния (вероятнее всего фаялит). Оксидная часть содержит в себе алюминий, являющийся продуктом раскисления стали.

Для оценки пораженности структуры стали НВ провели их количественную оценку. На рисунке 7 приведены типичные структуры

полированной поверхности стали 09Г2С в разных областях и плоскостях исследований, наблюдаемые в оптический микроскоп. Следует отметить, что при увеличениях, рекомендуемых ГОСТ 1778-70 метод Л2, размеры НВ достаточно малы для их визуальной идентификации/разделения на сульфиды и оксиды. Поэтому количественную оценку НВ проводили в совокупности по всем включениям (что не противоречит ГОСТ 1778-70). Распределение НВ по размерам приведено в таблице 2. Средний размер и загрязненность НВ приведены в таблице 3.

Рисунок 7. Типичная микроструктура полированной поверхности стали 09Г2С после ЦЭШЛ: периферия вблизи внешней поверхности кольцевой заготовки (1) (а), центр кольцевой заготовки (2) (б), периферия вблизи внутренней поверхности кольцевой заготовки (3) (в)

Таблица 2. Распределение НВ в стали 09Г2С по размерам

Группа включений	Размер включений, мкм	Количество включений данной группы, %								
		1			2			3		
		ВН	ПН	ДН	ВН	ПН	ДН	ВН	ПН	ДН
1	0–5,6	100,0	100,0	99,4	99,5	96,3	99,4	99,0	99,1	100,0
2	5,9–11,2	0,0	0,0	0,6	0,5	3,7	0,6	1,0	0,9	0,0
3	11,5–16,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблица 3. Средний размер НВ и загрязненность стали 09Г2С НВ

Область исследования	Плоскость исследования	Средний размер НВ, мкм	Загрязненность по ГОСТ 1778-70
1	ВН	2,35±0,06	3,7×10 ⁻³
	ПН	2,33±0,04	2,7×10 ⁻³
	ДН	2,39±0,06	2,9×10 ⁻³
2	ВН	2,57±0,06	4,5×10 ⁻³
	ПН	2,54±0,10	4,3×10 ⁻³
	ДН	2,44±0,07	3,3×10 ⁻³
3	ВН	2,33±0,06	4,2×10 ⁻³
	ПН	2,19±0,07	4,7×10 ⁻³
	ДН	2,11±0,05	3,3×10 ⁻³

В кольцевой заготовке в исследуемых областях подавляющее большинство НВ имели протяженность до 5,6 мкм в 96,3–100 % случаев (1-я группа НВ по методу Л2 ГОСТ 1778-70). Расчетные индексы загрязненности (т.е. удельная длина НВ на 1 мкм длины исследуемого участка, другими словами, — от 0,27 % до 0,47 % от базовой длины) также подтвердили незначительную пораженность металла НВ.

Известно, что наличие полосчатой ферритно-перлитной структуры в стали вызывает сильную анизотропию механических свойств, т.е. различие их в образцах, вырезанных вдоль и поперек проката. Анизотропия свойств металла приводит к ухудшению и эксплуатационных свойств, что способствует преждевременному выходу детали из строя. С другой стороны, на величину предела текучести от в поликристаллических металлах, согласно со-

отношению Холла-Петча, может влиять средний размер зерна [14,15].

Поскольку ЦЭШЛ может способствовать формированию однородной и мелкозернистой структуры, провели ее качественную и количественную оценку.

Типичная зеренная микроструктура приведена на рисунке 8. Микроструктура стали 09Г2С после ЦЭШЛ ферритно-перлитная. Полосчатость перлитной составляющей отсутствовала. Перлитные колонии неоднородно распределены в объеме стали. В периферийной области вблизи внешней поверхности кольцевой заготовки перлитная составляющая была более дисперсной, чем в центре заготовки и периферийной зоне вблизи внутренней поверхности. Это связано с большими скоростями охлаждения кристаллизующейся стали у внешней поверхности заготовки при ее контакте с литейной формой при ЦЭШЛ.

Рисунок 8. Типичная микроструктура протравленной поверхности стали 09Г2С после ЦЭШЛ: периферия вблизи внешней поверхности кольцевой заготовки (1) (а), центр кольцевой заготовки (2) (б), периферия вблизи внутренней поверхности кольцевой заготовки (3) (в)

Количественная оценка микроструктуры согласно ГОСТ 5639-82 показала, что средний размер ферритных зерен изменялся в пределах $9,17 \pm 0,20$ – $12,13 \pm 0,33$ мкм, что соответствовало 9–10 номеру зерна (таблица 4).

Результаты испытаний механических свойств стали 09Г2С при комнатной температуре приведены в таблице 5.

