

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТА «ГАЗОВЫЙ ПУЗЫРЬ» В ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

*Сарычев А.Ф., Мещеров С.В., Юречко Д.В., Горосткин С.В.,
Носов А.Д., Катцан Ф.В., Валиахметов А.Х.*

Производство трансформаторной стали в ККЦ ОАО «ММК» начато в 1996 г. В настоящее время сортамент выплавляемой трансформаторной стали насчитывает пять марок с химическим составом, определяемым требованиями технического протокола ТП 14-101-382-01 «Прокат горячекатаный из электротехнической стали» (табл.1). Технология выплавки, внепечной обработки, а также способы азотирования трансформаторной стали описаны в статье /1/.

Таблица 1

Требования к химическому составу трансформаторной стали

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Cu	Al	N
0401Д	0,022	2,90	0,10	н е б о л е е					0,40	0,011	0,009
	0,040	3,30	0,25	0,023	0,025	0,30	0,30	0,007	0,55	0,016	0,013
0402Д	0,022	2,90	0,10	н е б о л е е					0,40	0,010	0,008
	0,045	3,30	0,25	0,023	0,025	0,30	0,30	0,008	0,55	0,017	0,013
0403Д	0,022	2,90	0,10	н е б о л е е					0,40	0,009	0,007
	0,050	3,40	0,25	0,023	0,025	0,30	0,30	0,010	0,65	0,019	0,013
0404Д	0,025	2,90	0,10	н е б о л е е					0,40	0,020	0,006
	0,045	3,30	0,25	0,020	0,025	0,30	0,30	-	0,60	0,030	0,012
0405Д	н.б.	2,60	0,10	н е б о л е е					0,20	0,006	0,005
	0,050	3,30	0,30	0,025	0,025	0,30	0,30	0,010	0,70	0,030	0,012

Опыт производства трансформаторной стали в ККЦ ОАО «ММК» выявил ее повышенную склонность к образованию дефекта «газовый пузырь» в процессе непрерывной разливки.

С целью выявления степени влияния технологических факторов на образование газовых пузырей в непрерывно-литом слитке трансформаторной стали проведен статистический анализ. Для анализа сформирован массив из 276 плавок. В качестве технологических факторов, влияющих на наличие газовых пузырей, в массиве представлены:

1. Содержание азота в ковшевой пробе (N₂);
2. Содержание алюминия в ковшевой пробе (Al);
3. Содержание азота в готовом слябе (N₂_S);
4. Температура начала внепечной обработки (АДС или вакууматор) (Т1);
5. Температура конца внепечной обработки (АДС или вакууматор) (Т2);

6. Температура стали в промежуточном ковше (Т3);
7. Коэффициент циркуляции в вакууматоре (Кц);

В качестве зависимых переменных в массиве представлены:

1. Размер газового пузыря в баллах (Балл);
2. Признак наличия газового пузыря в слябе (Да/Нет)

Матрица парных корреляций перечисленных параметров, полученная проведением множественной регрессии, представлена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица парных корреляций

	N ₂	Al	N ₂ S	T1	T2	T3	Кц	Балл	Да/Нет
N ₂	1.00								
Al	-0.10	1.00							
N ₂ S	0.31	-0.03	1.00						
T1	0.03	-0.06	-0.06	1.00					
T2	-0.16	-0.02	-0.03	0.02	1.00				
T3	-0.03	-0.05	0.04	0.15	0.22	1.00			
Кц	-0.04	-0.12	0.04	0.10	-0.05	0.20	1.00		
Балл	0.28	-0.03	0.46	0.12	-0.01	0.03	0.01	1.00	
Да/Нет	0.24	-0.07	0.48	0.09	-0.06	-0.02	0.03	0.77	1.00

Анализ коэффициентов парной корреляции между столбцами массива показывает наличие влияния на образование и размер газовых пузырей в слябах только содержания азота в стали. Причем, зависимость газовых пузырей от содержания азота в слябах проявляется лучше, чем от содержания азота в ковшевой пробе. Отсутствие зависимости газовых пузырей от остальных параметров может объясняться либо плохим качеством исходной информации, либо недостаточной полнотой представленных в анализе технологических факторов.

