УДК 669.14.018.8:669.112.227.1

О.К. Токовой[1], *Д.В. Шабуров*[2]

[1] Южно-Уральский государственный университет
[2] ОАО «Челябинский металлургический комбинат»

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА «КОРЖ» В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И МЕРАХ ПО ЕГО УМЕНЬШЕНИЮ. СООБЩЕНИЕ 2

Аннотация. Выполнены расчеты массы нитридов титана, образующихся в аустенитной стали в интервале концентраций титана 0,1 – 0,7 % и при охлаждении металла от 1525 до 1456 °С. Показано, что 61 – 63 % общей массы нитридов титаны выделяется в промежуточном ковше и 37 – 39 % – в кристаллизаторе, образуя грубые дефекты в виде «коржей». Снижение температуры аустенитной стали в промежуточном ковше на 10 °С позволяет перераспределить массу выделяющихся из стали нитридов титана и уменьшить массу «коржей» в кристаллизоторе на 14 – 15 %.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, непрерывная разливка стали, нитриды титана, промежуточный ковш, кристаллизатор, «коржи».

ON THE MECHANISM OF FORMATION OF «CAKE» DEFECT IN CONTINUOSLY CAST AUSTENITIC STAINLESS STEEL AND MEASURES TO REDUCE ITS. REPORT 2

Abstract. The calculations of the mass of titanium nitride formed in the austenitic steel in the range of concentrations of titanium 0,1 – 0,7 % and the metal from 1525 to 1456 °C. It is shown that 61 – 63 % of the total weight of titanium nitride is formed in the tundish ladle and a 37 – 39 % – in the mold to form coarse defects such as “cakes”. Lowering the temperature of austenitic steel in the tundish ladle by 10 °C can redistribute the mass of titanium nitride released in steel downsize “cakes” in the mold by 14 – 15 %.

Keywords: austenitic stainless steel, continuous casted steel, titanium nitride, the tundish ladle, crystallizer, “cakes”.

В процессе непрерывной разливки аустенитной нержавеющей стали Х18Н10Т в кристаллизаторе образуется конгломерат металла и шлака, который является основным дефектом листа из этого металла. В работе [1] выполнено электронномироскопическое исследование этого образования, формирующего дефект, который принято называть «корж». Ниже на основании этого исследования и выполненных расчетов предложен механизм образования этого дефекта и меры по его уменьшению.

Известно [2], что азот в металле находится как в растворенном виде (раствор внедрения), так и в связанном – в виде соединений азота (оксидов, нитридов или карбонитридов). При раскислении аустенитной нержавеющей стали Х18Н10Т после введения в металл титана последний связывает избыточный азот в неметаллическую фазу (нитриды или карбонитриды), которые в значительной степени удаляются из жидкой стали во время продувки инертным газом в сталеразливочном ковше. В жидкой стали остается заданное содержание растворенного титана и равновесное с ним содержание растворенного азота.

В табл. 1 приведены рассчитанные по данным работы [3] равновесные содержания азота в жидкой стали с растворенным титаном при разных температурах

Таблица 1

Равновесное с титаном содержание азота в нержавеющей стали

Ti, % (по массе)	Температура металла, °С			
	1525	1490	1480	1456
0,7	0,00542	0,00359	0,00317	0,00247
0,6	0,00633	0,00418	0,00370	0,00288
0,5	0,00760	0,00502	0,00444	0,00326
0,4	0,00950	0,00627	0,00555	0,00433
0,3	0,01267	0,00837	0,00740	0,00577
0,2	0,01900	0,01255	0,01110	0,00865
0,1	0,03800	0,02510	0,02220	0,01730

$$[N] = K/[Ti], \quad (1)$$

где

$$\lg K = -16\,440/T + 6{,}194. \quad (2)$$

Коэффициент активности азота f_N рассчитывали, используя параметр взаимодействия $e_N^{Ti} = -5700/T + 2{,}45$ [3].

Как видно, с уменьшением температуры при одном и том же содержании титана в металле, его равновесное содержание с азотом уменьшается. Это значит, что при охлаждении стали избыточный азот будет связываться в нитриды титана, которые затем в жидкой стали образуют неметаллическую фазу, а при скоплении – крупные включения типа «коржей».

