

УДК 620

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 19ХГНМА

*Т.М. Пугачева, Д.И. Борисов*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Настоящая работа посвящена исследованию взаимосвязи химического состава и механических свойств стали 19ХГНМА. Объектом исследования были результаты входного контроля химического состава и механических свойств проката, поступавшего на ОАО «Волгабурмаш» на протяжении 2012-2014 гг. Было проанализировано 136 плавок производства ОАО МЗ «Ижсталь». Предметом исследования являлось определение влияния колебаний марочного состава на механические свойства стали 19ХГНМА методами корреляционно-регрессионного анализа. Установлена возможность применения с достаточной для производства точностью полученных в работе регрессионных уравнений с целью повышения экономичности входного контроля качества проката.*

**Ключевые слова:** сталь 19ХГНМА, химический состав, статистический анализ, корреляция, регрессия, описательная статистика, механические свойства.

Настоящая работа посвящена исследованию взаимосвязи химического состава и механических свойств стали 19ХГНМА в состоянии поставки.

Сталь 19ХГНМА изготавливают в виде горячекатаного калиброванного обточенного проката, который применяют для изготовления деталей горно-металлургического и нефтедобывающего оборудования [1], в частности для лап крупногабаритных трехшарошечных буровых долот [2, 3].

От структуры и химического состава стали напрямую зависят ее механические свойства, а значит, качество и работоспособность изготовленного из нее изделия.

Целью работы является исследование влияния колебаний марочного состава стали 19ХГНМА на ее механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость) методами корреляционно-регрессионного анализа.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выбраны методики проведения исследований.
2. Изучены изменения марочного состава плавок из стали 19ХГНМА.
3. Проанализированы реальные механические свойства стали 19ХГНМА.
4. Проведен корреляционный анализ «марочный состав – предел прочности», «марочный состав – предел текучести», «марочный состав – относительное удлинение», «марочный состав – относительное сужение», «марочный состав – ударная вязкость» и механических свойств между собой.
5. Построены соответствующие регрессионные уравнения.

---

*Татьяна Михайловна Пугачева (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».*

*Дмитрий Игоревич Борисов, аспирант.*

6. Проведена оценка пригодности полученных уравнений регрессии при входном контроле проката стали 19ХГНМА в ОАО «Волгабурмаш».

Объектом исследования были результаты входного контроля химического состава и механических свойств проката стали 19ХГНМА, поступавшего в ОАО «Волгабурмаш» на протяжении 2012-2014 гг. Было проанализировано 136 плавов производства ОАО МЗ «Ижсталь». Идентичность структуры обеспечивали выбором плавов одного завода изготовителя, все плавки которого делались по одной технологии на одном оборудовании.

Химический состав определяли на атомно-эмиссионном спектрометре SA-2000 фирмы Лесо. Механические свойства определяли на стандартных образцах по соответствующим ГОСТам.

Статистический анализ [4, 5] данных химического состава и механических характеристик проводили с помощью пакетов «Описательная статистика», «Корреляция», «Регрессия» программы Excel.

В табл. 1, 2 указаны требования технических условий к марочному составу и механическим свойствам стали 19ХГНМА.

Таблица 1

**Требования ТУ к марочному составу стали 19ХГНМА**

Химические элементы, %								
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
0,17–0,22	0,15–0,30	0,60–0,95	0,35–0,65	0,35–0,75	≤0,3	0,20–0,30	≤0,02	≤0,02

Таблица 2

**Требования ТУ к механическим свойствам стали 19ХГНМА**

Механические свойства (не менее)				
$\sigma_{0,2}$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, кГ·м/см <sup>2</sup>
75	83	12	45	8

Описательная статистика химического состава изученных плавов приведена в табл. 3, а механических свойств – в табл. 4.

Таблица 3

**Описательная статистика химических элементов**

Параметр	Химические элементы, %								
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
Среднее	0,20	0,27	0,80	0,59	0,55	0,16	0,26	0,01	0,01
Интервал	0,06	0,16	0,23	0,19	0,24	0,19	0,16	0,01	0,01
Минимум	0,17	0,19	0,72	0,50	0,45	0,06	0,21	0	0
Максимум	0,23	0,35	0,95	0,69	0,69	0,25	0,37	0,01	0,01
Коэффициент вариации	0,07	0,11	0,05	0,06	0,08	0,25	0,08	0,41	0,36

Как видно из табл. 3 и 4, для плавов ОАО МЗ «Ижсталь» характерны заметные размахи и коэффициенты вариации как значений механических свойств (особенно для ударной вязкости), так и содержания элементов марочного состава.

