

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

## FOUNDRY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.74  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39



## ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ 12Х18Н9ТЛ ДЛЯ ОТЛИВОК ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Ганеев А.А.<sup>1</sup>, Рамазанов А.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup>АО «Благовещенский арматурный завод», Благовещенск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** При производстве отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа наблюдается нестабильность ее механических свойств и структуры (наличие до 20% ферритной фазы) и, как следствие, снижение стойкости к межкристаллитной коррозии и эксплуатационных свойств. В статье проанализировано влияние элементов химического состава стали 12Х18Н9ТЛ на механические свойства и содержание ферритной фазы (далее СФФ) с использованием статистического анализа. Отмечено, что механические свойства и СФФ рассматриваемой стали существенно изменяются от ее химического состава в пределах ГОСТа. Оптимальные свойства и эксплуатационные характеристики отливок рассматриваемой стали достигаются при содержании ферритной фазы не более 5%. Поэтому повышение стабильности механических свойств и структуры литьих деталей ответственного назначения из аустенитной стали марки 12Х18Н9ТЛ является важнейшей задачей, для решения которой необходима оптимизация ее химического состава. **Цель работы.** Исследование и оптимизация химического состава стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа, обеспечивающие стабильность и высокие показатели механических свойств, в частности предела текучести при минимальном СФФ. **Используемые методы.** Для определения характера и степени влияния содержания химических элементов на показатели механических свойств и СФФ проводился корреляционно-регрессионный анализ. Оптимизация состава стали 12Х18Н9ТЛ проводилась методом кругового восхождения. **Новизна.** Получены математические модели, прогнозирующие механические свойства и СФФ по заданному химическому составу. **Результат.** Сопоставлены величины парных и частных коэффициентов корреляции влияния химических элементов на механические свойства и СФФ стали. Построены графические диаграммы зависимости влияния соотношения титана к алюминию на механические свойства и СФФ. **Практическая значимость.** Оптимизирован химический состав коррозионно-стойкой аустенитной стали в пределах ГОСТа с требуемым контролируемым СФФ. Полученные результаты исследования могут быть полезны при изготовлении литьих деталей из нержавеющей стали 12Х18Н9ТЛ.

**Ключевые слова:** химический состав, коррозионностойкая сталь, отливка, ферритная фаза, корреляционный и регрессионный анализ.

© Ганеев А.А., Рамазанов А.К., 2021

### Для цитирования

Ганеев А.А., Рамазанов А.К. Оптимизация химического состава коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9ТЛ для отливок трубопроводной арматуры // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 32–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# OPTIMIZATION OF A CHEMICAL COMPOSITION OF CORROSION-RESISTANT STEEL 12KH18N9TL FOR PIPELINE VALVE CASTINGS

Ganeev A.A.<sup>1</sup>, Ramazanov A.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

<sup>2</sup>JSC Blagoveshchensk Valves Plant, Blagoveshchensk, Russia

**Abstract. Problem statement (relevance of the research).** When manufacturing castings of pipeline valve body parts from corrosion-resistant steel grade 12Kh18N9TL within the GOST limits, there is instability of its mechanical properties and the lack of homogeneity of the structure (a ferritic phase in the structure amounting to 20%), resulting in a decrease in the intergranular corrosion resistance and performance properties. The research paper analyzes the influence of the chemical composition of steel grade 12Kh18N9TL on the mechanical properties and the content of the ferritic phase using a statistical analysis. It is noted that the mechanical properties and the ferrite content of the steel grade under study significantly vary depending on the chemical composition of steel within the GOST limits. The optimal properties and performance characteristics of the castings made of the steel grade under study are achieved, when the content of the ferritic phase doesn't exceed 5%. Therefore, improving the mechanical properties stability and the structure of critical duty castings made of austenitic steel grade 12Kh18N9TL is the most important issue, and the solution of this problem requires the chemical composition optimization. **Methods applied.** To determine the nature and rate of the influence of the chemical composition on the mechanical properties and the content of the ferritic phase, the correlation and regression analysis was used. The chemical composition of steel grade 12Kh18N9TL was optimized by the steepest ascent method. **Originality.** We designed the mathematical models that predict the mechanical properties and the content of the ferritic phase for the given chemical composition. **Result.** We compared the matching and partial correlation coefficients of the influence of the chemical composition on the mechanical properties and the ferrite content of steel. Graphical diagrams were built to show the influence of the titanium and aluminum ratio on the mechanical properties and the content of the ferritic phase. **Practical relevance.** The chemical composition of corrosion-resistant austenitic steel has been optimized within the GOST limits to provide the required content of the ferritic phase. The results of the research may be valuable for manufacturing castings from corrosion resistant steel 12Kh18N9TL.

**Keywords:** chemical composition, corrosion-resistant steel, casting, ferritic phase, correlation and regression analysis.

