

3-4  
2006

ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Посвящается  
85-летию  
Донецкого  
национального  
технического  
университета

2006

Посвящается  
85-летию  
Донецкого  
национального  
технического  
университета

МЯТАЛО  
ЧЛЕНТЪЕ  
УКРАИНЫ

наука техника технология бизнес

А.Н.Смирнов, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Е.В.Ошовская, кандидат техн. наук, доцент, И.Н.Салмащ, аспирант, А.В.Яремко, студент (ДонНТУ)

## Физическое моделирование процессов перемешивания металла газом в ковше

Перемешивание инертным газом стали в ковше является неотъемлемой технологической операцией, направленной на обеспечение необходимого качества стали за счет гомогенизации расплава по химическому составу и температуре, удаления неметаллических включений, интенсификации процессов десульфурации и др. В настоящее время большинство операций по внепечной обработке стали выполняются на установке ковш-печь, при этом перемешивание преимущественно осуществляется путем донной продувки расплава.

Несмотря на достаточное число работ по перемешиванию металлургических расплавов, выполненных зарубежными исследователями [1-2], вопрос изучения процесса гомогенизации стали в ковше остается, по-прежнему, актуальным. Изучение характера движения гидродинамических потоков расплава, возникающих при продувке инертным газом, влияние числа и места расположения продувочных устройств, скорости газа, размеров и распределения газовых пузырьков на интенсивность перемешивания особенно является актуальным и важным при обосновании технологических параметров для установки ковш-печь с учетом того, что поверхность расплава покрыта слоем шлака. Решение перечисленных задач целесообразно выполнять с использованием физического и математического моделирования процесса перемешивания.

Физическое моделирование процесса перемешивания расплава инертным газом в ковше выполнено на прозрачной модели. При этом в качестве моделирующей жидкости использовали воду, для имитации шлака применяли силиконовое масло, а перемешивание осуществляли сжатым воздухом (табл.). Схемы, используемых установок, на которых проведены физические эксперименты, показаны на рис.1. Геометрический масштаб физических моделей определен с учетом критериев подобия Фруда и гомохронности и составил 1:10. Для визуального наблюдения газожидкостных потоков в стенках моделей выполняли из прозрачного стекла, а воду окрашивали специальным индикатором для цветового отличия от силиконового масла. Наблюдаемые картины перемешивания фиксировали с помощью цифровой видеокамеры. Обе экспериментальные установки позволили регулировать расход газа и изменять положение продувочных устройств относительно вертикальной оси сосуда.

Таблица  
Физические свойства имитирующих жидкостей

Параметры	Численные значения параметров для	
	воды	силиконового масла
Динамическая вязкость, кг/(м·с)	0,001	0,0965
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	965
Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с	1e <sup>-6</sup>	1e <sup>-4</sup>

Целью изучения характера движения потоков жидкости и ее взаимодействия с имитирующим шлак силиконовым маслом для различных условий продувки. Выполнено физическое моделирование процессов, происходящих при перемешивании стали газом в ковше. Определены условия возникновения и характер поведения пятна, образующегося на поверхности масла из-за всплывания газовой смеси. На основании визуализации движения газо-жидкостных потоков установлены факторы, влияющие на вовлечение в перемешивание шлака

Основной целью экспериментов являлось визуальное изучение характера движения потоков жидкости и ее взаимодействия с имитирующим шлак силиконовым маслом для различных условий продувки, т.е. определения рациональных расходов вдуваемого воздуха, числа продувочных