Для определения корреляционных связей «содержание компонента – механическая характеристика» вычислены коэффициенты парной корреляции (табл. 5).

Таблица 4

**Описательная статистика механических свойств**

Параметр	Механические свойства				
	$\sigma_{0,2}$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, кГ·м/см <sup>2</sup>
Среднее	78	92	17	55,	18
Интервал	21	22	9	17	16
Минимум	72	82	12	47	10
Максимум	93	104	21	64	26
Коэффициент вариации	0,04	0,04	0,09	0,06	0,17

Таблица 5

**Корреляционная матрица «содержание компонентов – механические характеристики»**

Механические свойства	Химические элементы								
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
$\sigma_{0,2}$ , кГ/мм <sup>2</sup>	0,11	<b>0,25</b>	<b>0,21</b>	<b>0,25</b>	<b>0,21</b>	0,05	0,08	0,05	-0,04
$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	0,14	<b>0,19</b>	<b>0,17</b>	<b>0,21</b>	0,13	0,10	<b>0,19</b>	-0,03	-0,04
$\delta$ , %	-0,03	<b>-0,20</b>	-0,14	-0,07	<b>-0,15</b>	-0,05	-0,10	-0,03	-0,01
$\Psi$ , %	0,06	0,06	<b>0,20</b>	0,10	0,06	<b>-0,18</b>	0,09	-0,03	0,01
КСУ, кГ·м/см <sup>2</sup>	<b>-0,51</b>	-0,11	-0,14	-0,08	-0,16	-0,04	0,09	<b>-0,23</b>	0,07

Жирным шрифтом в табл. 5 выделены статистически значимые коэффициенты. Наибольшая функциональная связь наблюдается между ударной вязкостью и содержанием углерода, более слабая – содержанием серы, а также между пределом текучести и содержанием кремния и хрома.

Далее были проанализированы функциональные зависимости между механическими свойствами (табл. 6).

Таблица 6

**Корреляционная матрица свойств**

Механические свойства	Механические свойства			
	$\sigma_{0,2}$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	<b>0,84</b>	1,00		
$\delta$ , %	<b>-0,61</b>	<b>-0,53</b>	1,00	
$\Psi$ , %	0,06	-0,04	0,04	1,00
КСУ, кГ·м/см <sup>2</sup>	<b>-0,27</b>	<b>-0,35</b>	<b>0,20</b>	0,01

Особенно сильную функциональную связь имеют предел прочности с пределом текучести, среднюю – относительное удлинение с пределом текучести и пределом прочности, наиболее слабую – между ударной вязкостью и пределом прочности, пределом текучести, относительным удлинением. Соответственно с

повышением предела прочности практически пропорционально будет увеличиваться предел текучести, а ударная вязкость и относительное удлинение будут снижаться. Относительное сужение не имеет линейной взаимосвязи с другими механическими характеристиками.

Для наглядности были построены поля рассеяния для наиболее значимых коэффициентов. Линии тренда показывают, что с повышением содержания углерода снижается ударная вязкость (рис. 1), а с повышением содержания кремния и хрома повышается предел текучести (рис. 2, 3).

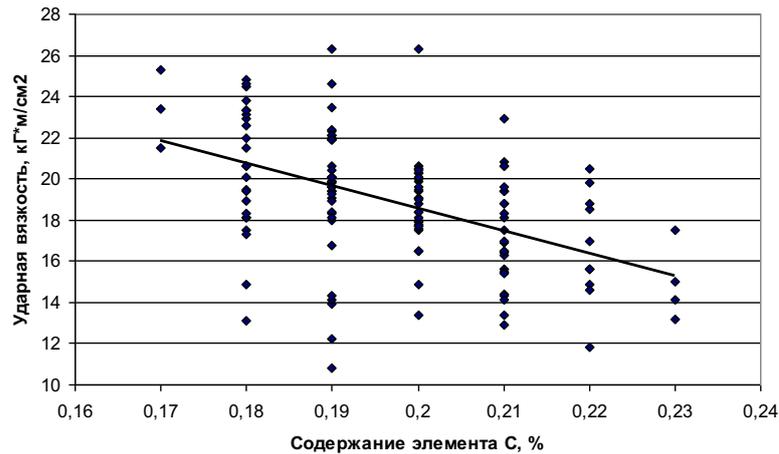


Рис. 1. Поле рассеяния «ударная вязкость – содержание углерода»