На рис.1 и 2 представлены гистограмма распределения и характер зависимости размера газового пузыря в слябе от содержания в нем азота. На рис.3 и 4 представлены гистограмма распределения и характер зависимости факта наличия газового пузыря в слябе от содержания в нем азота. Из рисунков видно, что с ростом содержания азота в готовом слябе растет вероятность образования и размер образующихся газовых пузырей.

Зависимость содержания азота в слябе от содержания азота в ковшевой пробе проявляется очень слабо (Рис.5). Можно отметить некоторый прирост содержания азота в слябах относительно содержания азота в ковшевой пробе.

Распределение величины газового пузыря в зависимости от содержания азота в сляках

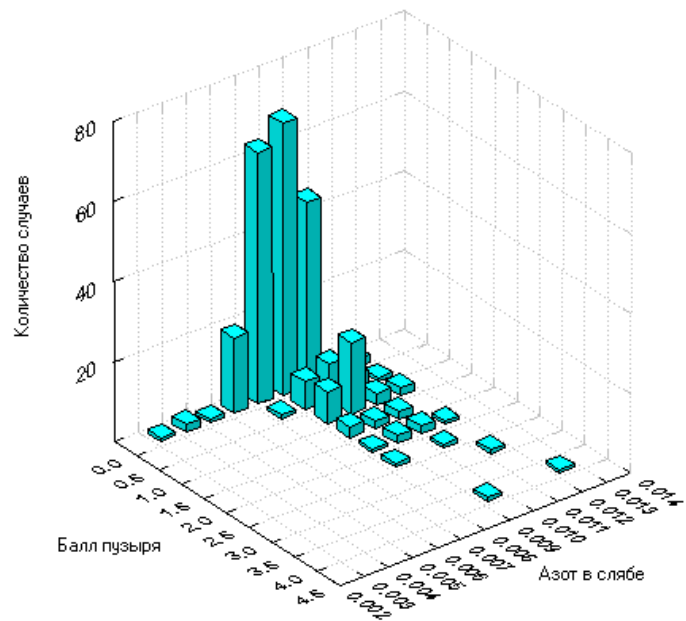


Рис.1.

Наличие газового пузыря в зависимости от содержания азота в сляках

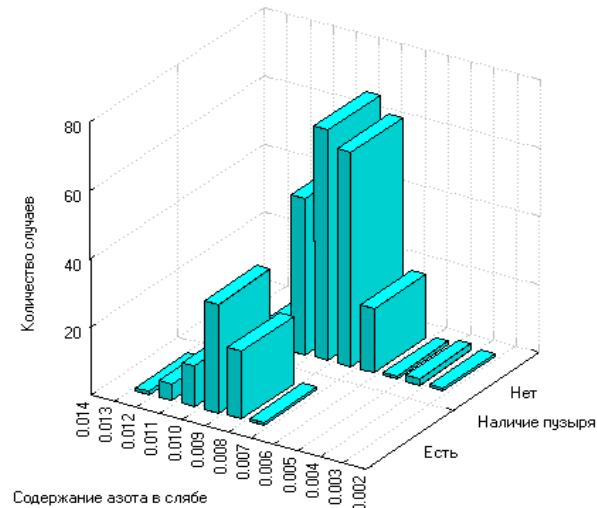


Рис.3.

Зависимость размера газового пузыря от содержания азота в сляке ($r = 0.43$)

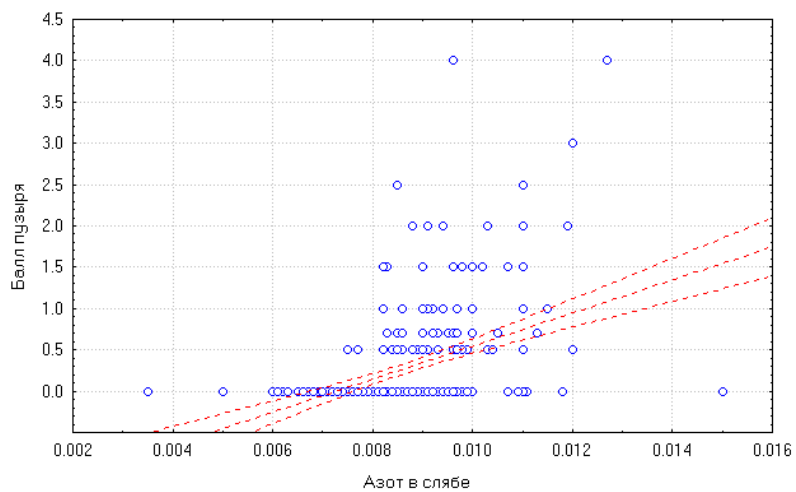


Рис.2.

