

## РАСЧЕТ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ ДОЛОТНЫХ СТАЛЕЙ 14ХНЗМА, 15НЗМА И 19ХГНМА ПРОИЗВОДСТВА ОАО МЗ «ИЖСТАЛЬ»

*Т.М. Пугачева, Ю.В. Боровикова, Д.А. Михеев*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: esperanza@yandex.ru

*Для долотной стали марок 14ХНЗМА, 15НЗМА и 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь» проведен сравнительный анализ твердости после торцевой закалки на глубине 6,5 и 30 мм от поверхности стандартного образца с твердостью, рассчитанной по химическому составу в соответствии с ASTM A 255. Показана некорректность использования расчетных формул (по ASTM A 255) для этих сталей. Регрессионным анализом получены расчетные уравнения «твердость – элементы марочного состава», которые с достаточно высокой точностью предсказывают значения твердости на глубине 6,5 и 30 мм от поверхности стандартного образца и могут быть применены для анализа прокаливаемости этих сталей при входном контроле качества проката взамен используемого ныне метода торцевой закалки.*

**Ключевые слова:** прокаливаемость, долотные стали, химический состав, торцевая закалка, корреляционно-регрессионные уравнения.

Существующие методы определения прокаливаемости стали можно разделить на две группы: экспериментальные (объемной и торцевой закалки образцов; электромагнитный метод и т. д.) и расчетные (по диаграммам превращения аустенита, по химическому составу).

В отечественной промышленности наибольшее распространение имеет метод торцевой закалки образцов в соответствии с ГОСТ 5657-69. Именно этот метод используется и на заводе ОАО «Волгабурмаш» при входном контроле прокаливаемости проката из сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА, 19ХГНМА, предназначенного для изготовления лап и шарошек буровых долот [1].

В то же время на американских долотных заводах прокаливаемость оценивают расчетным методом по химическому составу стали. Американский стандарт ASTM A 255 регламентирует процедуру подсчета идеального критического диаметра (DI) по реальному содержанию элементов в плавке. Зная DI, по соответствующим таблицам можно рассчитать твердость на любом расстоянии от закаленного торца стандартного образца, не осуществляя торцевую закалку.

Каждому из методов присущи свои достоинства и недостатки. Основным достоинством метода торцевой закалки является определение прокаливаемости стали с учетом реального химического состава и структурного состояния металла, полученного предшествующим переделом. Недостатками являются трудоемкость осуществления метода, необходимость специального оборудования (высокотемпературной печи, отрезного и шлифовального станка, установки для закалки образцов и твердомера), а также заметный разброс прокаливаемости при использовании заготовок для

---

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

*Юлия Владимировна Боровикова, аспирант.*

*Дмитрий Алексеевич Михеев, магистрант.*

образцов из разных прутков одной плавки и даже из разных мест одного прутка, что связано с неоднородностью слитка и соответственно проката.

Достоинствами расчетного метода являются простота и экономическая эффективность. Недостатки – разброс значений из-за погрешностей определения химического состава, а также полное игнорирование особенностей структурного состояния, которое, как известно, может существенно влиять на прокаливаемость.

Целью работы было оценить возможность применения расчетного метода определения прокаливаемости по ASTM A 255 и при необходимости составить более точные уравнения регрессии для сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА, 19ХГНМА. Соответственно в работе были решены следующие задачи:

- 1) проведен сравнительный анализ прокаливаемости, рассчитанной по ASTM A 255 и определенной экспериментальным методом торцевой закалки;
- 2) проведен регрессионный анализ зависимости «химический состав плавки – твердость на нормируемой глубине» (6,5 и 30 мм);
- 3) дана оценка возможности использования при входном контроле качества проката полученных уравнений для прогнозного определения прокаливаемости сталей по фактическому химическому составу конкретной плавки взамен определения прокаливаемости на образцах методом торцевой закалки.

#### **Сравнительный анализ прокаливаемости, рассчитанной по ASTM A 255 и определенной методом торцевой закалки**

Для анализа были взяты данные ЦЗЛ ОАО «Волгабурмаш» по прокаливаемости и химическому составу для 140 плавков стали 14ХНЗМА, 150 плавков стали 15НЗМА и 250 плавков стали 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь». Размер зерна во всех плавках соответствовал 6-7-му номеру по ГОСТ 5639.

Химический состав плавков определяли с помощью поверхностного локального анализатора Лесо 2000.