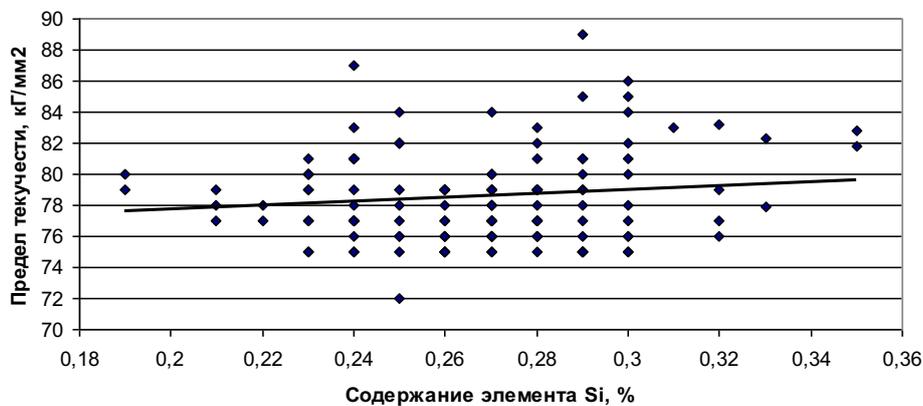


Рис. 2. Поле рассеяния «предел текучести – содержание кремния»

Анализ полей рассеяния для незначимых коэффициентов показал отсутствие явных нелинейных зависимостей между содержанием компонента и механической характеристикой. Типичное поле рассеяния для незначимых факторов показано на рис. 4.

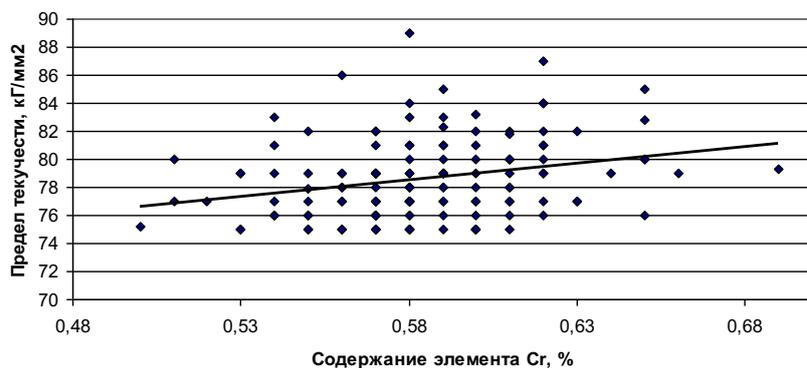


Рис. 3. Поле рассеяния «предел текучести – содержание хрома»

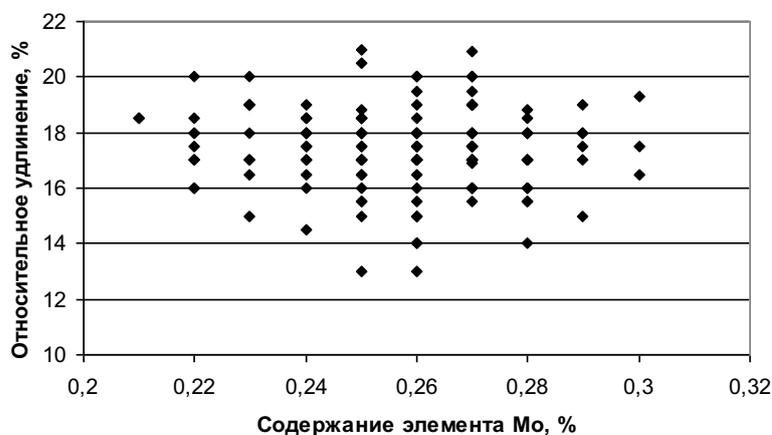


Рис. 4. Поле рассеяния «относительное удлинение – содержание молибдена»

Регрессионным анализом были вычислены коэффициенты регрессионных уравнений (табл. 7).

Таблица 7

#### Коэффициенты регрессии

Элемент марочного состава	Механические свойства				
	$\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, кг·м/см <sup>2</sup>
У-пересечение	39,3	44,7	27,9	35,6	42,8
C	-1,8	14,3	8,2	6,1	-105,8
Si	27,8	27,0	-11,4	7,9	-8,0
Mn	9,0	14,4	-4,1	20,3	5,3
Cr	20,2	16,9	0,0	-0,1	-1,2
Ni	13,6	5,0	-4,2	-2,6	-8,6
Cu	8,2	16,5	-1,3	-13,4	-8,6
Mo	18,3	44,5	-12,4	16,6	10,9
S	3,5	-118,5	-7,0	-99,5	-230,0
P	-14,2	-15,9	0,7	24,3	24,1