## For citation

Ganeev A.A., Ramazanov A.K. Optimization of a Chemical Composition of Corrosion-Resistant Steel 12KH18N9TL for Pipeline Valve Castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 32–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39>

## Введение

Для изготовления отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред, широкое применение нашла коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса марки 12Х18Н9ТЛ.

Данная сталь обладает относительно высокими эксплуатационными свойствами, высокой пластичностью и ударной вязкостью. Однако недостатками этой стали является низкий предел текучести (порядка 200 МПа), неоднородность структуры, склонность к межкристаллитной коррозии.

Следует отметить, что основной характеристикой качества литьих деталей являются механические свойства, определяемые структурой металла, которая существенно изменяется с содержанием легирующих элементов стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа [1]. Кроме того,

данная сталь находится вблизи границы аустенитно-ферритной структуры и при изменении химического состава в пределах ГОСТа содержит до 20%  $\alpha$ -фазы [2]. Присутствие ферритной фазы в аустенитных сталях отрицательно влияет на служебные свойства отливок, работающих при высоких температурах, так как  $\delta$ -феррит со временем переходит в хрупкую  $\sigma$ -фазу [3].

Для аустенитных сталей при температуре выше 350°C СФФ должно быть не более 5% [4]. По данным [5] удовлетворительную трещиноустойчивость стали аустенитного класса достигаются при СФФ не более 5%.

В зарубежной практике для производства отливок трубопроводной арматуры применяются заменители стали марки 12Х18Н9ТЛ: CF3, CF8, GX5CrNi19-10 (1.4308) и GX2CrNi19-11 (1.4309) [6], AISI 304, 321 и 347 [7]. По данным [8] свойства и эксплуатационные характеристики отливок нержавеющей стали тесно связаны с ее мик-

роструктурой (количеством  $\delta$ -феррита), которая в свою очередь зависит от химического состава [9]. Основные недостатки сталей аналогов характерны стали марки 12Х18Н9ТЛ: образование ферритной фазы, отрицательно влияющей на пластичность и ударную вязкость [10, 11], склонность к межкристаллитной коррозии.

Таким образом, повышение стабильности механических свойств и структуры литьих деталей ответственного назначения из аустенитной стали марки 12Х18Н9ТЛ является важнейшей задачей, для решения которой необходима оптимизация ее химического состава. Поэтому целью настоящей работы является исследование и оптимизация химического состава стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа, обеспечивающие стабильность и высокие показатели механических свойств, в частности предела текучести при минимальном СФФ (не более 5%).

### Материал и методика исследования

Исследования проводили на стали 12Х18Н9ТЛ по ГОСТ 977-88 следующего химического состава:  $C \leq 0,13\%$ ;  $Si = 0,10\text{--}1,20\%$ ;  $Mn = 0,88\text{--}2,20\%$ ;  $P \leq 0,035\%$ ;  $S \leq 0,030\%$ ;  $Cr = 16,5\text{--}20,5\%$ ;  $Ni = 7,5\text{--}11,5\%$ ;  $Ti = (5*С - 0,03) - 0,75\%$ ;  $Cu \leq 0,5\%$ . Выплавка стали производилась в электродуговой печи емкостью 3 т с основной футеровкой. Образцы для механических испытаний подвергались термической обработке по режиму: закалка при температуре 1050°C, выдержка 2 ч 30 мин (охлаждение в воде). Механические свойства стали 12Х18Н9ТЛ после

Таблица 1. Парные и частные коэффициенты корреляции механических свойств, СФФ и химических элементов стали 12Х18Н9ТЛ

Table 1. Matching and partial correlation coefficients of the mechanical properties, content of the ferritic phase and chemical elements of steel grade 12Kh18N9TL