Для определения прокаливаемости использовали метод торцевой закалки по ГОСТ 5657-69. Для определения прокаливаемости расчетным методом в соответствии с ASTM A 255 определяли критический диаметр. Зная критический диаметр и содержание углерода в стали, по соответствующим таблицам определяли твердость на глубине 6,5 и 30 мм.

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы MS Excel пакетом «Описательная статистика».

Исследование показало [2], что для сталей 14ХНЗМА и 15НЗМА экспериментальные значения твердости практически всегда выше расчетных, причем различия могут достигать 15-19 HRC. Причина может быть связана с тем, что в стали содержится примерно 3 % Ni, а расчет по ASTM A 255 применим для сталей с содержанием Ni до 1,0 %. Для стали 19ХГНМА усредненные экспериментальные значения твердости, дисперсия, размах подавляющего большинства плавков близки к расчетным. Так, на глубине 6,5 мм 68 % плавков, а на глубине 30 мм 83 % плавков имеют разницу расчетных и экспериментальных значений в пределах от -3 HRC до 3 HRC. Вместе с тем у ряда плавков разница значений достигает от 6 HRC до 10 HRC. Вероятно, это обусловлено существенными различиями структурного состояния проката отечественных и зарубежных сталей.

Соответственно рекомендуемая в ASTM A 255 методика расчета прокаливаемости по химическому составу неприемлема для плавков сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА, 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь».

**Расчет коэффициентов уравнений регрессии «химический состав плавки – твердость на нормируемой глубине» (6,5 и 30 мм)**

По тем же данным входного контроля ЦЗЛ ОАО «Волгабурмаш» были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии «химический состав плавки – твердость на нормируемой глубине». Для расчетов использовали пакет «Регрессия» программы Excel.

Средние и предельные значения количества элементов марочного состава изученных марок стали приведены в табл. 1.

Результаты статистической обработки значений твердости на нормируемых расстояниях приведены в табл. 2.

Коэффициенты уравнений регрессий представлены в табл. 3.

С использованием полученных коэффициентов были построены уравнения регрессии и проведены расчеты значений твердости на глубине 6,5 и 30 мм. Статистический анализ этих данных приведен в табл. 4.

Таблица 1

**Содержание компонентов в анализируемых плавках сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА и 19ХГНМА**

Марка стали	Содержание компонента	Количество компонента, %								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P
14ХНЗМА	Среднее	0,14	0,27	0,64	1,36	3,17	0,12	0,18	0,006	0,008
	Максимальное	0,17	0,35	0,78	1,6	3,48	0,15	0,25	0,02	0,02
	Минимальное	0,10	0,19	0,46	1,03	2,97	0,09	0,10	0,002	0,001
15НЗМА	Среднее	0,15	0,24	0,50	0,15	3,42	0,23	0,18	0,006	0,006
	Максимальное	0,17	0,31	0,67	0,30	3,90	0,27	0,24	0,07	0,014
	Минимальное	0,10	0,15	0,38	0,04	3,06	0,18	0,09	0,001	0,01
19ХГНМА	Среднее	0,19	0,27	0,80	0,56	0,53	0,24	0,17	0,006	0,011
	Максимальное	0,23	0,35	0,92	0,78	0,65	0,30	0,25	0,10	0,16
	Минимальное	0,17	0,19	0,70	0,42	0,37	0,14	0,008	0,002	0,004

Таблица 2

**Результаты статистической обработки значений твердости (HRC), определенных методом торцевой закалки**

Марка стали	14ХНЗМА		15НЗМА		19ХГНМА	
	6,5	30	6,5	30	6,5	30
Расстояние от закаленного торца, мм	6,5	30	6,5	30	6,5	30
Среднее	40,6	35,9	34,5	17,5	35,3	18,8
Стандартное отклонение	0,8	2,6	2,5	1,7	2,2	1,9
Дисперсия выборки	0,7	6,7	6,3	3,0	4,8	3,6
Экссесс	0,6	0,7	0,6	0,02	0,1	0,7
Интервал	3,5	10	10	7,5	8	9
Минимум	39,0	29	30	15,5	32	15
Максимум	42,5	39	40	23	40	24