По результатам расчетов были составлены поэлементные уравнения регрессии, позволяющие делать прогнозы механических свойств с изменением марочного состава:

$$\sigma_{0,2} = 39,35 - 1,79 \cdot C + 27,79 \cdot Si + 8,98 \cdot Mn + 20,19 \cdot Cr + 13,55 \cdot Ni + 8,18 \cdot Cu + 18,32 \cdot Mo + 3,54 \cdot S - 14,19 \cdot P;$$

$$\sigma_B = 44,71 + 14,25 \cdot C + 27,02 \cdot Si + 14,38 \cdot Mn + 16,89 \cdot Cr + 5,03 \cdot Ni + 16,5 \cdot Cu + 44,5 \cdot Mo - 118,51 \cdot S - 15,91 \cdot P;$$

$$\delta = 27,87 + 8,22 \cdot C - 11,42 \cdot Si - 4,13 \cdot Mn - 0,03 \cdot Cr - 4,16 \cdot Ni - 1,26 \cdot Cu - 12,42 \cdot Mo - 7,04 \cdot S + 0,66 \cdot P;$$

$$\psi = 35,63 + 6,06 \cdot C + 7,9 \cdot Si + 20,35 \cdot Mn - 0,14 \cdot Cr - 2,59 \cdot Ni - 13,44 \cdot Cu + 16,65 \cdot Mo - 99,53 \cdot S + 24,34 \cdot P;$$

$$KCU = 42,85 - 105,81 \cdot C - 8,04 \cdot Si + 5,34 \cdot Mn - 1,19 \cdot Cr - 8,62 \cdot Ni - 8,63 \cdot Cu + 10,86 \cdot Mo - 229,95 \cdot S + 24,10 \cdot P.$$

Рассчитанные по приведенным выше уравнениям значения механических свойств были сопоставлены с экспериментальными данными входного контроля. Распределения остатков по разным механическим свойствам приведены на рис. 5-9. Как видно из гистограмм, подавляющее большинство остатков по всем механическим характеристикам попадает в достаточно узкий интервал варьирования около нуля.

