

УТОЧНЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОЙ РАСТВОРИМОСТИ АЗОТА В ДУПЛЕКСНЫХ СТАЛЯХ

В.В. Седухин, sedukhinvv@susu.ru
И.В. Чуманов, chumanoviv@susu.ru

*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте,
Златоуст, Россия*

Аннотация. Приведено описание класса дуплексных нержавеющей сталей (ДНС), рассмотрено влияние азота как легирующего элемента в рассматриваемых сталях, а также особенности формирования структуры и различного вида соединений в кристаллизующемся расплаве рассматриваемых композиций химического состава. Описано влияние предельной концентрации азота в металле как лимитирующего фактора для получения бездефектных слитков. Установлена зависимость для прогнозирования предельной концентрации азота в стали марки UNS S32750, которая находится в пределах марочного содержания данного элемента. Однако отмечено, что показатель температуры, который необходимо использовать в данной зависимости, вызывает вопросы. В различных источниках исследователи предлагают различные варианты – температура отдачи азотированных ферросплавов (1580–1600 °С), температура выпуска металла из печи или разливки (1520–1580 °С) либо температура начала кристаллизации (1430–1450 °С). Однако такие различия используемого для расчета показателя температуры дают совершенно разные результаты предельной растворимости азота. Для установления показателя температуры, который необходимо использовать в выражении, проведены математические расчеты предельной концентрации азота в интервале температур 1450–1600 °С с шагом 30 °С. Для сравнительного анализа выбраны составы различных исследователей, в работах которых сообщалось как об успешных экспериментах по выплавке составов дуплексных сталей, легированных азотом, так и получении дефектных слитков (газовые пузыри). Установлено, что при использовании существующего выражения актуально использование температуры 1480 °С, в отличие от предлагаемых различными исследователями температур. Только при выполнении условия, что рассчитанный показатель растворимости азота при данной температуре выше фактической концентрации в стали, обеспечивается получение бездефектного слитка дуплексной стали.

Ключевые слова: дуплексная нержавеющая сталь, легирование азотом, растворимость азота, химический состав

Для цитирования: Седухин В.В., Чуманов И.В. Уточнение выражения для расчета предельной растворимости азота в дуплексных сталях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 4. С. 14–20. DOI: 10.14529/met220402

Original article
DOI: 10.14529/met220402

REFINEMENT OF THE EXPRESSION FOR CALCULATING THE LIMITING SOLUBILITY OF NITROGEN IN DUPLEX STEELS

V.V. Sedukhin, sedukhinvv@susu.ru
I.V. Chumanov, chumanoviv@susu.ru
South Ural State University, Zlatoust, Russia

Abstract. A description of a class of duplex stainless steels (DSS) is given, the influence of nitrogen as an alloying element in the steels under consideration, as well as the features of structure formation and various types of compounds in the crystallizing melt of the considered compositions of chemical composition are considered. The influence of the limiting nitrogen concentration in the metal as a limiting factor for obtaining defect-free ingots is described. A dependence has been established for predicting the limiting concentration of nitrogen in UNS S32750 steel, which is within the grade content of this element. However,

it is noted that the temperature indicator to be used in this dependence raises questions. In various sources, researchers suggest different options – the recoil temperature of nitrated ferroalloys (1580–1600 °C), the temperature of metal release from the furnace or casting (1520–1580 °C), or the temperature of the beginning of crystallization (1430–1450 °C). However, such differences in the temperature used to calculate the temperature figure give completely different results for the ultimate solubility of nitrogen. To determine the temperature index to be used in the expression, mathematical calculations of the limiting nitrogen concentration in the temperature range 1450–1600 °C in increments of 30 °C were performed. For comparative analysis, compositions of different researchers have been selected, in the works of which both successful experiments on melting compositions of duplex steels alloyed with nitrogen and obtaining defective ingots (gas bubbles) have been reported. It has been established that the use of the existing expression is relevant for the temperature of 1480 °C, as opposed to the temperatures proposed by various researchers. Only when the condition that the calculated nitrogen solubility index at this temperature is higher than the actual concentration in the steel is met, is it possible to obtain a defect-free duplex steel ingot.