Показатели механических свойств	Коэффициенты	Химические элементы									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Al	Cu
$\sigma_t$ , кгс/см <sup>2</sup>	Парные	<b>0,22</b>	<b>0,36</b>	<b>0,19</b>	-0,09	0,07	<b>0,65</b>	<b>-0,13</b>	<b>0,24</b>	<b>0,26</b>	-0,01
	Частные	<b>0,07</b>	<b>0,15</b>	0,01	-0,03	0,06	<b>0,60</b>	<b>-0,15</b>	0,08	<b>0,21</b>	<b>0,09</b>
$\sigma_b$ , кгс/см <sup>2</sup>	Парные	-0,02	<b>0,17</b>	-0,09	<b>-0,15</b>	-0,04	0,00	<b>-0,50</b>	<b>-0,23</b>	<b>-0,27</b>	-0,01
	Частные	0,02	<b>0,14</b>	-0,08	<b>-0,14</b>	-0,03	-0,04	<b>-0,47</b>	-0,09	<b>-0,14</b>	0,06
$\delta$ , %	Парные	<b>-0,14</b>	-0,03	<b>-0,15</b>	-0,04	<b>-0,16</b>	<b>-0,18</b>	-0,04	<b>-0,32</b>	<b>-0,28</b>	-0,04
	Частные	-0,05	0,03	-0,05	0,01	<b>-0,15</b>	<b>-0,18</b>	-0,03	<b>-0,24</b>	-0,09	-0,05
$\psi$ , %	Парные	-0,09	-0,06	-0,10	0,02	-0,08	-0,07	-0,03	<b>-0,28</b>	<b>-0,19</b>	0,05
	Частные	-0,02	-0,04	-0,02	0,02	-0,10	-0,05	-0,03	<b>-0,19</b>	0,04	0,03
$KCV_{60}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Парные	<b>-0,33</b>	<b>-0,12</b>	<b>-0,20</b>	0,05	<b>-0,14</b>	-0,09	<b>0,15</b>	<b>-0,43</b>	<b>-0,33</b>	-0,04
	Частные	<b>-0,23</b>	-0,05	-0,08	<b>0,21</b>	<b>-0,11</b>	-0,03	<b>0,13</b>	<b>-0,38</b>	-0,02	<b>-0,21</b>
СФФ, %	Парные	-0,09	-0,04	0,04	<b>0,16</b>	<b>0,16</b>	<b>0,30</b>	<b>-0,16</b>	0,03	-0,00	<b>0,42</b>
	Частные	<b>-0,11</b>	<b>-0,11</b>	0,03	-0,07	-0,01	<b>0,36</b>	<b>-0,28</b>	0,09	0,04	<b>0,48</b>

термообработки должны быть следующие:  $\sigma_t \geq 196$  МПа,  $\sigma_b \geq 441$  МПа,  $\delta \geq 25\%$ ,  $\psi \geq 32\%$ ,  $KCV_{60} \geq 24,5$  Дж/см<sup>2</sup>. Металлографическое исследование изучалось на оптическом микроскопе Axio Observer.D1m. Конфигурация брусков для исследования механических свойств соответствовала ГОСТ 977-88.

Для определения взаимосвязи химического состава, механических свойств и СФФ применялся корреляционно-регрессионный анализ, выполняемый на большом массиве производственных плавок (результаты спектрального анализа химического состава и механических свойств более 400 плавок) с использованием программного пакета Microsoft Office Excel и Statistica 6.0.

Оптимизация состава стали марки 12Х18Н9ТЛ проводилась по содержанию в ее структуре ферритной фазы при ограничениях, накладываемых пределом текучести, и элементов химического состава методом крутого восхождения.

### Результаты исследования и их обсуждение

При помощи пакета Statistica 6.0 проведен корреляционный анализ [12], по результатам которого получены парные и частные коэффициенты корреляции механических свойств ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCV_{60}$ ), СФФ и химических элементов стали 12Х18Н9ТЛ (табл. 1, значимые коэффициенты выделены).

Анализ значимых коэффициентов корреляции (**табл. 2**) показывает, что хром, титан и алюминий оказывают наибольшее положительное влияние на предел текучести. В то же время хром отрицательно влияет на СФФ (увеличивает), а титан и алюминий оказывают отрицательное влияние на пластические характеристики и ударную вязкость. Кроме того, хром, титан и алюминий имеют большую склонность к образованию тугоплавких и плотных окисных плен типа  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ухудшающих литейные свойства [2, 13].

Повышение содержания алюминия может быть причиной повышения склонности стали к образованию  $\sigma$ -фазы и ухудшению жаропрочности [14]. Поэтому содержания в стали Cr, Ti и Al необходимо снизить до минимального уровня. Кремний оказывает положительное влияние на прочностные характеристики и отрицательное на ударную вязкость. Кроме того, кремний улучшает жидкотекучесть стали и повышает ее жаростойкость, поэтому его содержание в пределах 0,6–1,0% полезно, увеличение сверх 1–2% повышает СФФ и ухудшает пластические свойства [15]. Никель оказывает отрицательное влияние на прочностные характеристики и положительное на ударную вязкость и СФФ (снижает). Углерод оказывает положительное влияние на предел текучести и отрицательно на ударную вязкость. Углерод оказывает отрицательное влияние на стойкость к межкристаллитной коррозии, поэтому его содержание необходимо снизить до минимального уровня. Марганец не оказывает заметного влияния на свойства стали. Фосфор, сера и медь отрицательно влияют на свойства стали и СФФ и являются постоянными контролируемыми примесями.

Таблица 2. Химический состав в точках 1–5  
Table 2. Chemical composition at points 1–5

Номер спектра	Содержание элементов, масс. %								
	Fe	O	N	Mn	S	Cr	Ni	Ti	Al
1	22,13	-	13,70	-	-	8,09	2,12	53,97	-
2	30,62	-	17,02	0,97	-	10,28	3,57	37,54	-
3	34,98	-	-	-	11,93	14,09	2,64	35,71	0,64
4	28,38	11,54	8,52	0,96	-	8,77	3,26	34,10	4,46
5	35,79	14,77	-	1,16	-	11,44	4,06	14,62	18,17

Корреляционный анализ показывает, что механические свойства связаны с C, Si, Cr, Ni, Ti и Al. Поэтому они были выбраны в качестве независимых переменных при оптимизации химического состава стали.