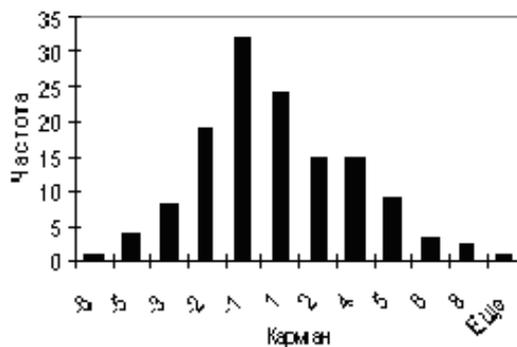


Рис. 5. Гистограмма остатков предела прочности

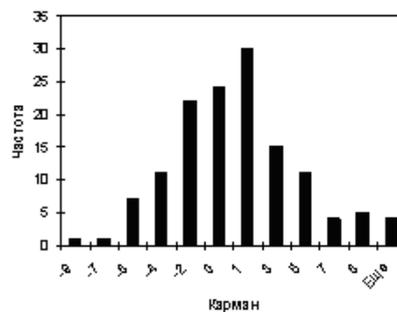


Рис. 6. Гистограмма остатков предела текучести

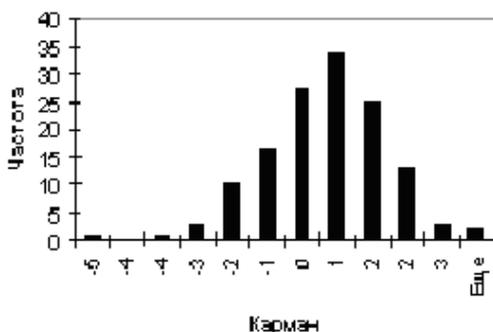


Рис. 7. Гистограмма остатков относительного сужения

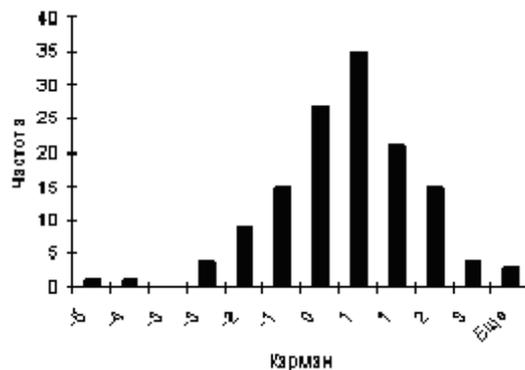


Рис. 8. Гистограмма остатков относительного удлинения

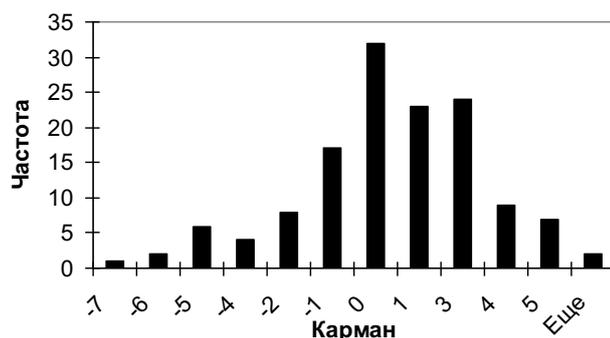


Рис. 9. Гистограмма остатков ударной вязкости

Для определения возможности применения полученных уравнений регрессии при входном контроле проката стали 19ХГНМА для оценки механических свойств были выбраны 10 дополнительных плавов производства ОАО МЗ «Иж-сталь». Описательная статистика химического состава (табл. 8) показала, что содержание элементов марочного состава находится внутри изученного интервала варьирования компонентов (см. табл. 1).

Таблица 8

**Описательная статистика химических элементов 10 проверочных плавов**

Параметр	Химические элементы, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	S	P
Среднее	0,20	0,25	0,78	0,60	0,53	0,13	0,27	0,01	0,01
Интервал	0,06	0,07	0,09	0,05	0,05	0,12	0,05	0,01	0,01
Минимум	0,17	0,21	0,73	0,58	0,50	0,08	0,24	0,00	0,00
Максимум	0,23	0,28	0,82	0,63	0,55	0,20	0,29	0,01	0,02

Таблица 9

**Остатки механических свойств 10 проверочных плавов**

№ плавки п/п	Механические свойства				
	$\sigma_{0,2}$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, кГ·м/см <sup>2</sup>
1	2	-1	-1	0	3
2	0	-1	0	-4	2
3	3	4	-3	-3	-2
4	1	1	0	3	-2
5	-3	-5	1	1	1
6	1	2	0	0	-1
7	3	3	-1	1	0
8	2	3	1	0	-3
9	0	2	-2	-2	-2
10	0	2	-2	-2	-2
Максимальный остаток	3	4	1	3	3
Минимальный остаток	-3	-5	-3	-4	-3

Рассчитанные по полученным уравнениям регрессии значения механических характеристик мало отличаются от соответствующих значений при натуральных испытаниях образцов во время входного контроля. Остатки даны в табл. 9.

Таким образом, с целью повышения экономичности входного контроля качества проката с достаточной для производства точностью возможно использование полученных уравнений регрессии для вычисления механических свойств стали 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь» по химическому составу плавки вместо проведения затратных механических испытаний образцов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://www.1bm.ru/> – Марочник металлов и сплавов.
2. Амосов А.П. Доловая сталь / А.П. Амосов, А.Г. Ицук, Т.М. Пугачёва. – М.: Машиностроение, 2008. – 291 с.
3. Долговечность шарошечных долот. – М.: Недра, 1992. – 266 с.
4. Мельниченко А.С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении: учебник / А.С. Мельниченко. – М.: МИСиС, 2009. – 266 с.
5. Козлов А.Ю. Статистические функции MS Excel в экономико-статистических расчетах: учеб. пособие для вузов / А.Ю. Козлов, В.С. Мхитарян, В.Ф. Шишов; под ред. проф. В.С. Мхитаряна. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 202 с.
6. Годин А.М. Статистика: учебник / А.М. Годин. – М.: Дашков и К, 2007. – 464 с.

*Статья поступила в редакцию 18 июня 2014 г.*

## STATISTIC ANALYSES OF CHEMICAL COMPOSITIONS AND MECHANICAL PROPERTIES OF 19HGNMA STEEL

***T.M. Pugacheva, D.I. Borisov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Objects of study are the results of the input control of the chemical composition and mechanical properties of rolled, coming in at JSC "VOLGABURMASH" during 2012-2014. Were analyzed the production of 136 batches of MH "Izhstal". The subject of the study was to determine the effects of fluctuations in grade composition on the mechanical properties of steel 19HGNMA with methods of regression analysis. The possibility to produce with sufficient accuracy in the application of the obtained regression equations for production in order to increase efficiency incoming quality control rolling.*

**Keywords:** *steel 19HGNMA, chemical composition statistical analysis, correlation, regression, descriptive statistics, mechanical properties*

---

*Tatiana M. Pugacheva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Dmitry I. Borisov, Postgraduate Student.*