Keywords: duplex stainless steel, nitrogen alloying, nitrogen solubility, chemical composition

For citation: Sedukhin V.V., Chumanov I.V. Refinement of the expression for calculating the limiting solubility of nitrogen in duplex steels. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(4): 14–20. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220402

Введение

Дуплексные нержавеющие стали (ДНС) определяются как семейство сталей с двухфазной микроструктурой, состоящей из феррита (ОЦК-решетка) и аустенита (ГЦК-решетка) [1, 2]. Точное количество каждой фазы зависит от химического состава и термической обработки стали. Основными легирующими элементами являются хром и никель, но для контроля структурного баланса и придания характеристик коррозионной стойкости, таких как стойкость к точечной коррозии в хлоридной среде и коррозионная стойкость под напряжением, могут добавляться азот, молибден, медь, кремний и вольфрам [1, 2]. ДНС содержат ферритостабилизирующие элементы, такие как Cr, Mo, Si и W, а также аустенитостабилизирующие элементы, такие как Ni, Mn, C и Cu. Стойкость ДНС к питтинговой коррозии сильно зависит от массовой доли Cr, Mo, W и N в сплаве. Существует несколько уравнений, определяющих эквивалентное число питтинговой коррозионной стойкости (PRE), которое используется в качестве эталона питтинговой коррозионной стойкости дуплексных сталей, и широко используется следующее уравнение, содержащее влияние N (PREn):

$PREn = \% Cr + 3,3(\% Mo + \% W) + 16 \% N$.

При увеличении температуры обработки раствора с 1050 до 1350 °C объемная доля аустенитной фазы значительно уменьшается. Объемная доля феррита значительно уменьшается при увеличении содержания N и снижении температуры обработки раствора, тем самым увеличивая прочность на разрыв и уд-

линение линейно с увеличением предела текучести [3].

Воздействие азота на свойства сталей и характеристики бывает разнонаправленным и зависит от многих факторов, таких как концентрация азота в стали, форма присутствия, состав стали и другие факторы. Широко известно отрицательное влияние азота, которое связано с тем, что его содержание в металле выше растворимости в твердом металле. Это создает условия для выделения азота из твердого раствора. Выпадение азота из такого пересыщенного раствора в ходе старения металла снижает пластичность и прочность стали; с другой стороны, азот иногда является полезным легирующим элементом. С его помощью можно получить сталь со свойствами, недостижимыми с помощью других легирующих элементов. Путем легирования стали азотом в зависимости от потребности можно усиливать те или иные функциональные свойства [4, 5].

Азот, введенный в сталь для легирования, может находиться в виде:

- газа, заполняющего поры и трещины;
- элемента внедрения в твердом растворе на основе железа;
- избыточных нитридных фаз.

Две последние формы присутствия азота в стали обуславливают положительное воздействие на физико-химические свойства, обеспечив в некоторых случаях преимущества перед традиционными нержавеющими сталями.

При всех преимуществах легирования дуплексных сталей азотом существует основной критерий, его ограничивающий. Растворимость азота в феррите гораздо меньше, чем в

аустените и жидком металле [6]. Атомы азота обладают существенно меньшим атомным радиусом, чем атомы железа, и располагаются в качестве элемента внедрения в октаэдрических порах кристаллической решетки железа. Максимальная растворимость азота в нелегированном феррите достигается при температуре $T = 590\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составляет не более 0,115 масс. % Растворимость азота в аустените намного выше – 2,8 масс. % при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кристаллизация duplexных сталей начинается по ферритному типу. При превышении критической концентрации азота в расплаве и его дальнейшей кристаллизации часть растворенного в металле азота выделяется в газовую фазу, при этом образуются пузыри в слитке. Азотные пузыри не завариваются при горячей деформации и формируют внутренние дефекты в готовом металле.

Поэтому одной из технологических проблем является выделение азота в газовую фазу при затвердевании стали и образование азотных пузырей и пористости в слитке. Для максимального использования свойств азота как легирующего элемента необходимо увеличивать его содержание в стали. С другой стороны, чтобы получить плотный слиток, необходимо ограничивать содержание азота в стали перед затвердеванием.