Необходимо отметить, что из всех элементов химического состава стали 12Х18Н9ТЛ алюминий, единственный элемент, содержание которого не регламентируется ГОСТ. Алюминий применяется для раскисления стали и входит в состав некоторых ферросплавов: в ферротитане марки ФТи35С8 содержится до 14% алюминия, а в ферротитане марки ФТи25 до 25% (ГОСТ 4761-91).

На **рис. 1** приведены графические зависимости влияния соотношения содержания титана к алюминию на показатели механических свойств ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCV_{-60}$ ) и СФФ серийной стали 12Х18Н9ТЛ при использовании ферротитана марки ФТи35С8, из которого следует, что с уменьшением  $\text{Ti}/\text{Al}$  снижаются все показатели механических свойств за исключением предела текучести. Максимальный уровень механических свойств и минимальное СФФ наблюдается при  $\text{Ti}/\text{Al}=8,3$  ( $\text{Ti}=0,25\%$  и  $\text{Al}=0,04\%$ ). Резкое снижение механических свойств и увеличение СФФ наблюдается при  $\text{Ti}/\text{Al}=2,1$  ( $\text{Ti}=0,37\%$  и  $\text{Al}=0,18\%$ ). Поэтому при концентрации  $\text{Ti}=0,25\text{--}0,37\%$  и  $\text{Al}=0,04\text{--}0,18\%$ , как это видно из **рис. 1**, можно обеспечить удовлетворительное сочетание механических свойств и СФФ.

Такое влияние обусловлено тем, что алюминий и титан способствуют образованию неметаллических включений типа  $\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiS}$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , располагающихся в виде цепочек по границам зерен. Нитриды алюминия являются регуляторами аустенитного зерна и в определенных условиях приводят к появлению трещин в отливках [16].

На **рис. 2** представлены результаты металлографического исследования образца на растяжение из стали 12Х18Н9ТЛ, полученные при помощи оптического микроскопа Axio Observer.D1m, оснащенного анализатором изображения Thixomet. В **табл. 2** представлен анализ химического состава неметаллических включений в точках 1–5 (**рис. 2, а**), выполненный с использованием растрового электронного микроскопа Ultra 55, оборудованного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450X-xMAX. Повышенное содержание кислорода, азота, серы, титана и алюминия характерно для образования неметаллических включений типа  $\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiS}$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [1].