Таблица 3

**Результаты регрессионного анализа «химический состав плавки – твердость на нормируемой глубине»**

Элемент марочного состава	Марка стали					
	14ХНЗМА		15НЗМА		19ХГНМА	
	Значения коэффициента уравнения регрессии для твердости $n$ на глубине, мм					
	6,5	30	6,5	30	6,5	30
	+36,3 %	+1,1 %	+10,2 %	+8,5 %	+4,7 %	+8,4 %
C	+33,8 %	+78,7 %	+72,6 %	+46,8 %	+57,0 %	+39,4 %
Si	+4,9 %	+10,8 %	+13,1 %	+14,7 %	-6,0 %	-10,1 %
Mn	+2,0 %	+22,7 %	+8,6 %	+5,6 %	+9,4 %	+10,5 %
Cr	-0,4 %	+1,1 %	+17,7 %	+13,16 %	+8,4 %	+6,7 %
Ni	-0,5 %	+1,6 %	+0,3 %	-3,0 %	+4,3 %	+1,3 %
Mo	-0,8 %	+2,5 %	-0,4 %	+11,0 %	+21,1 %	+29,7 %
Cu	-2,5 %	-4,2 %	+10,8 %	+8,1 %	+6,5 %	+8,2 %
S	+0,6 %	+24,2 %	+65,9 %	+40,4 %	-22,7 %	-10,7 %
P	-18,7 %	+34,6 %	+93,6 %	-16,8 %	-5,4 %	-29,3 %

Таблица 4

**Результаты статистической обработки значений твердости (HRC), определенных с помощью уравнений регрессии**

Марка стали	14ХНЗМА		15НЗМА		19ХГНМА	
	6,5	30	6,5	30	6,5	30
Расстояние от закаленного торца, мм						
Среднее	41	35	35	17	35	19
Стандартное отклонение	0,1	0,2	1,5	1,0	1,2	1,0
Дисперсия выборки	0,3	4,0	2,3	1,0	1,5	1,1
Интервал	3	8	8	5	5	5
Минимум	39	31	31	18	33	16
Максимум	42	39	39	23	38	21

Из табл. 4 видно, что распределение значений твердости для всех сталей близко к нормальному и что максимальные и минимальные значения твердости на всех глубинах не выходят за рамки действующих на ОАО «Волгабурмаш» ТУ 14-550-51-04 интервалов (табл. 5).

Сравнение с экспериментально полученными данными по методу торцевой закалки (см. табл. 2) показало, что практически все одноименные характеристики имеют близкие значения, при этом интервалы предельных значений твердости, расчи-

таных по уравнениям регрессии, немного меньше (на 2-3 HRC), чем полученные методом торцевой закалки.