Наличие газового пузыря в зависимости от содержания азота в сляке ($r = 0.44$)

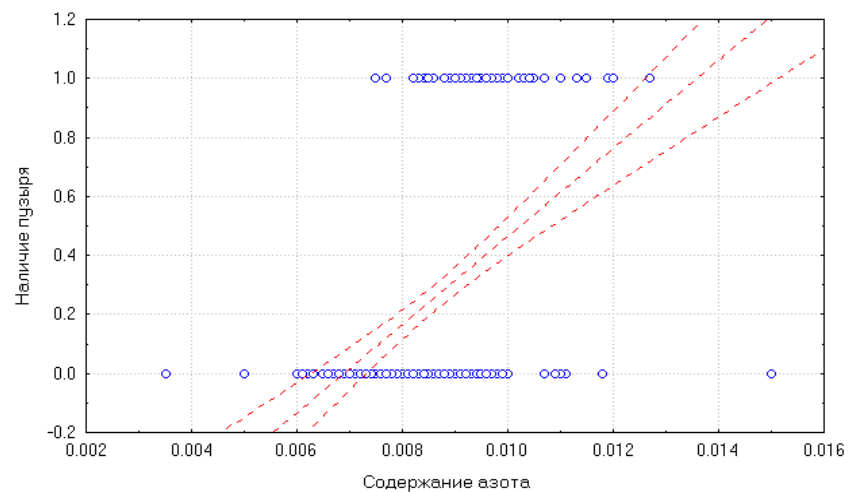


Рис.4.

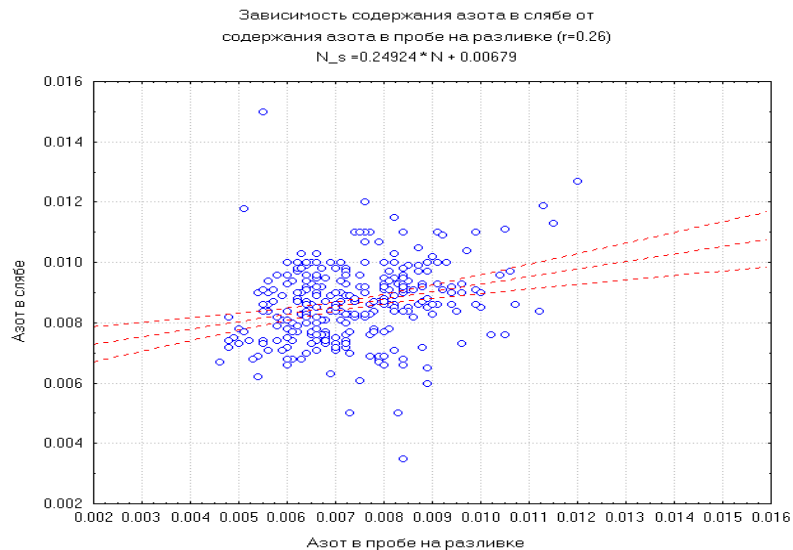


Рис.5.

С целью проверки результатов статистического анализа был повторно сформирован массив, включающий химический состав 391 плавки трансформаторной стали производства 2003 г. и балл газовой пузырей, обнаруженных при контроле качества слябов соответствующих плавки.

В табл. 4. Приведены коэффициенты парных корреляций размера газового пузыря от содержания химических элементов в стали.

Таблица 4

Значения коэффициентов парной корреляции (массив 2003 г.)

	C	Si	Mn	S	P	Al	N ₂	N ₂ в слябе
R	0.07	0.16	0.06	0.07	0.02	0	0.04	0.48

Коэффициенты корреляции, приведенные в табл.4 подтверждают вывод о наличии статистически значимой взаимосвязи размера газового пузыря только от содержания азота в слябах трансформаторной стали. На рис.6 и 7 представлены гистограмма распределения и характер зависимо-

сти размера газового пузыря в слябе от содержания в нем азота по материалам 2003 г.