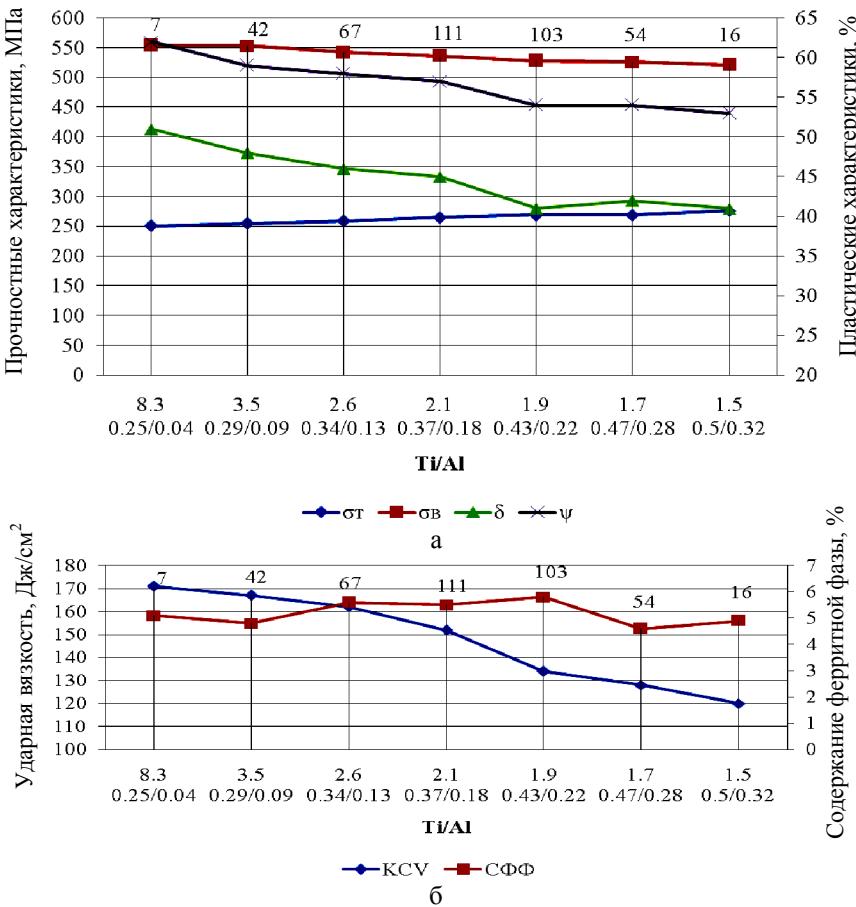


Рис. 1. Влияние соотношения содержания титана к алюминию на механические свойства и СФФ стали 12Х18Н9ТЛ при среднем содержании других элементов в пределах ГОСТ 977-88 (C=0,04–0,06; Si=0,74–0,78; Mn=1,21–1,46; P=0,023–0,028; S=0,007–0,008; Cr=17,86–18,04; Ni=8,32–8,72; Cu=0,12–0,14): (а – σ<sub>T</sub>, σ<sub>B</sub>, δ, ψ; б – KCV-60, СФФ). Температура стали перед заливкой 1590–1601°C. Цифры указывают количество плавок

Fig. 1. Influence of the titanium and aluminum ratio on the mechanical properties and the content of the ferritic phase of steel grade 12Kh18N9TL at an average content of other elements within GOST 977-88 (C=0.04–0.06; Si=0.74–0.78; Mn=1.21–1.46; P=0.023–0.028; S=0.007–0.008; Cr=17.86–18.04; Ni=8.32–8.72; Cu=0.12–0.14): (a is σ<sub>T</sub>, σ<sub>B</sub>, δ, ψ; б is KCV-60, content of the ferritic phase). Steel temperature before casting is 1590–1601°C. Figures show the number of heats

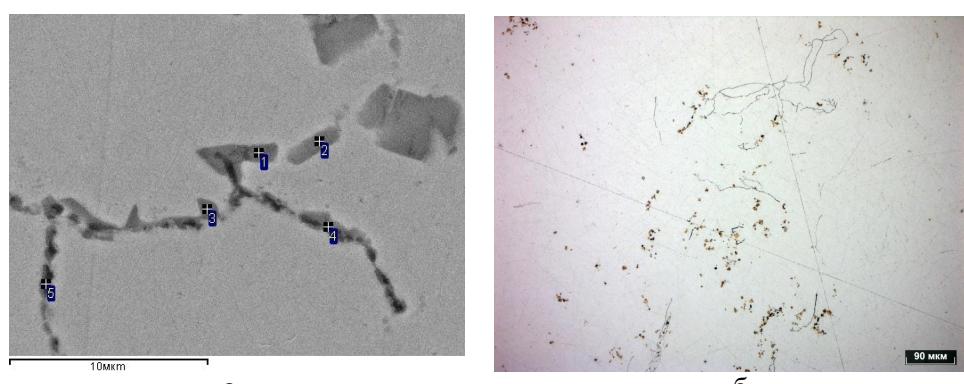


Рис. 2. Микроструктура стали 12Х18Н9ТЛ химического состава: C=0,05%; Si=0,62%; Mn=1,02%; P=0,020%; S=0,006%; Cr=19,1%; Ni=9,16%; Ti=0,50%; Al=0,27%; Cu=0,10%: а – увеличение 10 мкм; б – увеличение 90 мкм

Fig. 2. Microstructure of steel grade 12Kh18N9TL with the following chemical composition: C=0.05%; Si=0.62%; Mn=1.02%; P=0.020%; S=0.006%; Cr=19.1%; Ni=9.16%; Ti=0.50%; Al=0.27%; Cu=0.10%: а is magnified x10 μm; б is magnified x90 μm

Далее для совокупного влияния химических элементов на изменение показателей механических свойств и СФФ стали 12Х18Н9ТЛ был проведен множественный регрессионный анализ.

Методом множественного регрессионного анализа получены адекватные математические модели зависимости предела текучести, временного сопротивления, относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости и СФФ от их химического состава:

$$\begin{aligned} \sigma_t = & -30,421 + 105,693C + 24,522Si + 0,636Mn - \\ & - 138,862P + 767,502S + 16,719Cr - \\ & - 7,336Ni + 20,136Ti + 69,600Al + 74,650Cu; \\ R = 0,75; R^2 = 0,56; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_b = & 915,839 + 50,835C + 34,819Si - 12,844Mn - \\ & - 979,869P - 673,667S - 1,894Cr - 36,288Ni - \\ & - 38,004Ti - 69,578Al + 72,473Cu; \\ R = 0,59; R^2 = 0,35; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta = & 111,935 - 28,100C + 2,007Si - 2,117Mn + \\ & + 9,664P - 835,990S - 2,161Cr - 0,651Ni - \\ & - 26,179Ti - 12,142Al - 17,243Cu; \\ R = 0,42; R^2 = 0,17; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \psi = & 97,284 - 15,021C - 3,174Si - 1,261Mn + \\ & + 37,398P - 682,923S - 0,683Cr - 0,857Ni - \\ & - 39,543Ti + 6,606Al + 13,862Cu; \\ R = 0,31; R^2 = 0,09; \end{aligned} \quad (4)$$

Таблица 3. Параметры кругого восхождения по поверхности отклика  
Table 3. Parameters of steepest ascent on response surface