В условиях увеличивающегося производства нержавеющей сталей, в том числе и класса duplexных сталей, установление различных методик прогнозирования предельной растворимости азота является весьма актуальной задачей.

Постановка задачи

В [7] представлены ряд работ, в которых проводится учет влияния компонентов стали на растворимость азота, однако можно установить, что единого уравнения расчета исследователи установить не могут, и при этом при расчетах получаются сильно расходящиеся значения. Только зависимость, приведенная в [8], позволяет установить показатель растворимости азота в стали UNS S32750 (0,261 масс. %), который находится в преде-

лах марочного содержания данного элемента (табл. 1).

Помимо концентрации легирующих элементов основными показателями в выражении является парциальное давление азота над расплавом и температура взаимодействия. Парциальное давление азота для расчетов в настоящей работе было постоянным и составляло 0,078084 МПа, что соответствует параметрам выплавки металла в условиях открытой атмосферы.

Однако значение температуры, которое необходимо использовать, вызывает вопросы. В различных источниках исследователи предлагают различные варианты – температура отдачи азотированных ферросплавов (1580–1600 °C) [9], температура выпуска металла из печи или разливки (1520–1580 °C) либо температура начала кристаллизации (1430–1450 °C) [10]. Однако такие различия используемого для расчета показателя температуры дают совершенно разные результаты предельной растворимости азота. При этом можно отметить, что величина концентрации азота имеет обратную зависимость к величине показателя температуры: при увеличении температуры растворимость азота снижается и наоборот.

Уточнение выражения для расчета показателя предельной растворимости азота в duplexных сталях имеет важное значение, поскольку разность в верхнем и нижнем пределе содержания азота в данных сталях не превышает 0,08–0,1 масс. %, и при выборе неоптимального состава стали его предельная растворимость может снижаться, что переводит сталь в группу марок с суженными пределами содержания элементов, что влечет за собой усложнение технологического процесса производства стали.

Математические расчеты

Для установления показателя температуры, которое необходимо использовать в выражении, были проведены математические расчеты предельной концентрации азота в интервале температур 1450–1600 °C с шагом

Таблица 1

Химический состав стали UNS S32750, масс. %

Table 1

Chemical composition of UNS S32750 steel, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
≤ 0,03	≤ 0,80	≤ 1,20	≤ 0,035	≤ 0,020	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0–5,0	≤ 0,50	0,24–0,32

30 °С согласно выражению, представленному в [8].

Первым составом для оценки являлся состав, представляющий собой среднюю концентрацию элементов в стали типа UNS S32750 (см. табл. 1). Для сравнительного анализа были выбраны составы различных исследователей, в работах которых сообщалось как об успешных экспериментах по выплавке составов дуплексных сталей, легированных азотом,

так и получении дефектных слитков (газовые пузыри) [7, 11–13], которые также представлены в табл. 2.

В табл. 3 приведены полученные результаты расчета при различных температурах.

По результатам анализа полученных данных можно отметить, что для расчета предельной концентрации азота не является актуальным использование температуры начала кристаллизации расплава 1450 °С, поскольку