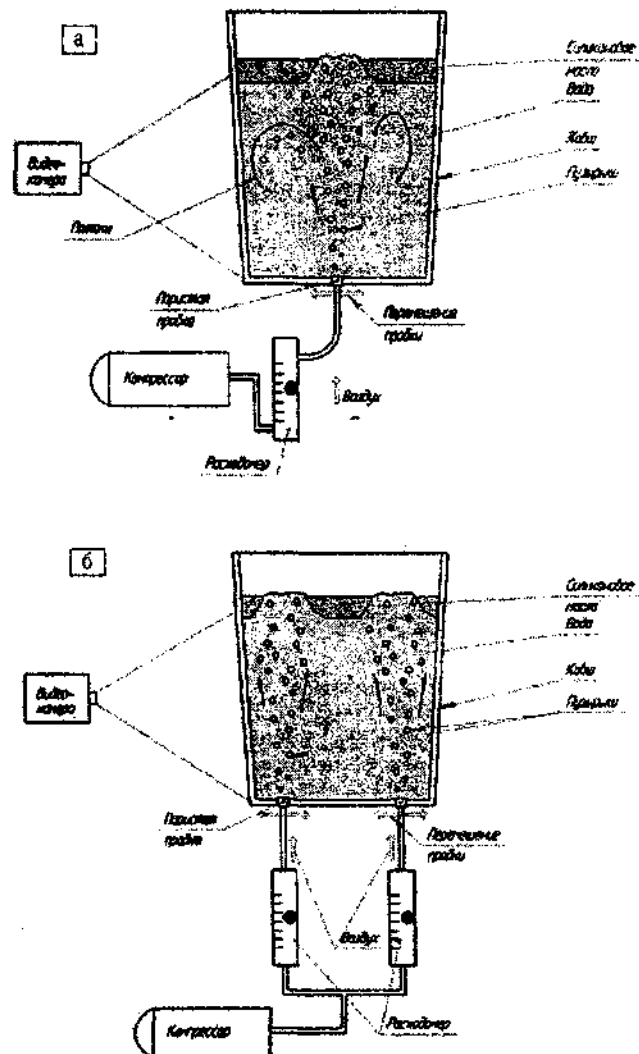


Рис. 1. Схемы экспериментальных установок для физического моделирования: с одной пробкой (а); с двумя пробками (б).