Наименование	Факторы										Отклик <i>y</i>
	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	<i>x</i> <sub>5</sub>	<i>x</i> <sub>6</sub>	<i>x</i> <sub>7</sub>	<i>x</i> <sub>8</sub>	<i>x</i> <sub>9</sub>	<i>x</i> <sub>10</sub>	
Основной уровень	0,065	0,8	1,54	0,0175	0,015	18,5	9,5	0,31	0,11	0,25	
Верхний уровень (+)	0,13	1	2,2	0,035	0,03	20,5	11,5	0,37	0,18	0,5	
Нижний уровень (-)	0	0,6	0,88	0	0	16,5	7,5	0,25	0,04	0	
Коэффициент <i>b</i> <sub><i>i</i></sub>	-33,406	-3,912	0,630	-67,334	-15,999	2,099	-1,918	5,004	2,956	86,835	
Интервал варьирования <i>e</i> <sub><i>i</i></sub>	0,065	0,2	0,66	0,0175	0,015	2	2	0,06	0,07	0,25	
<i>b</i> <sub><i>i</i></sub> · <i>e</i> <sub><i>i</i></sub>	-2,171	-0,782	0,416	-1,178	-0,240	4,199	-3,836	0,300	0,207	21,709	
Шаг <i>D</i> <sub><i>i</i></sub>	0,006	0,002	-0,001	0,003	0,001	-0,011	0,010	-0,001	-0,001	-0,057	
Округленный шаг	0,006	0,002	-0,001	0,003	0,001	-0,011	0,010	-0,001	-0,001	-0,057	
Мыслимый шаг 1	0,07	0,80	1,54	0,0175	0,005	18,49	9,51	0,31	0,11	0,19	9,42
Мыслимый шаг 2	0,08	0,80	1,54	0,0175	0,005	18,48	9,52	0,31	0,11	0,14	4,27
Мыслимый шаг 3	0,08	0,81	1,54	0,0175	0,005	18,47	9,53	0,31	0,11	0,08	-0,88
Реализованный опыт 1	0,05	0,76	1,36	0,017	0,007	17,34	8,22	0,33	0,14	0,09	3
Реализованный опыт 2	0,05	0,69	1,46	0,023	0,005	17,2	8,36	0,33	0,13	0,1	2
Реализованный опыт 3	0,06	0,91	1,35	0,021	0,009	17,16	8,41	0,29	0,11	0,12	2,31
Реализованный опыт 4	0,07	0,89	1,55	0,023	0,006	18,44	9,02	0,32	0,1	0,1	0,7
Реализованный опыт 5	0,05	0,63	1,22	0,021	0,006	16,93	8,86	0,22	0,1	0,11	4,06
Реализованный опыт 6	0,05	0,85	1,24	0,013	0,005	17,79	8,12	0,28	0,11	0,08	1,46
Реализованный опыт 7	0,06	0,66	1,17	0,022	0,007	17,47	7,9	0,27	0,06	0,12	6,1
Реализованный опыт 8	0,04	0,8	1,35	0,015	0,01	17,32	8,6	0,32	0,14	0,13	7

$$\begin{aligned} KCV_{-60} = & 230,55 - 669,20C - 14,34Si - \\ & - 14,05Mn + 1860,22P - 2703,12S - 1,63Cr + \\ & + 12,61Ni - 193,27Ti - 13,89Al - 347,73Cu; \\ R = 0,57; R^2 = 0,32; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} C\Phi\Phi = & -24,034 - 33,406C - 3,912Si - 0,630Mn - \\ & - 67,334P - 15,999S + 2,099Cr - 1,918Ni + \\ & + 5,004Ti + 2,956Al + 86,835Cu; \\ R = 0,59; R^2 = 0,34. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя полученную математическую зависимость (6), реализована программа кругого восхождения. В табл. 3 приведены результаты мыслимых и фактически реализованных опытов.

В табл. 4 приведены результаты механических свойств и содержания ферритной фазы реализованных опытов. Лучшие результаты, при которых обеспечиваются стабильное содержание ферритной фазы и высокий уровень механических свойств, в частности предел текучести, получены при 1, 3, 4 и 6 экспериментах. Величина параметра оптимизации нас удовлетворила и работа была закончена.

Осуществление программы кругого восхождения позволило определить интервал варьирования элементов химического состава стали 12Х18Н9ТЛ, отвечающий заданным требованиям (табл. 5).

Таким образом, выполненные исследования позволили установить оптимальные параметры химического состава, механических свойств и СФФ стали 12Х18Н9ТЛ для отливок трубопроводной арматуры.