Составы, выбранные для анализа

Таблица 2

Compositions selected for analysis

Table 2

№ состава	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	N
1	0,015	0,40	0,60	0,025	0,010	25,0	7,0	4,0	–	–	0,25	0,28
2 [11]	0,0245	0,8819	0,4054	0,020	0,009	24,45	6,29	4,197	0,056	–	–	0,32
3 [12]	0,021	0,99	1,11	0,019	0,005	23,38	6,19	3,11	–	–	–	0,15
4 [12]	0,029	0,96	0,73	0,021	0,007	25,85	7,06	4,45	–	–	–	0,22
5 [13]	0,0298	0,41	0,88	0,020	0,016	21,98	5,25	2,79	–	–	–	0,15
6 [3]	0,013	0,71	1,19	0,006	0,011	25,40	6,74	1,59	–	3,05	–	0,10
7 [3]	0,0178	0,79	0,73	0,0053	0,0064	25,35	6,75	1,39	–	2,46	–	0,14
8 [3]	0,0193	0,85	0,64	0,0048	0,007	25,37	6,86	1,39	–	2,43	–	0,25
9 [3]	0,010	0,70	0,70	0,004	0,011	25,64	6,89	1,59	–	2,64	–	0,25
10 [3]	0,0386	1,20	0,91	0,0265	0,0115	24,61	6,65	1,25	–	2,54	–	0,35
11 [3]	0,0227	0,94	0,76	0,0045	0,0061	25,66	7,02	1,45	–	2,51	–	0,37
12 [14]	0,033	0,47	1,13	0,023	0,008	25,60	6,38	4,46	–	–	0,16	0,34
13 [14]	0,018	0,30	0,80	0,023	0,008	25,50	6,53	3,90	–	–	0,16	0,26
14 [7]	0,018	0,31	1,09	0,004	0,003	25,95	6,15	4,90	0,21	–	0,03	0,31
15 [7]	0,026	0,41	1,02	0,004	0,002	24,55	5,70	3,37	0,005	–	0,27	0,34

Результаты расчета предельной растворимости азота, масс. %

Таблица 3

The results of calculating the limiting solubility of nitrogen, wt. %

Table 3

№ состава	Температура, °С						Фактическое содержание [N], масс. %	Примечание
	1450	1480	1510	1540	1570	1600		
1	0,303	0,282	0,263	0,246	0,230	0,216	0,28*	Дефектов нет
2	0,280	0,261	0,244	0,228	0,214	0,201	0,32	Дефекты есть
3	0,222	0,208	0,195	0,183	0,173	0,163	0,15	Дефектов нет
4	0,334	0,310	0,288	0,269	0,251	0,235	0,22	Дефектов нет
5	0,195	0,183	0,172	0,163	0,154	0,146	0,15	Дефектов нет
6	0,225	0,210	0,196	0,184	0,173	0,162	0,1	Дефектов нет
7	0,205	0,193	0,179	0,168	0,158	0,149	0,14	Дефектов нет
8	0,197	0,184	0,172	0,162	0,152	0,144	0,25	Дефекты есть
9	0,216	0,202	0,189	0,177	0,166	0,156	0,25	Дефекты есть
10	0,165	0,154	0,145	0,136	0,129	0,122	0,35	Дефекты есть
11	0,196	0,183	0,171	0,160	0,151	0,142	0,37	Дефекты есть
12	0,344	0,320	0,297	0,277	0,259	0,243	0,34	Дефекты есть
13	0,325	0,302	0,281	0,262	0,245	0,230	0,26	Дефектов нет
14	0,435	0,404	0,374	0,348	0,323	0,305	0,31	Дефектов нет
15	0,268	0,249	0,233	0,218	0,205	0,193	0,34	Дефекты есть

* Среднее марочное содержание.

в составе 12 расчетный показатель растворимости при данной температуре выше фактического, но при этом газовые пузыри в получаемом слитке присутствуют.

Также показатели предельной концентрации азота в составе дуплексных сталей не являются действительными при расчете в интервале температур 1570–1600 °С, являющихся температурами отдачи азотированных ферросплавов при легировании расплава и выпуска металла из печи. На примере составов 1, 5, 13 и 14 наблюдается, что при данных температурах расчетные показатели ниже, чем фактическое содержание азота в полученном металле, но при этом в получаемых экспериментальных образцах отсутствуют дефекты в виде газовой пористости. Это противоречит положению об образовании газовой пористости в металле в случае, если концентрация введенного для легирования азота превышает предельную растворимость азота в расплаве.

Таким образом, при дальнейшем анализе полученных результатов выдвинуто предпо-

ложение о том, что температурой, которую необходимо использовать в существующем выражении для расчета предельной концентрации азота для дуплексных сталей, является температура 1480 °С. Только при выполнении условия, что рассчитанный показатель растворимости азота при данной температуре выше фактической концентрации в стали, обеспечивается получение бездефектного слитка дуплексной стали.