Распределение величины газового пузыря в зависимости
от содержания азота в слябе
массив 2003 г.

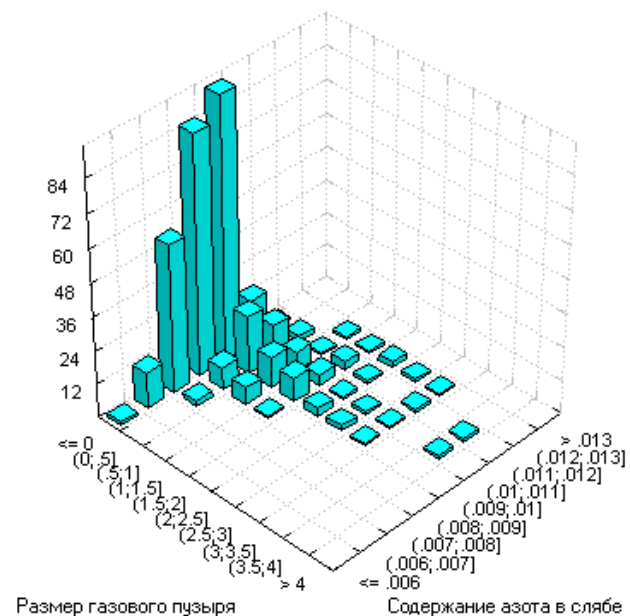
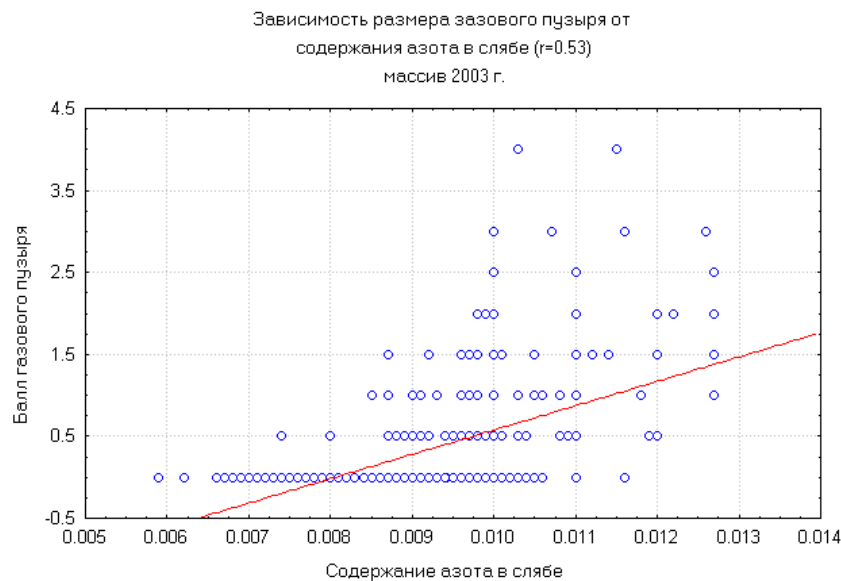


Рис.6.



Как видно из табл.1., содержание азота в электротехнических сталях превышает величину, характерную для обычного конвертерного металла (0,005...0,008 %). Следовательно, одной из проблем, возникающих при производстве трансформаторной стали, является насыщение металла дополнительными количествами азота. Проблема усугубляется высоким содержанием кремния (2,90...3,30 %), что существенно уменьшает растворимость азота в железе. Так, при достаточно низком содержании алюминия в трансформаторных сталях, твердая фаза формирующейся непрерывнолитой заготовки может усвоить не более 0,010 % азота [2]. Помимо снижения растворимости азота, высокое содержание кремния понижает и растворимость водорода. Наличие в кристаллизующейся стали большого количества несвязанного азота и водорода способствует образованию газовых пузырей, которые при прокатке приводят к рванинам и волосовинам. Отдельные не заварившиеся газовые пузыри можно обнаружить в горячекатаном листе.