Используя данные табл. 2 [4] и полагая, что температура ликвидуса стали с 0,03 % углерода составляет 1536 °С, рассчитали температуру затвердевания нержавеющей стали, °С следующего состава, % (по массе): 0,03 С; 18 Cr; 10 Ni; 1,5 Mn; 0,5 Si:

$$1536 - (1{,}5 \cdot 18 + 4 \cdot 10 + 5 \cdot 1{,}5 + 12 \cdot 0{,}5) = 1456.$$

Таблица 2

Понижение температуры затвердевания чистого железа при добавке некоторых элементов

Элемент	Понижение температуры затвердевания стали при содержании 1 % элемента, град	Содержание отдельных элементов в металле, % (по массе)
Хром	1,5	0 – 18
Никель	4,0	0 – 10
Марганец	5,0	0 – 1,5
Кремний	12	0 – 3

Задавшись температурой металла в сталеразливочном ковше (1525 °С), в промежуточном ковше (1490 °С) и температурой кристаллизации аустенитной стали (1456 °С) вычислили массу нитридов титана, образующихся при охлаждении стали в промежуточном ковше и кристаллизаторе.

Исходя из атомных масс нитрида титана (62 а.е.м) и азота (14 а.е.м), определили, что на 1 кг азота в металле образуется 62 кг · 1 кг/14 кг = 4,4 кг нитридов титана. Если известно количество азота, переходящего в нитриды титана, то для 1 т стали (1000 кг) масса образующихся нитридов титана, кг:

$$M_{TiN} = 1000 \text{ кг} \cdot \Delta N, \%/ 100\ \%.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

При легировании металла титаном независимо от исходного содержания азота в металле остается равновесное с этой концентрацией титана содержание растворенного азота. Остальной азот взаимодействует с титаном и образует в сталеразливочном и промежуточном ковшах неметаллическую фазу, которая частично удаляется из жидкой стали при обработке газообразным аргоном, а частично остается в металле и поступает на следующий этап обработки. В дальнейшем предметом анализа будет оставшийся в металле растворенный азот, равновесный с титаном.

Как видно из табл. 1, при охлаждении растворимость азота уменьшается и при охлаждении от 1525 °С до температуры ликвидуса аустенитной стали (~1456 °С) в металле образуется в зависимости от концентрации титана от 0,0277 до 0,1892 кг нитридов титана на 1 т стали (см. табл. 3). При всплывании нитриды титана обрастают шлаком и металлом, при этом масса всплывающих «коржей» значительно больше,

Таблица 3

Результаты расчетов на 1000 кг стали

Ti, % (по массе)	Δt =1525 – 1456 °С			Δt = 1490 – 1456 °С			Δt = 1480 – 1456 °С			Остается TiN в промежуточном ковше		Выделяется TiN в кристаллизаторе, %	Уменьшение TiN в кристаллизаторе при охлаждении металла на 10 °С	
	ΔN, % (по массе)	Масса в 1000 кг стали		ΔN, % (по массе)	Масса в 1000 кг стали		ΔN, % (по массе)	Масса в 1000 кг стали						
		азота, 10^4 кг	TiN, 10^4 кг		азота, 10^4 кг	TiN, 10^4 кг		азота, 10^4 кг	TiN, 10^4 кг	10^4 кг	%		10^4 кг	%
0,7	0,00295	295	1298	0,00112	112	493	0,00070	70	308	805	62,0	38,0	185	14,3
0,6	0,00345	345	1518	0,00130	130	572	0,00082	82	361	946	62,3	37,3	211	13,9
0,5	0,00414	414	1822	0,00156	156	686	0,00098	98	431	1136	62,3	37,3	255	14,0
0,4	0,00517	517	2275	0,00194	194	854	0,00122	122	537	1421	62,5	37,5	317	13,9
0,3	0,00690	690	3036	0,00260	260	1144	0,00163	163	717	1892	62,3	37,3	427	14,1
0,2	0,01035	1035	4554	0,00390	390	1716	0,00245	245	1078	2838	62,3	37,3	638	14,0
0,1	0,02070	2070	9108	0,00780	780	3476	0,00490	490	2156	5632	61,8	38,2	1320	14,5

но она должна быть пропорциональна массе нитридов титана. Поскольку добавленная масса неизвестна, то в дальнейшем для анализа будет использована масса образующихся в стали нитридов титана, которая пропорциональна массе «коржей».