Таблица 4. Механические свойства и СФФ реализованных опытов

Table 4. Mechanical properties and the content of the ferritic phase of the performed experiments

Номер опыта	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCV_{-60}$ , Дж/см <sup>2</sup>	СФФ, %
1	255	520	45	45	117	3
2	235	540	58	62	196	2
3	280	590	44	57	131	2,31
4	260	510	57	57	193	0,7
5	250	540	54	66	202	4,06
6	260	560	45	67	218	1,46
7	250	600	50	62	127	6,1
8	240	560	48	68	139	7

Таблица 5. Оптимизированный химический состав стали

Table 5. Optimized chemical composition of steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Al	Cu
0,05-0,07	0,76-0,91	1,24-1,55	0,013-0,023	0,005-0,009	17,16-18,44	8,12-9,02	0,28-0,33	0,10-0,14	0,08-0,12

Применение оптимизированного химического состава коррозионно-стойкой austenитной стали позволило повысить стабильность и уровень механических и эксплуатационных свойств отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры.

### Заключение

Проведен корреляционный анализ химического состава стали 12Х18Н9ТЛ. Наибольшее влияние на показатели механических свойств оказывают титан и алюминий.

Методом множественного регрессионного анализа получены уравнения множественной регрессии, позволяющие прогнозировать по заданному содержанию химических элементов уровень механических свойств и СФФ.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать следующий химический состав стали с наилучшей комбинацией механических свойств при минимальном СФФ (0,7–3,0%) для отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры: С = 0,05 – 0,07%; Si = 0,76 – 0,91%; Mn = 1,24 – 1,55%; P = 0,013 – 0,023%; S = 0,005 – 0,009%; Cr = 17,16 – 18,44%; Ni = 8,12 – 9,02%; Ti = 0,28 – 0,33%; Al = 0,10 – 0,14%; Cu = 0,08 – 0,12%.

Результаты проведенного исследования имеют большое практическое значение и могут быть рекомендованы предприятиям при изготовлении литьих деталей из нержавеющей стали 12Х18Н9ТЛ с повышенным пределом текучести и требуемым контролируемым содержанием ферритной фазы.

### Список литературы

- Влияние химического состава на механические свойства легированной стали / Луценко В.А., Голубенко Т.Н., Луценко О.В., Козачек А.С., Глазуно-

- ва Н.А. // Литье и металлургия. 2018. №1. С. 120–123.
- Рамазанов А.К., Ганеев А.А. Особенности литья корпусных деталей трубопроводной арматуры из коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н9ТЛ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №2. С. 22–29.
  - Нехенди Ю.А. Некоторые вопросы теории легирования специальных литьих высоколегированных сплавов // Литейное производство. №10. 1958. С. 23.
  - Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10,0 МПа. РД 38.13.004–86.
  - Васильевский П.Ф. Технология стального литья. М.: Машиностроение, 1974. 408 с.
  - СТ ЦКБА 005.3-2009. Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Ч. 3. Зарубежные материалы и их отечественные аналоги // ЗАО «НПФ «ЦКБА», 2009. 61с.
  - Mainak Saha. Study of Austenitic Stainless Steel Castings. Volume 14, Issue 3 Ver. III (May. - June. 2017), pp. 01–06.
  - Marcelo Aquino Martorano, Caio Fazzioli Tavares and Angelo Fernando Padilha. Predicting Delta Ferrite Content in Stainless Steel Castings. ISIJ International, vol. 52 (2012), no. 6, pp. 1054–1065.
  - Angelo Fernando Padilha; Caio Fazzioli Tavares; Marcelo Aquino Martorano. Delta Ferrite Formation in Austenitic Stainless Steel Castings. Materials Science Forum. Vol. 730–732 (2013), pp. 733–738.
  - Parrens C., Dupain J.-L., Malard B., Poquillon D. Aging effect on creep properties of type 310 austenitic stainless steel during isothermal and non-isothermal creep tests at 870°C. Experiments and modeling. Creep and Fracture of Engineering, pp.132–133 // Materials and Structures (Creep2017): Proceedings of the 14th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures. June 19–21, 2017. St. Petersburg: Polytechnical Publishing House. 2017. 170 p.
  - R. Prakash Kolli, Sarah Mburu, Daniel E. Pereira, Jia Liu, Samuel C. Schwarm, Arielle Eaton, Sreeramamurthy

- Ankem. Characterization of Element Partitioning at the Austenite/Ferrite Interface of as Cast CF-3 and CF-8 Duplex Stainless Steels. Microscopy and Microanalysis, vol. 21, Supplement S3: Proceedings of Microscopy & Microanalysis 2015, August 2015, pp. 365–366.
12. Боровиков В. *Statistica. Искусство анализа данных на компьютере*. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
13. Оюунцэг Ц., Батмунх Б., Мунхтуяа Ц. Исследование свойств литьевых нержавеющих сталей // Материалы VI Международной конференции «Проблемы механики современных машин» / М-во образования и науки Российской Федерации, Уханьский текстильный ун-т (КНР) [и др.; редкол.: В.С. Балбаров – отв. ред. и др.]. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015, Т. 2. С. 242–248.
14. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургия, 1967. 800 с.
15. Кремер М.А. Фасонное литье из нержавеющей и кислотостойкой стали. М., 1961. 74 с.
16. Регрессионный анализ качества сталей и сплавов / Ефимычев Ю.И., Михайлов С.К., Святкин Б.К., Прокhorov И.И. М.: Металлургия, 1976. 224 с.

