

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛИКВИДУС  
СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ\****Зубарев К.А., аспирант кафедры «Металлургия стали и ферросплавов»**Котельников Г.И., к.т.н., доцент кафедры «Металлургия стали  
и ферросплавов» (gikotelnikov@yandex.ru)**Титова К.О., инженер**Семин А.Е., д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали и ферросплавов»**Михайлов М.А., заведующий лабораторией***Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)**

**Аннотация.** Плавка сталей и сплавов заканчивается заливкой металла в изложницу или в форму. Для проведения разливки необходимо знать температуру ликвидус разливаемого сплава. Эта проблема становится особенно актуальной при разработке технологии выплавки никелевых сплавов, содержащих большое количество легирующих элементов. Цель работы состояла в создании модели прогнозирования температуры ликвидус сложнолегированных сплавов на основе никеля. По литературным данным о диаграммах состояния бинарных систем никеля с различными элементами определены коэффициенты регрессии уравнений линий ликвидуса и солидуса двойных систем. Массив данных по коэффициентам регрессии увеличен с 21 до 27 элементов, что позволяет охватывать широкий спектр сложнолегированных сплавов на основе никеля. Тестирование модели, сформированной по данным для двойных сплавов, по массиву экспериментально определенных температур ликвидус сложнолегированных сплавов на основе никеля показывает, что ее использование дает возможность прогнозировать температуру ликвидус таких сплавов с достаточно высокой для технологической практики точностью  $\pm 19,8$  °С.

**Ключевые слова:** модель, температура ликвидус, коэффициенты регрессии, сложнолегированные сплавы, никелевые сплавы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-644-649

Оптимальная температура разливки сложнолегированных сплавов зависит от состава сплава, его назначения, массы слитка, материала формы, степени чистоты расплава по примесям и неметаллическим включениям, способа раскисления и модифицирования сплава, обработки его в вакууме и продувки инертными газами [1 – 3]. В то же время, несмотря на многообразие вышеперечисленных факторов, влияющих на температуру разливки, можно отметить, что она всегда тесно связана с температурой ликвидус сплава  $T_L$ . Температуру разливки  $T_{\text{разл.}}$  рассчитывают, исходя из температуры ликвидус и рационального перегрева жидкого металла над ней  $\Delta T$ , т. е.  $T_{\text{разл.}} = T_L + \Delta T$ . Анализ литературы и действующих технологий производства показывает, что перегрев  $\Delta T$  для различных сплавов может варьироваться от 50 до 200 °С [1 – 3]. Следовательно, перегрев может довольно сильно меняться, и чаще всего его подбирают эмпирически, опираясь на предварительные расчеты и представления о ходе плавки, учитывая, что

состав сплава может изменяться за счет испарения [4]. Таким образом, температура ликвидуса сплава является опорной точкой при выборе температуры разливки сложнолегированного сплава.

Существует несколько формул для расчета температуры ликвидус. Одна из них представляет собой полином первого порядка относительно содержания компонентов сплава [5, 6]

$$T_L = T_{\text{плав}} - \left\{ \sum (a_0 - a_i [i]) \right\},$$

где  $T_{\text{плав}}$  – температура плавления основы сплава;  $a_0$  – коэффициент приведения температуры плавления основы сплава;  $a_i$  – коэффициент значимости для соответствующего  $i$ -го элемента, содержащегося в сплаве;  $[i]$  – содержание  $i$ -го элемента в сплаве.

В литературе по сплавам никеля значения  $a_0$  отсутствуют, и температуры ликвидус и солидус сплавов часто определяют, используя полином второго порядка [7]:

$$T_L = T_{L, \text{осн.}} + \sum (100 p_{L,i} x_{L,i}^2 + 100 q_{L,i} x_{L,i}),$$

$$T_S = T_{S, \text{осн.}} + \sum (100 p_{S,i} x_{S,i}^2 + 100 q_{S,i} x_{S,i}),$$

где  $p_{L,i}$ ,  $q_{L,i}$  и  $p_{S,i}$ ,  $q_{S,i}$  – коэффициенты регрессии в бинарной системе;  $x_{L,i}$ ,  $x_{S,i}$  – мольная доля элемента в

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.». Проект № 14.578.21.0023 «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0023.