Если принять, что температура металла в промежуточном ковше равна 1490 °С, то в промежуточном ковше при охлаждении стали от 1525 до 1490 °С выделяется 61 – 63 % нитридов титана (см. табл. 3), при этом большая часть выделившихся в промежуточном ковше неметаллических включений удаляется из металла при перемешивании и продувке аргоном. Остальное количество нитридов титана (37 – 39 %) выделяется в кристаллизаторе при охлаждении стали от 1490 до 1456 °С (температуры кристаллизации). Это связано с ликвацией и расслоением металла на фронте кристаллизации [5]. Остающиеся в кристаллизаторе нитриды титана захватываются кристаллизующимся металлом и остаются в слябе, образуя поверхностные дефекты в виде «коржей».

Отсюда следует, что процесс образования и выделения в кристаллизаторе «коржей» является естественным следствием уменьшения растворимости азота и связывания его титаном в нитриды. Это является спецификой данного металла, преодолеть которую невозможно, но есть возможность перераспределить выделяющиеся нитриды титана, снизив степень запороченности металла «коржами».

Расчеты показывают (см. табл. 3), что для того, чтобы уменьшить массу TiN в кристаллизаторе, необходимо уменьшить перепад температур между температурой стали в промежуточном ковше и температурой ее кристаллизации. Согласно расчету, при снижении температуры в промежуточном ковше на 10 °С, масса TiN, выделяющаяся в кристаллизаторе, уменьшается на 23 – 26 %, так же как при разливке металла с температурой на 10 °С выше оптимума масса «коржей» увеличивается на эту же величину.

Важно подчеркнуть, что при этом общая масса выделившихся из металла нитридов титана остается прежней, но происходит перераспределение массы нитридов титана, выделившихся в промежуточном ковше (которые удаляются из металла и не оказывают влияние на запороченность металла) и в кристаллизаторе (часть которых загрязняет готовый металл).

Таким образом, механизм образования дефекта «корж» в аустенитной нержавеющей стали 08-12Х18Н10Т представляется следующим. В жидком металле после ввода титана образуются скопления мелких включений (рис. 1) нитридов титана (рис. 2), которые частично остаются в металле, располагаясь в виде строчек (рис. 3) из нитридов титана в холоднокатаном листе нержавеющей стали и, частично укрупняясь, удаляются в шлак сталеразливочного и промежуточного ковшей, а частично выделяются в кристаллизаторе, образуя с шлакообразующими смесями крупные «коржи». Находящиеся в жидкой стали кристаллы корунда или шпинели ($MgO{\cdot}Al_2O_3$) могут интенсифицировать этот процесс, являясь подложками (зародышами) при образовании кристаллов нитридов титана (см. рис. 3). Впоследствии эти «коржи» при деформации слябов раскатываются, образуя дефекты поверхности листа.