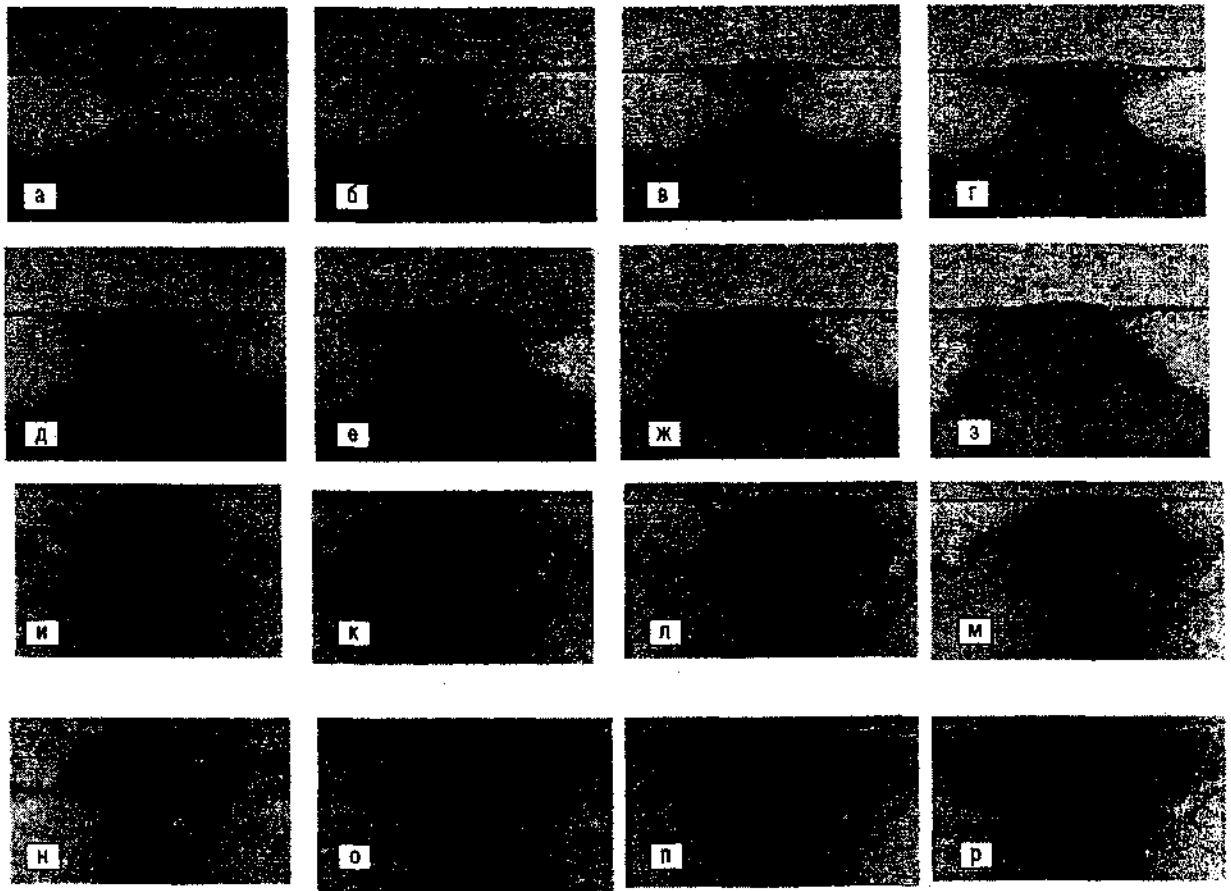


Рис. 2. Характер взаимодействия шлака и металла при моделировании процесса продувки в ковше

пробок и их расположения. Скорость газа варьировали от 0,1 до 0,8 л/мин. В установке с одной пробкой ее расположение изменяли от центра к стенке сосуда. При экспериментах на установке с двумя пробками варьировали и расходы газа через обе пробки, и их положение, причем изучали варианты с неодинаковыми скоростями и не осесимметричным расположением пробок.

При небольшом расходе вдвухаемого воздуха (0,2 л/мин) установлено следующее. В начальный момент времени (сразу после начала продувки) образуется узкая газожидкостная струя, состоящая из мелких пузырьков преимущественно сферической формы, которые, достигая границы раздела вода-масло, увлекают за собой жидкость и образуют в слое масла небольшой пикообразный конус, а часть пузырьков выходят на поверхность (рис. 2а). Далее по ходу продувки струя газожидкостного потока расширяется, число не-

больших пузырьков в ней растет, при этом увеличивается и размер конуса жидкости в слое масла. В результате чего на поверхность масла происходит выход большего числа пузырьков и образуется пятно небольшого размера (рис. 2б). Затем при дальнейшей продувке число пузырьков, достигающих поверхности увеличивается, они становятся больше по размерам, и пятно разрастается, а газожидкостный поток, внедрившийся в слой масла, приобретает форму усеченного конуса (рис. 2в, г). Далее большие пузырьки на поверхности начинают лопаться, образуя мелкие, к ним присоединяются пузырьки вновь доставляемые газожидкостным потоком, тем самым количество пузырьков, образующих пятно на поверхности масла, растет, расширяются его размеры; увеличивается и конус жидкости в слое масла (рис. 2д, е). Необходимо отметить, что периферийные

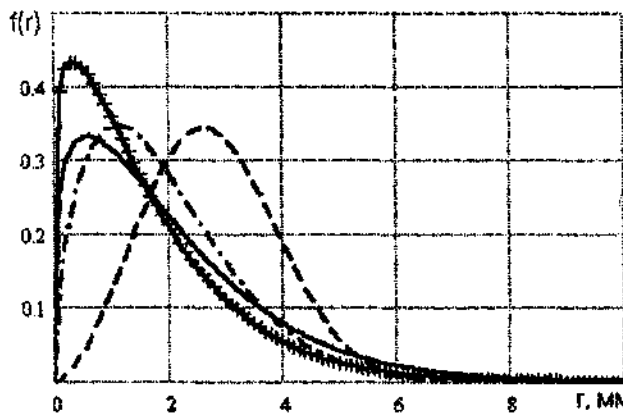


Рис. 3. Графики функций плотности распределения радиусов пузырьков для разных моментов времени от начала продувки: — через 1 с; - - - через 5 с; - · - · через 10 с; ···· через 20 с