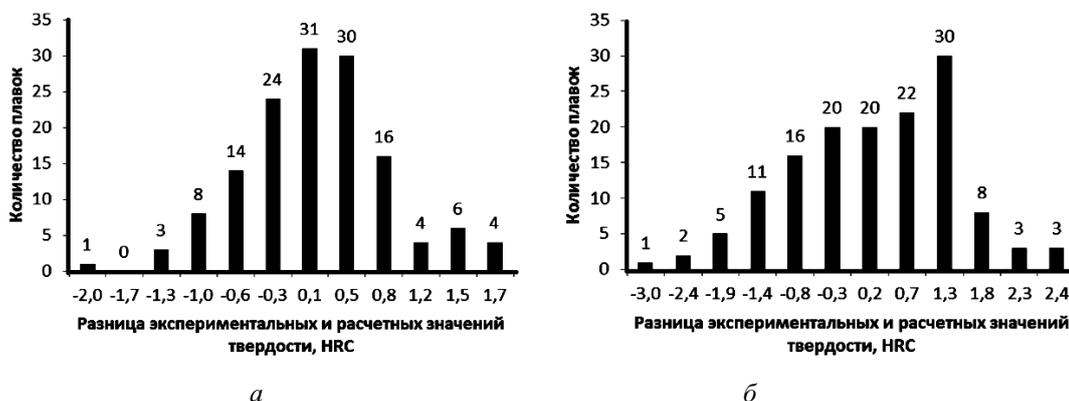
Таблица 5

Прокаливаемость сталей по ТУ 14-550-51-04

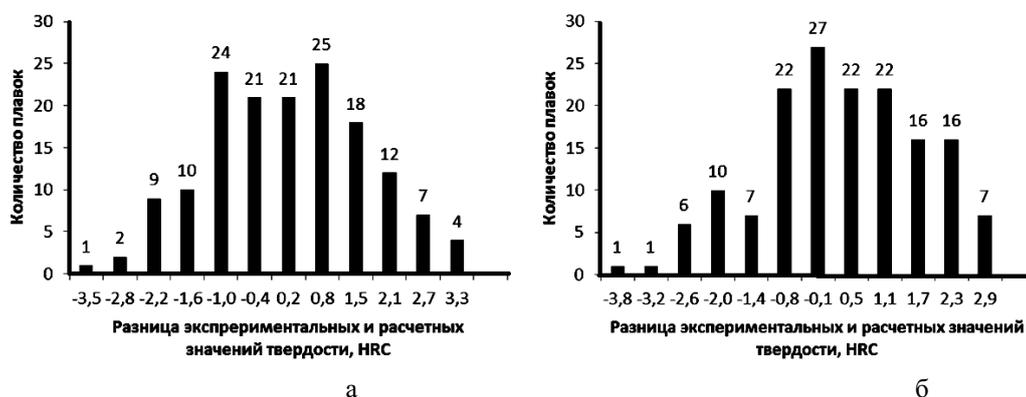
Марка стали	Твердость HRC на расстоянии от торца, мм	
	6,5	30
14ХНЗМА	39-45	29-39
15НЗМА	30-40	23
19ХГНМА	33-42	24

Для анализа отклонений расчетной твердости от экспериментальных данных были построены гистограммы (рис. 1 – 3). Их анализ показал следующее.

Для всех марок сталей разница расчетных и экспериментальных значений колеблется как в положительную, так и в отрицательную сторону.



Р и с. 1. Гистограммы распределения разницы экспериментальных и расчетных значений твердости, полученных с помощью уравнений регрессии для стали 14ХНЗМА: а – на расстоянии 6,5 мм; б – на расстоянии 30 мм

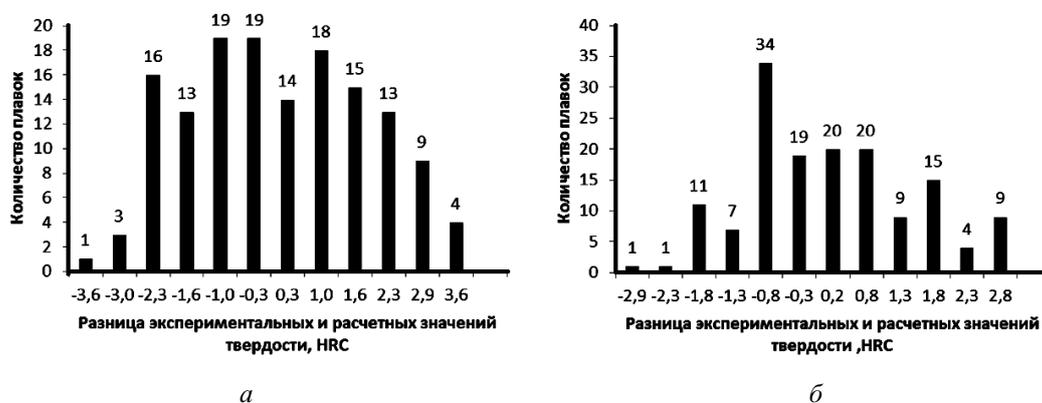


Р и с. 2. Гистограммы распределения разницы экспериментальных и расчетных значений твердости, полученных с помощью уравнений регрессии для стали 15НЗМА: а – на расстоянии 6,5 мм; б – на расстоянии 30 мм

Для марки стали 14ХНЗМА расчет по уравнениям регрессии показал довольно хорошие результаты. Экспериментальные значения близки к расчетным: на глубине 6,5 мм разница экспериментальных значений не превышает  $\pm 2,0$  HRC, а на глубине 30 мм 94 % всех плавок имеют разницу расчетных и экспериментальных значений не более  $\pm 2,0$  HRC (рис. 1а, 1б).

Для марки стали 15НЗМА разница расчетных и экспериментальных значений также невелика и составляет не более  $\pm 2,3$  HRC для 88 % плавок на глубине 6,5 мм и для 93 % плавок на глубине 30 мм (рис. 2а, 2б).

Для марки стали 19ХГНМА разница расчетных и экспериментальных значений не превышает  $\pm 2,3$  HRC для 92 % плавок на глубине 6,5 мм и для 90 % плавок на глубине 30 мм (рис. 3а, 3б).