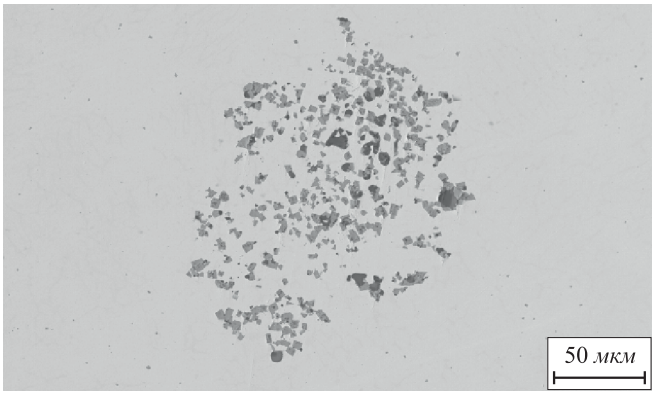
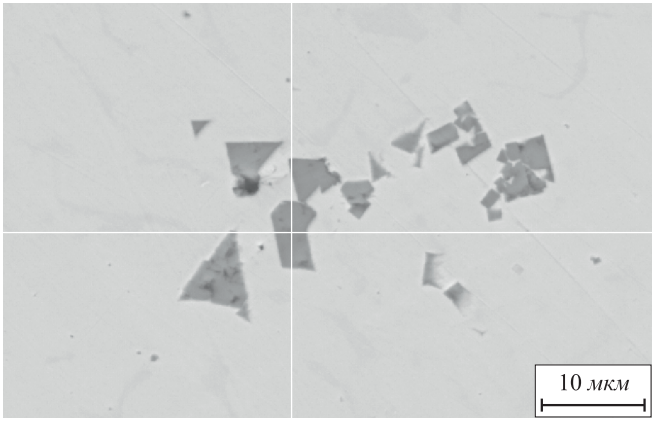
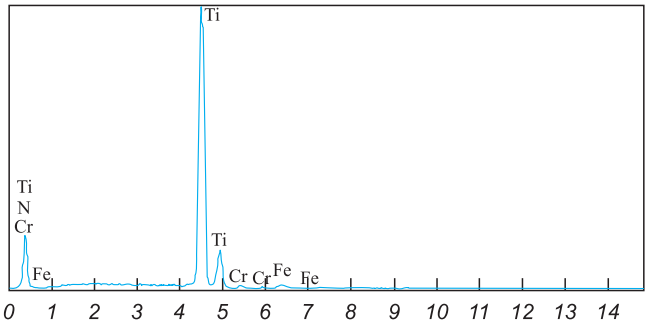


Рис. 1. Скопление мелких включений в литой пробе нержавеющей стали





Элемент, % (по массе)			
N	Ti	Cr	Fe
21,70	76,25	0,83	1,23

Рис. 2. Мелкие нитриды титана в литой пробе нержавеющей стали

На рис. 4 представлен общий вид такого дефекта на поверхности нержавеющего листа толщиной 2,0 мм. Толщина раскатанной корочки составляет 70 – 108 мкм при ширине до 2,41 мм. Корочка состоит преимущественно из нитридов титана (рис. 5) и представляет собой раскатанный «корж», образовавшийся в кристаллизато-

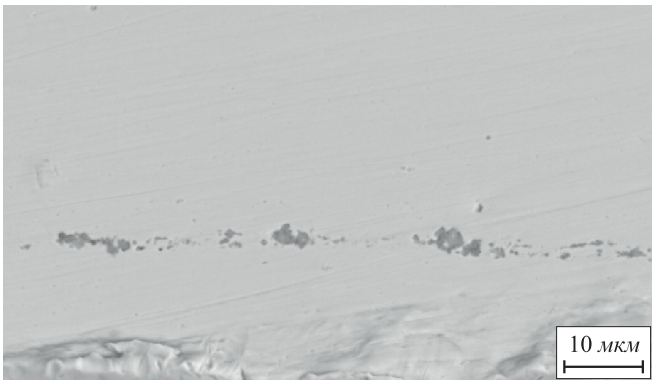


Рис. 3. Строчечные неметаллические включения в холоднокатаном листе нержавеющей стали толщиной 2,0 мм