### References

1. Lutsenko V.A., Golubenko T.N., Lutsenko O.V., Kozachek A.S., Glazunova N.A. The impact of chemical composition on mechanical properties of the alloyed steel. *Lityo i Metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2018, no. 1, pp. 120–123. (In Russ.)
2. Ramazanov A.K., Ganeev A.A. Features of casting pipeline valve body parts made of corrosion-resistant steel 12Kh18N9TL. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 2, pp. 22–29. (In Russ.)
3. Nekhendzi Yu. A. Some issues on the theory of alloying of special cast high alloys. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry], 1958, no. 10, p. 23. (In Russ.)
4. Guiding document RD 38.13.004-86. Operation and Repair of Process Pipelines Operating Under Pressure up to 10.0 MPa (100 kgf/square centimeter).
5. Vasilevsky P.F. *Tekhnologiya stalnogo litya* [Technology of steel castings]. Moscow: Mechanical engineering, 1974, 408 p. (In Russ.)
6. ST TsKBA 005.3-2009. Pipeline fittings. Metals used in production of fittings. Part 3. Foreign materials and their domestic equivalents. ZAO NPF TsKBA, 2009, 61 p.
7. Mainak Saha. Study of austenitic stainless steel castings. Volume 14, Issue 3 Ver. III (May - June 2017), pp. 01–06.
8. Marcelo Aquino Martorano, Caio Fazzioli Tavares and Angelo Fernando Padilha. Predicting delta ferrite content in stainless steel castings. *ISIJ International*, vol. 52 (2012), no. 6, pp. 1054–1065.
9. Angelo Fernando Padilha; Caio Fazzioli Tavares; Marcelo Aquino Martorano. Delta ferrite formation in austenitic stainless steel castings. *Materials Science Forum*, vols. 730–732 (2013), pp. 733–738.
10. Parrens C., Dupain J.-L., Malard B., Poquillon D. Aging effect on creep properties of type 310 austenitic stainless steel during isothermal and non-isothermal creep tests at 870°C. Experiments and modeling. *Creep and Fracture of Engineering*, pp.132–133. *Materials and Structures (Creep2017): Proceedings of the 14th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures*. June 19–21, 2017. St. Petersburg: Polytechnical Publishing House, 2017, 170 p.
11. R. Prakash Kolli, Sarah Mburu, Daniel E. Perea, Jia Liu, Samuel C. Schwarm, Arielle Eaton, Sreeramamurthy Ankem. Characterization of element partitioning at the austenite/ferrite interface of as cast CF-3 and CF-8 duplex stainless steels. *Microscopy and Microanalysis*, volume 21, supplement S3: Proceedings of Microscopy & Microanalysis 2015, August 2015, pp. 365–366.
12. Borovikov V. *Statistica. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere* [Statistica. The art on computer analysis of data]. Saint Petersburg: Piter, 2003, 688 p. (In Russ.)
13. Oyuntsetseg C., Batmunkh B., Munkhtuya C. The study of the properties of the casting stainless steels. *Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii Problemy mekhaniki sovremennykh mashin* [Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Conference *Issues on Mechanics of Modern Machines*], The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Wuhan Textile University (PRC). Ulan-Ude: Publishing Department of East Siberia State University of Technology and Management, 2015, vol. 2, pp. 242–248. (In Russ.)
14. Khimushin F.F. *Nerzhavayushchie stali* [Stainless steels]. Moscow: Metallurgy, 1967, 800 p. (In Russ.)
15. Kremer M.A. *Fasonnoe litiye iz nerzhavayushchey i kislotoystoykoy stali* [Shaped castings made of stainless and acid-resistant steel]. Moscow, 1961, 74 p. (In Russ.)
16. Efimychev Yu.I., Mikhailov S.K., Svyatkin B.K., Prokhorov I.I. *Regressionny analiz kachestva staley i splavov* [Regression analysis of the quality of steels and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1976, 224 p. (In Russ.)

Поступила 30.03.2021; принята к публикации 23.04.2021; опубликована 28.06.2021  
Submitted 30/03/2021; revised 23/04/2021; published 28/06/2021

**Ганеев Альмир Амирович** – доктор технических наук, профессор,  
Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.

**Рамазанов Азат Камилович** – заместитель начальника сталелитейного цеха,  
АО «Благовещенский арматурный завод», Благовещенск, Россия. Email: azat-ramazanov@yandex.ru

**Almir A. Ganeev** – DrSc (Eng.), professor  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

**Azat K. Ramazanov** – Deputy Head of the Steel Foundry Shop,  
JSC Blagoveshchensk Valves Plant, Blagoveshchensk, Russia. Email: azat-ramazanov@yandex.ru