Заключение

На основании выполненных работ проведено уточнение выражения для расчета предельной растворимости азота в дуплексных сталях. При использовании существующего выражения обосновано использование температуры 1480 °С, в отличие от предлагаемых различными исследователями температур 1450 °С (температура начала кристаллизации расплава), 1580–1600 °С (температура легирования расплава азотированными ферросплавами/выпуска).

Список литературы

1. Nilsson J.O. Super duplex stainless steels // *Material Science and Technology*. 1992. Vol. 8. P. 685–688. DOI: 10.1179/MST.1992.8.8.685
2. Kahar S. Duplex Stainless Steels – An overview // *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2017. Vol. 7. P. 27–36. DOI: 10.9790/9622-0704042736
3. Park Y.-H., Lee Z.-H. Effect of nitrogen and heat treatment on the microstructure and tensile properties of 25Cr-7Ni-1.5Mo-3W-xN duplex stainless steel castings // *Materials Science and Engineering A*. 2001. Vol. 297, iss. 1-2. P. 78–84. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01263-6
4. Kamachi Mudali U. Nitrogen – A Boon to the metals industry // *Materials and Manufacturing Processes*. 2004. Vol. 19. P. 1–5. DOI: 10.1081/AMP-120027493
5. Sridhar N., Kolts J. Effects of Nitrogen on the Selective Dissolution of a Duplex Stainless Steel // *Corrosion*. 1987. Vol. 43. P. 646–651. DOI: 10.5006/1.3583843
6. Казаков А.А., Рябошук С.В. Физико-химические основы сталеплавильных процессов: метод. указания к лаборатор. работам. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 44 с.
7. Чуманов И.В., Седухин В.В. Анализ методик прогнозирования предельной концентрации азота в дуплексных сталях // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2022. Т. 78, № 7. С. 598–604. DOI: 10.32339/0135-5910-2022-7-598-604
8. Свяжин А.Г., Капуткина Л.М. Азотистые и высокоазотистые стали. Промышленные технологии и свойства // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019. Т. 62, № 3. С. 173–187. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-173-187
9. Корзун Е.Л. Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода: дис. ... д-ра техн. наук. Донецк: ГОУ ВПО «ДНТУ», 2021. 436 с.
10. Науменко В.В. Влияние азота и кремния на механические и коррозионные свойства низкоуглеродистой аустенитной стали для применения в сильноокислительных средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2012. 27 с.
11. Chandramohan P., Nazirudeen S.S.M., Ramakrishnan S.S. Studies on Production and Thermo-Mechanical Treatment of 0.32% Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2008. Vol. 17, iss. 2. P. 271–279. DOI: 10.1007/s11665-007-9140-1
12. Chandramohan P., Nazirudeen S.S.M., Srivatsavan R. The effect of nitrogen solubility, heat

treatment and hot forging on 0.15% N duplex stainless steels // *International Journal of Materials and Product Technology*. 2006. Vol. 25, no. 4. P. 281–296. DOI: 10.1504/IJMPT.2006.008884

13. Mechanical and corrosion behaviors of 25Cr-5.3Ni-2.8Mo-0.15N duplex stainless steel castings affected by annealing process / J. Li, J. Guo, C.-Y. Lu et.al. // *Materials and Corrosion*. 2015. Vol. 66, no. 2. P. 105–110.

14. Исследование влияния химического состава и условий кристаллизации на формирование структуры супердуэплексных сталей / К.Н. Уткина, Л.Я. Левков, А.С. Федоров и др. // Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина (ФХОМП 2022): сб. тр. конф. (Выкса, 10–14 окт. 2022 г.). Выкса, 2022. С. 248–256.