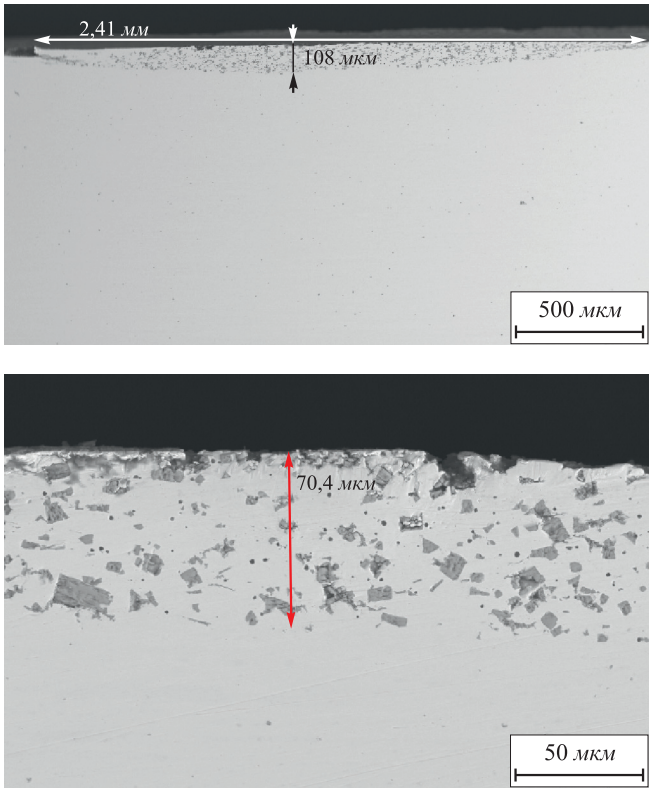


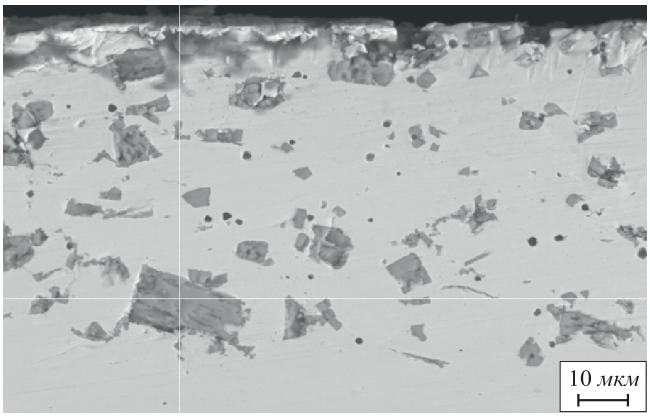
Рис. 4. Раскатанная корочка на поверхности холоднокатаного листа нержавеющей стали

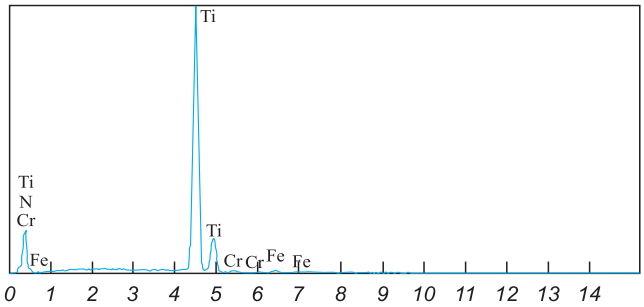
ре при разливке металла на машине непрерывного литья заготовок.

Следует учесть, что предложенный механизм не учитывает окисление титана, а только взаимодействие его с азотом, в предположении хорошей изоляции металлопроводки и отсутствия окисления струи металла при разливке.

Выводы. Выполнены расчеты массы нитридов титана, образующихся в интервале концентраций титана в аустенитной стали 0,1 – 0,7 % и при охлаждении от 1525 до 1456 °С.

Показано, что 61 – 33 % общей массы нитридов титана выделяется в промежуточном ковше и 37 – 39 % – в кристаллизаторе, образуя «коржи».





Элемент, % (по массе)			
N	Ti	Cr	Fe
19,62	78,73	0,66	0,98

Рис. 5. Включения нитридов титана в раскатанной корочке на поверхности холоднокатаного листа нержавеющей стали

Расчеты показали, что при фиксированном содержании титана снижение температуры аустенитной стали в промежуточном ковше на 10 °С позволяет перераспределить массу нитридов титана и уменьшить массу «коржей» в кристаллизаторе на 23 – 26 %.

Процесс образования и выделения в кристаллизаторе «коржей» является естественным следствием уменьшения растворимости азота и связывания его титаном в нитриды. Это является спецификой данного металла, преодолеть которую невозможно, поэтому слябы и лист из такой стали требуют зачистки поверхности от оставшихся в металле «коржей», образующих поверхностные дефекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Токовой О.К., Шабуров Д.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 7 С. 19 – 22.
2. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами – М.: Металлургия, 1986. – 222 с.
3. Evans D., Pelke R.D. // Trans. AIME. 1964. Vol. 230. P. 1657 – 1662.
4. Металлургия стали. /В.И. Явойский и др. – М.: Металлургия, 1973. – 816 с.
5. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.

© 2013 г. *О.К. Токовой, Д.В. Шабуров*
Поступила 27 мая 2013 г.