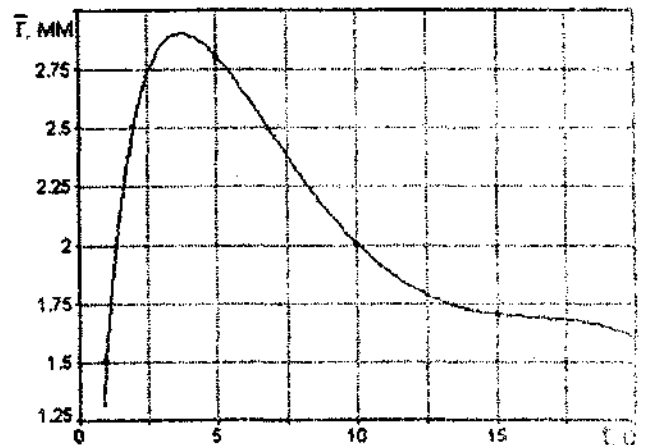


Рис. 4. Изменение среднего радиуса пузырька в пятно на поверхности масла

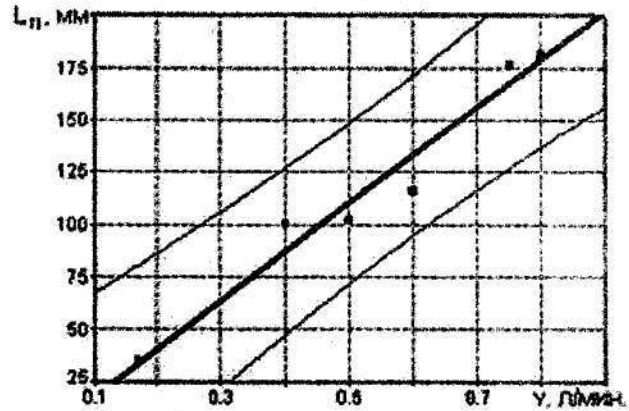
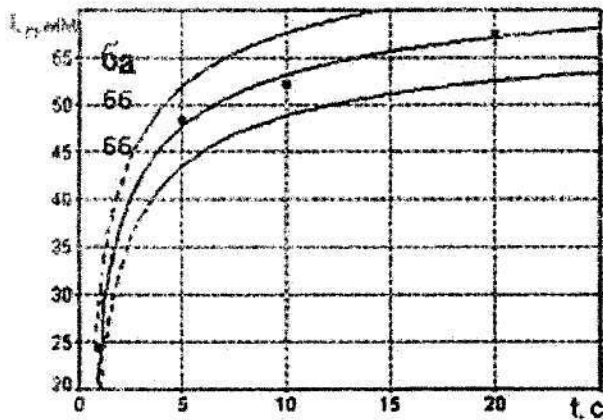


Рис. 5. Графическая зависимость размеров пятна: а - от времени (расход 0,2 л/мин.); б - от расхода воздуха.

пузырьки восходящего потока отрываются от образуемого в слое масла конуса и проникают вглубь масляного слоя (рис. 2ж, з). По ходу продувки это явление усиливается, в результате чего в слое масла образуются малоскоростные горизонтально направленные потоки, расходящиеся к стенкам сосуда.

При увеличении расхода вдуваемого газа (0,4 – 0,8 л/мин.) описанный процесс протекает более интенсивно, образуемый жидкостный конус имеет изначально больший размер, при больших расходах часть жидкости брызгами вылетает за пределы масла. Периферийные расходящиеся газожидкостные потоки, проникая в слой масла, перемещаются горизонтально к стенкам сосуда, а затем направляются вниз к границе раздела вода-масло, где увлекают за собой порцию масла, которая внедряется в водный объем (рис. 2и). Движущиеся слои жидкостей на границе раздела отрывают захваченную порцию масла, и она увлекается внутрь воды (рис. 2к, л). Эта порция масла увлекается газожидкостным потоком в центре основной восходящей струи, при этом от нее могут отделяться более мелкие порции, за ней следуют порции масла, чуть позже захваченные потоком (рис. 2м). В результате в сосуде образуется зона циркуляции, состоящая из воды, пузырьков воздуха и масла (рис. 2н – р).

Количественный анализ представленных выше процессов позволил установить следующее. Распределение размеров всплывающих пузырьков, образующих пятно на поверхности масла, достоверно описывается законом Вейбулла, функция плотности  $f(r)$  которого имеет вид:

$$f(r) = \frac{b}{a} \left(\frac{r}{a}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{r}{a}\right)^b\right),$$

где  $r$  – радиус пузырька, мм;  $a, b$  – параметры закона

распределения.