сплаве;  $T_{L, \text{осн.}}$ ,  $T_{S, \text{осн.}}$  – температура ликвидус и солидус основы сплава.

Компоненты сплава могут сильно изменять температуру ликвидус сплава. Эта разница особенно ощутима, если в составе сложнелегированных никелевых сплавов присутствуют тугоплавкие элементы (W, Re, Ru и т. д.) и такие элементы, как бор, гафний и др. [8, 9], которые в настоящее время входят в состав сложнелегированных жаропрочных сплавов нового поколения.

В то же время данные о коэффициентах  $p_{L,i}$ ,  $q_{L,i}$ , содержащихся в справочниках [10], оказываются недостаточно полными для прогнозирования температуры ликвидус современных сложнелегированных сплавов. Для решения этой проблемы необходимо дополнить справочную базу [10], основываясь на тех же принципах определения  $p_{L,i}$ ,  $q_{L,i}$ , т. е. на основе анализа кривых ликвидуса соответствующих двойных диаграмм. В табл. 1 представлены справочные [10] и рассчитан-

Таблица 1

**Значения коэффициентов регрессии в уравнениях линий ликвидуса и солидуса в бинарных системах компонентов  $i$  с никелем**

*Table 1. Regression coefficients in equations of liquidus and solidus lines in binary systems of  $i$ -components with nickel*

Атомный номер	Элемент $i$	$p_{S,i}$	$q_{S,i}$	$p_{L,i}$	$q_{L,i}$
5	B*	0	-750,0000	0	-22,5600
6	C	1,7647	-54,7617	-0,2329	-11,1706
13	Al	-0,0603	-1,8892	-0,0458	-1,6508
14	Si	-0,4759	-9,2780	-0,3925	-5,6187
22	Ti*	0	-10,2300	0	-10,3300
24	Cr	-0,0015	-2,2356	-0,0014	-1,9259
25	Mn*	0	-10,2000	0	-7,2500
26	Fe	-0,0150	-1,0000	-0,0140	-0,9300
27	Co*	0	0,3900	0	0,4000
29	Cu	-0,0259	-3,1286	-0,0073	-2,5447
30	Zn	-0,0288	-9,3323	-0,0442	-5,5475
31	Ga	0,6716	-20,8090	0,0237	-8,3077
33	As	-23,9509	-21,1807	-0,6663	-8,4243
39	Y	-7,7318	-263,5233	-1,8839	-13,1633
40	Zr*	0	-295,0000	0	-30,5000
41	Nb*	0	-13,1000	0	-11,7000
42	Mo	-0,1039	-1,6884	-0,0671	-1,5071
44	Ru	-0,0008	2,3349	-0,0255	2,7639
50	Sn	2,4594	-56,3409	-0,2799	-11,3551
51	Sb	0,3120	-45,5132	-0,2694	-10,5032
58	Ce	36 333,3300	-6876,6667	-1,4302	-14,1283
64	Gd	-133,5501	-136,0454	-3,9724	-12,5632
72	Hf	-226,7290	-200,3551	-0,9205	-12,8547
73	Ta	-0,0780	-4,8382	-0,1391	-3,5874
74	W	-0,1010	5,4181	-0,3619	8,9810
75	Re	0,3162	4,1218	0,3812	5,9740
81	Tl	6,6667	-67,3333	-5,8182	-11,8545

\* параметры регрессии, полученные в данной работе по диаграммам состояния двойных систем «никель – элемент  $i$ ».

\* regression parameters, obtained by this work, according to the diagrams of the binary systems “nickel-element  $i$ ”.