При сравнении полученных результатов статических испытаний по ГОСТ 5520-79 [16], ГОСТ 10705-80 [17], ГОСТ 19281-89 [5], установлено, что механические характери-

стики стали 09Г2С, изготовленной методом центробежного электрошлакового литья, превышали уровень свойств исследуемой стали в деформированном состоянии: значения σ_B и σ_T превышали в 1,5 раза, показатели относительного удлинения — в 1,7 раза. Кроме того, кольцевые заготовки из стали 09Г2С, изготовленной методом ЦЭШЛ, могут быть применены взамен поковок и сортового проката, например, для изготовления штуцерных и аппаратных фланцев.

Таблица 4. Средний размер зерен и соответствующий балл зерна феррита по ГОСТ 5639-82

Область исследования	Плоскость исследования	Средний размер зерен феррита по ГОСТ 5639-82, мкм	Балл зерна по ГОСТ 5639-82
1	ВН	$12,13 \pm 0,33$	9
	ДН	$10,74 \pm 0,24$	10
	ПН	$9,17 \pm 0,20$	10
2	ВН	$11,75 \pm 0,38$	9
	ДН	$11,51 \pm 0,28$	9
	ПН	$11,83 \pm 0,29$	9
3	ВН	$10,44 \pm 0,24$	10
	ДН	$11,14 \pm 0,33$	9
	ПН	$9,43 \pm 0,24$	10

Таблица 5. Результаты испытаний на растяжение при комнатной температуре

№ п/п	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %
1	799	532	36
2	802	529	37
3	792	562	35
4	776	519	32
5	752	498	38
Среднее значение	785	528	36
Листовой прокат ГОСТ 5520-79	430–490	265–345	21
Труба, ГОСТ 10705-80	490	343	20
Сортовой и фасонный прокат ГОСТ 19281-89	440–500	270–350	21

Выводы

В работе исследовали микроструктурные изменения стали 09Г2С в кольцевой заготовке Ду 500 фланцевого соединения, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем. Было показано, что исследуемая сталь по сечению заготовки имела однородную ферритно-перлитную структуру со средним размером зерна феррита в пределах $9,17 \pm 0,20$ – $12,13 \pm 0,33$ мкм, что соответствовало 9–10 номеру зерна. При этом пораженность неметаллическими включениями стали 09Г2С была незначительной: подавляющее их большинство имели протяженность до 5,6 мкм в 96,3–100 % случаев (1-я группа НВ по методу Л2 ГОСТ 1778-70),

расчетные индексы загрязненности находились в пределах от $2,7 \times 10^{-3}$ до $4,7 \times 10^{-3}$.

Установлено, что основные механические характеристики стали 09Г2С, изготовленной методом ЦЭШЛ, составляли $\sigma_B = 785$ МПа, $\sigma_T = 528$ МПа, $\delta_5 = 36$ % и превышали уровень свойств в деформированном состоянии: значения σ_B и σ_T превышали в 1,5 раза, показатели относительного удлинения — в 1,7 раза.

Центробежное литье имеет преимущества по сравнению с альтернативными методами получения кольцевых заготовок и в целях повышения качества изделия необходимы жесткое соблюдение технологического регламента и качественный выходной контроль.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Головачев В.Л., Бочаров А.Н., Байдуганов А.М. К вопросу об изготовлении фланцев методом центробежного электрошлакового литья // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 2. С 47–50.
2. Лившиц Б.Г. Металлография. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
3. Голиков, И.Н. Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях. М.: Металлургия, 1977. 223 с.
4. Zharebtsov S.N., Fatyanov S.V. Centrifugal Electroslog Casting for 08Kh18N10T Steel // Chemical and Petroleum Engineering. 2006. Vol. 42. No. 1–2. P. 114–116. DOI: 10.1007/s10556-006-0063-8.
5. Скрипник С.В. Методы управления формированием кристаллического макростроения центробежных электрошлаковых отливок // Литейное производство. 2010. № 7. С. 21–27.
6. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия. М.: Госстандарт СССР, 1989. 15 с.
7. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. М.: Госстандарт СССР, 1970. 31 с.
8. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. М.: Госстандарт СССР, 1982. 21 с.
9. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Госстандарт СССР, 1984. 24 с.
10. Финкель В.М., Елеси́на О.П., Зрайченко В.А. Неметаллические включения и прочность стали // Доклады академии наук СССР. 1968. Т. 183. № 3. С. 576–579.
11. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.
12. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Неметаллические включения и качество стали. Киев: Техника, 1980. 168 с.
13. Филиппов Г.А., Ливанова О.В. Взаимодействие дефектов структуры и деградация свойств конструкционных материалов // Материаловедение. 2002. № 10. С. 17–21.
14. Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Филиппов Г.А., Чевская О.Н., Ливанова О.В. Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность трубопроводов // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 1. С. 6–11.
15. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 310 с.
16. Сверхмелкое зерно в металлах / Под ред. Л.К. Гордиенко. М.: Металлургия, 1973. 383 с.
17. ГОСТ 5520-79. Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. М.: Госстандарт СССР, 1979. 17 с.
18. ГОСТ 10705-80. Трубы стальные электросварные. Технические условия. М.: Госстандарт, 1991. 19 с.