На рис. 3 показаны графики функций плотности распределения размеров пузырьков при расходе воздуха 0,2 л/мин для разных моментов времени, а на рис. 4 график изменения среднего размера пузырька, определенный как математическое ожидание случайной величины на основании установленных значений параметров закона распределения. Представленные графики подтверждают описанные выше процессы, т.е. в начале продувки в газожидкостном потоке и в пятне присутствуют преимущественно мелкие пузырьки ( $r=0,5-0,7$  мм); затем увеличивается доля более крупных ( $r=2,5-3,5$  мм) при снижении числа мелких пузырьков; далее из-за деления крупных пузырьков и добавления новых растет число мелких пузырьков ( $r=0,3-0,5$  мм), присутствующих в пятне.

Установлено также изменение размера пятна как в процессе продувки (рис. 5а), так и при изменении расхода вдуваемого воздуха (рис. 5б). Изменение ширины пятна  $L_p$  (мм) во времени  $t$  (с) для расхода воздуха 0,2 л/мин. можно представить зависимостью (коэффициент корреляции 0,997):

$$L_p = 66,4 - 420/\sqrt{t}.$$

Ширина пятна  $L_p$  (мм) в зависимости от расхода воздуха  $v$  (л/мин) адекватно (коэффициент парной корреляции 0,95) описывается уравнением линейной регрессии:  $L_p = 5,99v - 230,45$ .

Эксперименты, выполненные при смещении продувочного отверстия, показали, что процесс образования пятна на поверхности масла имеет подобный описанному для центрально расположенного отверстия. Однако размер пятна приблизительно на 20–30% больше, кроме того картины движения и возникающие циркуляции газожидкостных потоков с захваченными порциями масла имеют некоторые отличия. Весь объем жидкости, находящейся в сосуде, делится на две зоны циркуляции разной величины (рис. 6). В меньшей зоне активные циркуляции газожидкостной смеси с отдельными порциями масла происходят преимущественно в верхней пристеночной области возле границы раздела вода-масло, в то время как в большей зоне образуется значительная циркуляция потоков по всему объему, причем масло большими порциями вовлекается вглубь жидкости и, в отдельных случаях, достигает

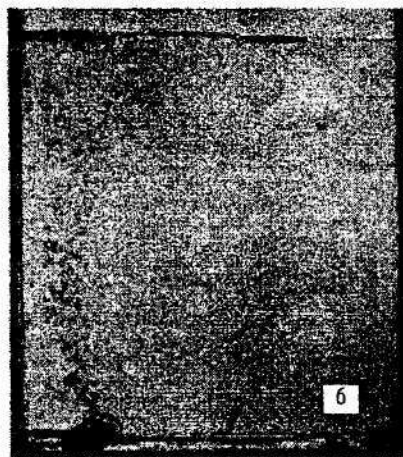
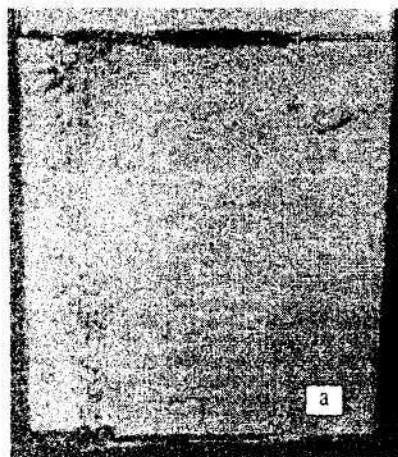


Рис. 6. Процесс продувки на модели с одной пробкой при смещении продувочного отверстия