ные в данной работе по диаграммам состояния двойных систем «никель – элемент  $i$ » (В, Со, Тi, Nb, Zr, Mn) значения  $p_{L,i}$ ,  $q_{L,i}$  и  $p_{S,i}$ ,  $q_{S,i}$ . Бинарные диаграммы состояния построены с использованием компьютерной программы Thermo-CalcSoftware 5.

Для двойных систем данные коэффициенты хорошо описывают изменения температуры ликвидус. Однако для сложнoleгированных сплавов, где количество легирующих компонентов больше двух, модель может

давать определенную погрешность [11]. Поэтому для оценки справедливости вышеприведенной формулы и расширенной базы параметров (см. табл. 1) при расчете температуры ликвидус сложнoleгированного никелевого сплава сравним расчетные данные о температуре ликвидус с экспериментальными [12, 13], которые приведены в табл. 2 и 3.

Температуру ликвидус авторы работы [12] определяли экспериментально с использованием метода диф-

Таблица 2

**Химический состав (%) и температура ликвидус жаропрочных никелевых сплавов для лопаток авиационных газотурбинных двигателей**

*Table 2. Chemical composition (%) and liquidus temperature of heat-resistant nickel-based alloys for the blades of aviation gas-turbine engines*

Сплав	Cr	Co	W	Ti	Al	Nb	Ta	Re	Hf	C	Mo	Zr	B	$T_L, ^\circ\text{C}$
PWA1422	9,0	10,0	12,0	2,0	5,00	1,0	0	0	1,50	0,14	0	0,05	0,015	1381
MAR-M200+HF	9,0	10,0	12,5	1,7	4,70	0	0	0	1,50	0,14	0	0,05	0,015	1369
ЖС30	7,0	8,5	11,8	1,9	5,20	0,9	0	0	0,80	0,15	0,7	0,05	0,015	1375
ЖС26У	5,0	9,0	11,7	1,0	5,80	1,6	0	0	0	0,15	1,1	0,05	0,015	1385
CM247LC	8,0	10,0	10,0	1,0	5,50	0	3,0	0	1,50	0,15	0,7	0,05	0,015	1382
CM186LC	6,0	9,0	8,0	0,7	5,70	0	3,0	3,0	1,40	0,07	0,5	0,05	0,015	1386
PWA1426	6,5	10,0	6,5	0	6,00	0	4,0	3,0	1,50	0,10	1,7	0,05	0,015	1381
Rene 142	6,6	12,0	4,9	0	6,20	0	6,4	2,8	1,50	0,12	1,5	0,03	0,015	1376
ЖС32	5,0	9,0	8,3	0	6,00	1,5	4,0	4,0	0	0,15	1,0	0,05	0,015	1412
Rene N4	9,0	8,0	6,0	4,2	3,70	0,5	4,0	0	0,15	0,05	2,0	0	0,004	1341
ЖС30М	7,0	7,5	12,0	1,8	5,00	1,0	0	0	0	0	0,6	0	0	1403
CMSX-2	8,0	5,0	8,0	1,0	5,60	0	6,0	0	0	0	0,6	0	0	1391
CMSX-3	8,0	5,0	8,0	1,0	5,60	0	6,0	0	0,10	0	0,6	0	0	1396
PWA1480	10,0	5,0	4,0	1,5	5,00	0	12,0	0	0	0	0	0	0	1374
ЖС40	6,1	0,5	6,9	0	5,60	0,2	7,0	0	0	0	4,0	0	0	1407
ЖС36	4,0	9,0	12,0	1,0	6,00	0	0	2,0	0	0	1,0	0	0	1409
CMSX-4	6,5	9,0	6,0	1,0	5,60	0	6,5	3,0	0,10	0	0,6	0	0	1404
Rene N5	7,0	8,0	5,0	0	6,20	0	7,0	3,0	0,15	0,05	2,0	0	0,004	1387
PWA1484	5,0	10,0	6,0	0	5,60	0	8,7	3,0	0	0	2,0	0	0	1403
CMSX-10	2,0	3,0	5,0	0,2	5,70	0,1	8,0	6,0	0,15	0	0,4	0	0	1441
Rene N6	4,2	12,5	6,0	0	5,75	0	7,2	5,4	0,03	0,05	1,4	0	0,004	1439