REFERENCES

1. Golovachev V.L., Bocharov A.N., Baiduganov A.M. K voprosu ob izgotovlenii flantsev metodom tsentrobezhnogo elektroshtakovogo lit'ya [On the Issue of Manufacturing Flanges by Centrifugal Electroslog Casting]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2017, No. 2, pp 47–50. [in Russian].

2. Livshits B.G. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 236 p. [in Russian].
3. Golikov, I.N. Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh* [Dendritic Segregation in Steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 223 p. [in Russian].
4. Zharebtsov S.N., Fatyanov S.V. Centrifugal Electroslog Casting for 08Kh18N10T Steel. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2006, Vol. 42, No. 1–2, pp. 114–116. DOI: 10.1007/s10556-006-0063-8.
5. Skripnik S.V. Metody upravleniya formirovaniem kristallicheskogo makrostroeniya tsentrobezhnykh elektroshtakovykh otlivok [Methods of Controlling the Formation of Crystalline Macrostructure of Centrifugal Electroslog Castings]. *Liteinoe proizvodstvo — Foundry. Technologies and Equipment*, 2010, No. 7, pp. 21–27. [in Russian].
6. GOST 19281-89. *Prokat iz stali povyshennoi prochnosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 19281-89. Rolled Steel with Increased Strength. General Specifications]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1989. 15 p. [in Russian].
7. GOST 1778-70. *Stal'. Metallograficheskie metody opredeleniya nemetallicheskih vklyuchenii* [State Standard 1778-70. Steel. Metallographic Methods for the Determination of Nonmetallic Inclusions]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1970. 31 p. [in Russian].
8. GOST 5639-82. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [State Standard 5639-82. Steel and Alloys. Methods for Detection and Determination of Grain Size]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1982. 21 p. [in Russian].
9. GOST 1497-84. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [State Standard 1497-84. Metals. Methods of Tension Test]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1984. 24 p. [in Russian].
10. Finkel V.M., Elesina O.P., Zraichenko V.A. Nemetallicheskie vklyucheniya i prochnost' stali [Non-Metallic Inclusions and Steel Strength]. *Doklady akademii nauk SSSR — Soviet Physics. Doklady*, 1968, Vol. 183, No. 3, pp. 576–579. [in Russian].
11. Gubenko S.I., Parusov V.V., Derevyanchenko I.V. *Nemetallicheskie vklyucheniya v stali* [Non-Metallic Inclusions in Steel]. Dnipropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2005. 536 p. [in Russian].
12. Bel'chenko G.I., Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vklyucheniya i kachestvo stali* [Non-Metallic Inclusions and Steel Quality]. Kiev, Tekhnika Publ., 1980. 168 p. [in Russian].
13. Filippov G.A., Livanova O.V. *Vzaimodeistvie defektov struktury i degradatsiya svoystv konstruktivnykh materialov* [Interaction of Structural Defects and Degradation of Properties of Structural Materials]. *Materialovedenie — Material Science*, 2002, No. 10, pp. 17–21. [in Russian].
14. Pleshivtsev V.G., Pak Yu.A., Filippov G.A., Chevskaya O.N., Livanova O.V. *Faktory, vliyayushchie na ekspluatatsionnyu nadezhnost' truboprovodov* [Factors Affecting the Operational Reliability of Pipelines]. *Deformatsiya i razrushenie materialov — Deformation and Fracture of Materials*, 2007, No. 1, pp. 6–11. [in Russian].
15. Goldshtein M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnykh splavov* [Metal Physics of

High-Strength Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 310 p. [in Russian].

16. *Sverkhmelkoe zerno v metallakh* [Ultrafine-Grain Metals]. Ed. L.K. Gordienko. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 383 p. [in Russian].

17. *GOST 5520-79. Prokat listovoi iz uglerodistoi, nizkolegirovannoi i legirovannoi stali dlya kotlov i sudov, rabotayushchikh pod davleniem. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 5520-79. Rolled Carbon Low-Alloy and

Alloy Steel Sheets and Plates for Boilers and Pressure Vessels. Specifications]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1979. 17 p. [in Russian].

18. *GOST 10705-80. Truby stal'nye elektrosvarnye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 10705-80. Electrically Welded Steel Tubes. Specifications]. Moscow, Gosstandart Publ., 1991. 19 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Халикова Гульнара Рашитовна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, научный сотрудник, Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Российская Федерация

Gulnara R. Halikova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Researcher, Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

e-mail: gulnara.r.khalikova@gmail.com

Шерматов Джамшед Наимджонович, аспирант, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Jamshed N. Shermatov, Post-Graduate Student, Assistant of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: jamshed8808@mail.ru

Наумкин Евгений Анатольевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Evgeny A. Naumkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ynaumkin@mail.ru