References

1. Nilsson J.O. Super duplex stainless steels. *Material Science and Technology*. 1992;8:685–688. DOI: 10.1179/MST.1992.8.8.685

2. Kahar S. Duplex Stainless Steels – An overview. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2017;7:27–36. DOI: 10.9790/9622-0704042736

3. Park Y.-H., Lee Z.-H. Effect of nitrogen and heat treatment on the microstructure and tensile properties of 25Cr-7Ni-1.5Mo-3W-xN duplex stainless steel castings. *Materials Science and Engineering A*. 2001;297(1-2):78–84. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01263-6

4. Kamachi Mudali U. Nitrogen – A Boon to the metals industry. *Materials and Manufacturing Processes*. 2004;19:1–5. DOI: 10.1081/AMP-120027493

5. Sridhar N., Kolts J. Effects of Nitrogen on the Selective Dissolution of a Duplex Stainless Steel. *Corrosion*. 1987;43:646–651. DOI: 10.5006/1.3583843

6. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V. *Fiziko-khimicheskiye osnovy staleplavil'nykh protsessov: metodicheskiye ukazaniya k laboratornym rabotam* [Physical and Chemical Basis of Steelmaking Processes: Methodological Instructions for Laboratory Work]. St. Petersburg: Polytechnical University Publ.; 2013. 44 p. (In Russ.)

7. Chumanov I.V., Sedukhin V.V. Analysis of methods for predicting the limiting nitrogen concentration in duplex steels. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2022;78(7):598–604. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2022-7-598-604

8. Svyazhin A.G., Kaputkina L.M. Nitrogen steels and high nitrogen steels. Industrial technologies and properties. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2019;62(3):173–187. (In Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-173-187

9. Korzun E.L. *Razvitiye nauchnykh i tekhnologicheskikh osnov proizvodstva staley i splavov s kontroliruyemym sodержaniyem azota i ugleroda: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of scientific and technological foundations for the production of steels and alloys with controlled nitrogen and carbon. Doct. sci. diss.]. Donetsk: Donetsk National Technical University; 2021. 436 p. (In Russ.)

10. Naumenko V.V. *Vliyaniye azota i kremniya na mekhanicheskiye i korrozionnyye svoystva nizkouglerodistoy austenitnoy stali dlya primeneniya v sil'nookislitel'nykh sredakh: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Influence of nitrogen and silicon on mechanical and corrosion properties of low-carbon austenitic steel for use in highly oxidizing environments. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow: Central Research Institute of Ferrous Metallurgy named after I.P. Bardin; 2012. 27 p. (In Russ.)

11. Chandramohan P., Mohamed Nazirudeen S., Ramakrishnan S.S. Studies on Production and Thermo-Mechanical Treatment of 0.32% Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2008;17(2):271–279. DOI: 10.1007/s11665-007-9140-1

12. Chandramohan P., Nazirudeen S.S.M., Srivatsavan R. The effect of nitrogen solubility, heat treatment and hot forging on 0.15% N duplex stainless steels. *International Journal of Materials and Product Technology*. 2006;25(4):281–296. DOI: 10.1504/IJMPT.2006.008884

13. Li J., Guo J., Lu C.-Y., Jia P.-G., Wu S.-H. Mechanical and corrosion behaviors of 25Cr-5.3Ni-2.8Mo-0.15N duplex stainless steel castings affected by annealing process. *Materials and Corrosion*. 2015;66(2):105–110. DOI: 10.1002/maco.201307213

14. Utkina K.N., Levkov L.Y., Fedorov A.S. et al. [Research of influence of chemical composition and conditions of crystallization on formation of structure of superduplex steels]. In: *International Scientific Conference “Physico-Chemical Bases of Metallurgical Processes” named after Academician A.M. Samarin (FCHOMP 2022): Proceedings (Vyksa, October 10–14, 2022)*. Vyksa; 2022. P. 248–256. (In Russ.)

Информация об авторах

Седухин Вадим Валерьевич, заведующий учебными лабораториями, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия; sedukhinvv@susu.ru.

Чуманов Илья Валерьевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой техники и технологий производства материалов, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия; chumanoviv@susu.ru.

Information about the authors

Vadim V. Sedukhin, Head of academic laboratories, South Ural State University, Zlatoust, Russia; sedukhinvv@susu.ru.

Ilya V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Engineering and Technologies of Production of Materials, South Ural State University, Zlatoust, Russia; chumanoviv@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 05.09.2022

The article was submitted 05.09.2022