Таблица 3

**Состав сплавов и температура ликвидус аморфной ленты**

*Table 3. Alloys composition and liquidus temperature of an amorphous belt*

Сплав	Концентрация, %							$T_L, ^\circ\text{C}$
	Cr	Fe	Si	C	B	Co	Ba	
75Н13ХСР	12,7	4,1	4,5	0,01	2,9	0,5	0,35	1103
71Н18ХСР	19	–	7	0,04	1,55	–	0,35	1144
92НСР	–	–	4,5	0,04	3,3	–	0,35	1054

ференциального термического анализа [14]. Данный метод позволяет измерить температуру ликвидус с точностью  $\pm 5$  °С.

Для расширения массива экспериментальных данных о температуре ликвидус сложнолегированных сплавов на основе никеля использовали экспериментальные значения температуры ликвидус сплавов, применяемых для получения аморфной ленты [13]. Состав и температура ликвидус этих сплавов представлены в табл. 3.

Сравнение расчетных температур ликвидуса, полученных при использовании параметров  $p_{L,i}$ ,  $q_{L,i}$  (см. табл. 1), с экспериментальными значениями (см. табл. 2 и 3) представлено в табл. 4.

По данным табл. 4, включающей 24 экспериментальные определения ( $n = 24$ ), по методике, представленной в работе [15] рассчитана погрешность модели прогнозирования температуры ликвидус сложнолегированного сплава на основе никеля:

$$S_{\text{ал}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T})^2}{n}} = 19,8 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $T_i$  и  $\hat{T}$  – экспериментальная и расчетная температура ликвидус сплава соответственно, °С

Таким образом, для оценки температуры ликвидус сложнолегированных сплавов на основе никеля выбрана двухпараметрическая модель. С помощью анализа диаграмм состояния двойных систем никеля с легирующими элементами (В, Со, Тi, Nb, Zr, Mn) дополнительно определены соответствующие недостающие параметры модели. Показано, что используя расширенный массив бинарных параметров  $p_{L,i}$ ,  $q_{L,i}$  модели можно с достаточной для технологии плавки точностью ( $\pm 19,8$  °С) рассчитывать температуру ликвидус сложнолегированных сплавов на основе никеля.

Таблица 4

**Сравнение расчетных и экспериментальных температур ликвидуса  
сложнолегированных сплавов на основе никеля**

*Table 4. Comparison of calculated and experimental liquidus temperatures  
of nickel-based complex alloyed steels*

Сплав	$T_{L, \text{эксп.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{L, \text{расчет.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_L = T_{L, \text{расчет.}} - T_{L, \text{эксп.}}, ^\circ\text{C}$
PWA1422	1381	1395	14
MAR-M200 + HF	1369	1401	32
ЖС30	1375	1402	10
ЖС26У	1385	1395	10
CM247LC	1382	1388	6
CM186LC	1386	1401	15
PWA1426	1381	1400	19
Rene 142	1376	1391	15
ЖС32	1412	1402	-10
Rene N4	1341	1354	13
ЖС30М	1403	1401	-2
CMSX-2	1391	1395	4
CMSX-3	1396	1395	-1
PWA1480	1374	1369	-5
ЖС40	1407	1401	-6
ЖС36	1409	1378	14
CMSX-4	1404	1392	-4
Rene N5	1387	1385	13
PWA1484	1403	1395	9
CMSX-10	1441	1388	-23
Rene N6	1439	1401	-20
75H13XCP	1103	1079	-24
71H18XCP	1144	1135	-9
92HCP	1054	1064	10