Р и с. 3. Гистограммы распределения разницы экспериментальных и расчетных значений твердости, полученных с помощью уравнений регрессии для стали 19ХГНМА:  
*а* – на расстоянии 6,5 мм; *б* – на расстоянии 30 мм

Таблица 6

**Результаты статистической обработки значений новых плавок, не использованных в расчетах**

Марка стали	14ХНЗМА		15НЗМА		19ХГНМА	
Количество плавок	30		15		20	
Расстояние от закаленного торца, мм	6,5	30	6,5	30	6,5	30
Минимальное и максимальное значения твердости (HRC), определенные методом торцевой закалки	39-42,5	34-39	32-36	17-19	33-37	19-22
Минимальное и максимальное значение твердости (HRC), определенные с помощью уравнений регрессии	40-42	34-39	33-36	17-19	34-37	18-20
Разница экспериментальных и расчетных значений твердости (HRC)	-1,0-0,7	-1,2-1,4	-1,3-1,5	-2,0-1,2	-1,7-1,2	-0,8-2,7

Из вышесказанного следует, что построенные уравнения регрессии «химический состав плавки – твердость на нормируемой глубине» дают хорошие результаты и их можно использовать для предсказаний твердости долотной стали.

Для проверки применимости полученных расчетных уравнений были рассчитаны значения твердости для 65 новых плавков (табл. 6), которые не учитывались в проведенных расчетах. Затем было проведено сравнение расчетных величин с данными торцевой закалки, которую проводили при входном контроле прокаливаемости проката из сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА и 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь» в ЦЗЛ ОАО «Волгабурмаш» в 2011 г. Полученные данные представлены в табл. 6.

Из таблицы видно, что расчетные значения твердости для всех марок сталей и на всех глубинах соответствуют допускам ТУ 14-550-51-04 (см. табл. 5) и дают довольно хорошие результаты: разница предсказанных и реальных значений твердости практически для всех плавков находится в пределах допустимого разброса.

### **Выводы**

1. Регламентированный в американских требованиях к долотным сталям расчетный метод определения прокаливаемости по ASTM A 255 по реальному химическому составу плавки для отечественных долотных сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА и 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь» дает недопустимо большой разброс результатов и не может быть применен в производстве для прогнозного определения твердости.
2. Для прогнозного определения твердости на расстоянии 6,5 и 30 мм по фактическому химическому составу конкретной плавки сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА и 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь» (химический состав которых не выходит за границы значений, приведенных в табл. 1) с высокой степенью точности можно использовать полученные в настоящей работе уравнения регрессии.
3. При входном контроле прокаливаемости проката сталей марок 14ХНЗМА, 15НЗМА и 19ХГНМА производства ОАО МЗ «Ижсталь» (химический состав которых не выходит за границы значений, приведенных в табл. 1) вместо определения прокаливаемости на образцах методом торцевой закалки можно рекомендовать менее трудоемкий расчетный метод с использованием полученных уравнений.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Амосов А.П., Ищук А.Г., Пугачева Т.М.* Долотная сталь. – М.: Машиностроение, 2008. – 291 с.
2. *Пугачева Т.М., Боровикова Ю.В.* Анализ применимости расчетного определения прокаливаемости по ASTM A 255 для долотной стали отечественного производства // *Высокие технологии в машиностроении: Мат-лы Всеросс. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием.* – Самара, СамГТУ, 2011. – С. 152-155.

*Статья поступила в редакцию 17 апреля 2013 г.*

## HARDENABILITY CALCULATION FOR 14XH3MA, 15H3MA, 19XГMA BIT STEELS PRODUCED BY OJSC «IZHESTAL»

***T.M. Pugacheva, Y.V. Borovikova, D.A. Miheev***

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

*This paper contains comparative analysis of hardenability of end quenching test and values calculated by chemical composition in accordance with ASTM A 255. Hardenability estimates by hardness on 6.5 mm and 30 mm depth from standard sample surface. Analytic formulas (ASTM A 255) are shown to be not applicable for these steels. Analytic equations «Hardness - Chemical composition» which predict hardness on 6.5 and 30 mm depth from standard sample surface with quite high accuracy were determined by regression analysis. These equations can be used for hardenability analysis of these steels if the input control of rolled metal quality instead of currently used hard gradient quenching method.*

***Keywords:*** *hardness penetration, bit steels, chemical composition, gradient quenching, correlation-regressive equations.*

---

*Taiana M. Pugacheva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Yulia V. Borovikova, Postgraduate student.  
Dmitry A. Miheev, Student.*