Наличие в слитке газовых пузырей объясняет и повышенную склонность данного вида стали к подвисанию корочки слитка в кристаллизаторе и прорывам металла. Прорыв оболочки слитка происходит на расстоянии $5...40 \times 10^{-3}$ м от уровня металла в кристаллизаторе и обусловлен сопротивлением вытягиванию. Беспрепятственное скольжение или разрыв оболочки слитка определяется соотношением силы трения F_t и сил, разрывающих оболочку F_p . При этом скольжение будет обеспечено

при условии $F_t < F_p$, а разрыв оболочки $F_t > F_p$. Немаловажную роль здесь играет прочность заготовки [4], которая ослаблена наличием газовых пузырей в теле непрерывнолитого слитка, нарушающих сплошность металла. Таким образом, при разливке трансформаторной стали мы сталкиваемся с металлом, имеющим повышенную силу трения корочки слитка о медные стенки кристаллизатора и пониженную прочность затвердевающей корочки заготовки. Это повышает вероятность прорыва корочки непрерывно-литого слитка и увеличивает аварийность при разливке трансформаторной стали.

Сравнительный анализ количества прорывов корочки слитка под кристаллизатором на обычных и трансформаторных сталях за 1997-2000 г представлен в табл.2.

Таблица 2

Показатель	Год			
	1997	1998	1999	2000
Производство трансформаторной стали, пл./т	146/ 51018	77/ 27059	150/ 53237	403/ 142174
Прорывы, шт./1000 пл.:				
- всего	2,90	1,40	2,08	1,16
- на трансформаторных сталях	61,64	51,95	60,0	19,85

Для уменьшения вероятности подвисаний и прорывов проводятся работы, направленные на уменьшение трения формирующейся оболочки непрерывнолитого слитка о медные стенки кристаллизатора. При этом учитывалось, что при разливке данного типа сталей в шлак кристаллизатора поступает значительное количество оксидов магния в результате размывания огнеупоров и оксида кремния, оставшегося в металле после внепечной обработки и в результате вторичного окисления. Одновременно из шлака происходит удаление фтора. Эти факторы приводят к ухудшению смазывающей способности шлака [5]. Для обеспечения необходимой вязкости шлака определено, что содержание фтора в смеси должно быть в пределах 7...9 % при ее основности 1,0...1,2 вместо действующих значений 6...9 % и 0,8...1,2 [6]. В настоящее время шлакообразующая смесь, используемая для разливки трансформаторных сталей, содержит 8...10 % фтора, имеет основность 0,9...1,2 и влажность не более 0,4 %. Для ускорения процесса плавления гранулированной шлакообразующей смеси в кристаллизаторе увеличено содержание щелочных элементов в ее составе, а также повышена температура разливки стали со средним перегревом до 30...50 °C над температурой ликвидус.

Для увеличения толщины затвердевшей корочки стали на выходе из кристаллизатора и, как следствие, прочности заготовки скорость разливки снижена до минимально возможного значения. Определено влия-

ние хода кристаллизатора на способность к «залечиванию» микротрещин слитка по следам качания, образующимся при вытягивании заготовки.

Все эти работы позволили существенно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций на машинах непрерывной разливки стали при производстве трансформаторной стали.

Список использованной литературы

1. Мошкевич Е.И. Разливка высококачественной стали. М.: Metallurgizdat, 1963.
2. Болдаев Б.Я., Шурыгин А.В., Гавриленко Ю.В., Громов Г.И. и Зверкова Г.В. Производство коррозионностойкой стали с разливкой на МНЛЗ. Сталь № 9, 1989.
3. Фертер Э., Гуденау Х.В., Кемпер Г.М., Штеркен К. Трение между заготовкой и кристаллизатором при разливке стали на МНЛЗ. Черные металлы, № 2, 1994.
4. Браннон Р.Ф. Флюсы для подачи в кристаллизатор при непрерывной разливке. Шлакообразующие смеси для кристаллизатора, опубликованные обществом Iron and Steel Society.
5. Гречишный В.В., Моренко В.А., Носов А.Д., Ногтев В.П. Шлакообразующая смесь для разливки трансформаторной стали. Совершенствование технологии на ОАО «ММК», выпуск № 1.