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пикунов М.В. Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок. – М.: МИСиС, 2005. – 416 с.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.
3. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов и др. – М.: ИД МИСиС, 2011. – 615 с.
4. Михайлов А.М., Зубарев К.А., Котельников Г.И. и др. Модель испарения компонентов никелевых сплавов при плавке в вакуумной индукционной печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 1. С. 35 – 38.
5. Теория и практика непрерывного литья заготовок / А.Н. Смирнов, А.Я. Глазков, В.Л. Пилушенко и др. – Донецк: ДонГТУ, ООО «Лебедь», 2000. – 371 с.
6. Металлургические мини-заводы / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун. – Донецк: Изд-во НОРД-ПРЕСС, 2005. – 450 с.
7. Смирнов А.Н., Неделькович Л., Джурджевич М. и др. Расчет температуры ликвидус стали // Сталь. 1996. № 3. С.15 – 19.
8. Металловедение: Учебник. В 2-х томах. Т. II / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, К.К. Портной и др. – М.: ИД МИСиС, 2009. – 528 с.

9. Свойства элементов. Кн. 1 / М.Е. Дриц, А.М. Дриц, П.Б. Будберг и др. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2003. – 448 с.
10. Кристаллизация из расплавов: Справ. изд.: Пер. с нем. / И. Бартел, Э. Буриг, К. Хайн, Л. Кухарж. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
11. Металловедение: Учебник. В 2-х томах. Т. I / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, К.К. Портной и др. – М.: ИД МИСиС, 2009. – 496 с.
12. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой. Ч. I // Материаловедение. 1997. № 4. С. 32 – 38.
13. Данилова И.И., Маркин В.В., Смолякова О.В. и др. Производство аморфной и нанокристаллической ленты методом литья на одновалковой МНЛЗ // Вестник ЮУрГУ. 2008. № 9. С. 16 – 20.
14. Альмяшев В.И., Гусаров В.В. Термические методы анализа: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 40 с.
15. Мельниченко А.С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении. – М.: ИД МИСиС, 2009. – 268 с.

Поступила 6 июля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 9, pp. 644–649.

PREDICTION OF LIQUIDUS TEMPERATURE OF NICKEL-BASED COMPLEX ALLOYED STEELS

K.A. Zubarev, G.I. Kotel'nikov, K.O. Titova, A.E. Semin, M.A. Mikhailov

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** Melting of steel and alloys is usual finished with casting a metal into a mold. It is necessary to know the liquidus temperatures of the casting alloy. The problem of casting is especially relevant for developing the technology of smelting the nickel-based alloys containing large amount of alloying elements. The aim of this work was to create a model for prediction the liquidus temperature of nickel-based complex alloyed steels. According to the literary data on the diagrams of the binary systems, the regression coefficients of the equations of liquidus and solidus lines of binary systems were defined. The data array of the regression coefficients is expanded from 21 to 27 elements, that allows to cover wider range of nickel-based complex alloyed steel. Testing of the model, formed with the data for double alloys, according to the array of experimentally defined liquidus temperatures of nickel-base complex alloyed steels shows that it is possible to predict the liquidus temperature of such alloys with an accuracy high enough for technological practice – ±19.8 °C – using the created model.

**Keywords:** model, liquidus temperature, regression coefficients, complex alloyed steel, nickel-based alloys.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-644-649

REFERENCES

1. Pikunov M.V. *Plavka metallov, kristallizatsiya spлавov, zatverdevanie otlivok* [Metal smelting, alloys crystallization, solidification of castings]. Moscow: MISiS, 2005, 416 p. (In Russ.).
2. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnykh dvigatelei (splavy, tekhnologiya, pokrytiya)* [Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coating)]. Moscow: MISiS, 2001, 632 p. (In Russ.).
3. Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M.V. etc. *Proizvodstvo otlivok iz spлавov tsvetnykh metallov* [Production of castings from non-ferrous metals and alloys]. Moscow: ID MISiS, 2011, 615 p. (In Russ.).

4. Mikhailov A.M., Zubarev K.A., Kotel'nikov G.I., Semin A.E., Grigorovich K.V. Model of evaporation of the components at the nickel alloys smelting in a vacuum induction furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 1, pp. 35–38. (In Russ.).
5. Smirnov A.N., Glazkov A.Ya., Pilyushenko V.L., Efimov V.A., Brodskii S.S., Pikus M.I. *Teoriya i praktika nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Theory and practice of continuous casting]. Donetsk: DonGTU, ООО “Lebed”, 2000, 371 p. (In Russ.).
6. Smirnov A.N., Safonov V.M., Dorokhova L.V., Tsuprun A.Yu. *Metallurgicheskie mini-zavody* [Metallurgical mini-plants]. Donetsk: Izdatel'stvo NORD-PRESS, 2005, 450 p. (In Russ.).
7. Smirnov A.N., Nedel'kovich L., Dzhurdzhevich M., Chernobaeva T.V., Odanovich Z. Calculation of liquidus temperature of steel. *Stal'*. 1996, no. 3, pp. 15–19. (In Russ.).
8. Novikov I.I., Zolotarevskii V.S., Portnoi K.K., Belov N.A., Livanov D.V., Medvedeva S.V., Aksenov A.A., Evseev Yu.V. *Metallovedenie. Uchebnik. V 2-kh tomakh. T. II* [Metal science. Textbook in 2 vols. Vol. 2]. Moscow: ID MISiS, 2009, 528 p. (In Russ.).
9. Driks M.E., Driks A.M., Budberg P.B., Kuznetsov N.T., Panovko V.M. *Svoistva elementov. Kn. 1* [Properties of elements. Book 1]. Moscow: Izdatel'skii dom “Ruda i Metally”, 2003, 448 p. (In Russ.).
10. Hein K., Buhrig E. Barthel J. Kuchař L. *Kristallisation aus Schmelzen*, VGI Leipzig, 1983, 344 s. (Russ.ed.: Hein K., Buhrig E. Barthel J. Kuchař L. *Kristallizatsiya iz rasplavov: Sprav. izd.* Trans. from German. Moscow: Metallurgiya, 1987, 320 p.)
11. Novikov I.I., Zolotarevskii V.S., Portnoi K.K., Belov N.A., Livanov D.V., Medvedeva S.V., Aksenov A.A., Evseev Yu.V. *Metallovedenie. Uchebnik. V 2-kh tomakh. T. I* [Metal science. Textbook in 2 vols. Vol. 1]. Moscow: ID MISiS, 2009, 496 p. (In Russ.).
12. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nickel superalloys for casting of blades with oriented and monocrystalline structure (part 1). *Materialovedenie*. 1997, no. 4, pp. 32–38. (In Russ.).
13. Danilova I.I., Markin V.V., Smolyakova O.V., Roshchin V.E., Il'in S.I., Goikhenberg Yu.N. Production of amorphous and nanocrystalline belt by molding on one-roll continuous casting machine. *Vestnik YuUrGU*. 2008, no. 9, pp. 16–20. (In Russ.).
14. Al'myashev V.I., Gusarov V.V. *Termicheskie metody analiza: Ucheb. posobie* [Thermal analysis methods: Textbook]. St. Petersburg: SPbGETU (LETI), 1999, 40 p. (In Russ.).

15. Mel'nichenko A.S. *Statisticheskii analiz v metallurgii i materialovedenii* [Statistical analysis in metallurgy and materials science]. Moscow: ID MISiS, 2009, 268 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed within the framework of the Federal Target Program "Research and development in priority areas of scientific-technological complex of Russia for 2014-2020". Project no. 14.578.21.0023 "Development and introduction of resource-saving technologies of production of complex alloyed steels and alloys with desired properties for components and aerospace units". The unique identifier of the agreement is RFMEFI57814X0023.

**Information about the authors:**

**K.A. Zubarev**, *Postgraduate of the Chair "Metallurgy of Steel and Ferroalloys"*

**G.I. Kotel'nikov**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy of Steel and Ferroalloys" (gikotelnikov@yandex.ru)*

**K.O. Titova**, *Engineer*

**A.E. Semin**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy of Steel and Ferroalloys"*

**M.A. Mikhailov**, *Head of the Laboratory*

Received July 6, 2016

---