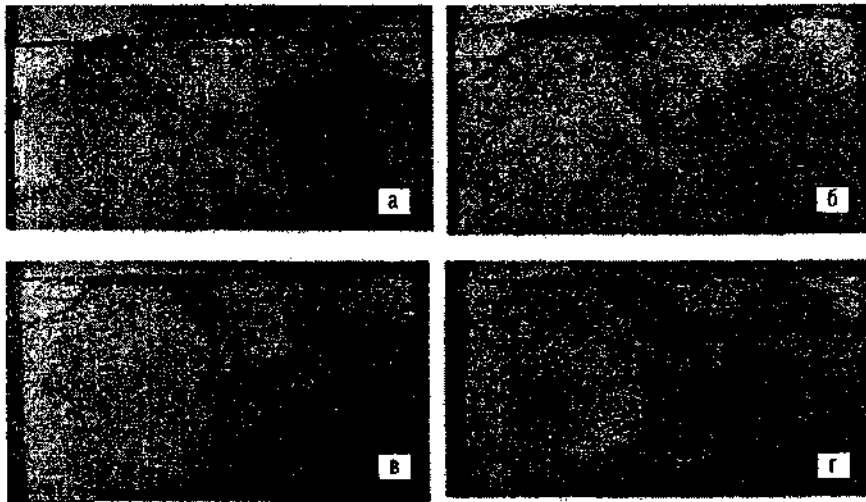


Рис. 7. Процесс продувки на модели с двумя пробками: а - расход воздуха одинаковый 0,2 л/мин через каждую пробку; б - расход воздуха через одну пробку 0,3 л/мин, а на другой 0,1 л/мин; в - расход воздуха через одну пробку 0,2 л/мин, а на другой 0,1 л/мин; г - расход воздуха через одну пробку 0,4 л/мин, а на другой 0,2 л/мин.

дна сосуда. Центральная зона поверхности воды остается практически непокрытая маслом, а толщина масла возле стенки большей циркуляционной зоны увеличивается в 3-4 раза. Эти явления особенно проявляются при больших расходах воздуха (0,6-0,8 л/мин) и значительном смещении продувочных устройств к стенке от вертикальной оси сосуда.

Серия экспериментов на модели с двумя продувочными устройствами включала также изучение процесса образования и развития пятна на поверхности масла, и характера движения газожидкостных потоков в зависимости от расхода воздуха через каждое продувочное отверстие и их расположения. Опыты показали, что при продувке на

поверхности масла также образуются два пятна из пузырьков (рис. 7). При одинаковом расходе воздуха размеры пятен практически одинаковы (рис. 7а), а при разном - отличаются друг от друга (рис. 7б).

Газожидкостные потоки делят слой масла на три части, две из которых отгоняются к стенкам сосуда и их мелкие порции вместе с газожидкостным потоком движутся вдоль стенок вниз, образуя небольшие зоны циркуляции; а центральная часть увлекается обими периферийными потоками основных восходящих струй по оси ковша вниз. При этом она дробится на более мелкие порции, участвуя в циркуляциях.

### Выводы

1. При различных расходах вдуваемого воздуха его пузырьки газа проникают в масло в составе газожидкостной смеси,

образуя небольшое пятно в виде круга на поверхности масла; размеры пузырьков адекватно описываются распределением Вейбулла; размеры пятна («prime eye») зависят от расхода вдуваемого воздуха и расположения продувочного отверстия.

2. При увеличении расхода вдуваемого воздуха в сосуде формируются нисходящие потоки жидкости, имитирующие расплавы, которые стекают в ковше вдоль вертикальных стенок и вовлекают в движение отдельные крупные порции масла (шлака).

3. При использовании двух продувочных узлов картина циркуляционных потоков изменяется, но явление образования пятна на поверхности шлака и вовлечение шлака в перемешивание остается.



## ПАТУРА

1 Transient Fluid Flow Phenomena in Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer - Approach by Numerical Simulation and Water Model Experiments / J. W. Han, S. H. Heo, D. H. Kam et al. // ISIJ International. - Vol.41. - 2001. - No.10. - P.1165-1173.

2 Taniguchi S., Kawaguchi S., Kikuchi A. Fluid Flow and Gas-Liquid Mass Transfer in Gas-Injected Vessel // 2nd International Conf. on CFD in the Materials and Process Industries CSIRO, Melbourne (Australia), 1999. - P.193-198.

### Summary

A.N.Smirnov, E.V.Oshovsca, I.N.Salmash, A.V.Yaremko

### PHYSICAL SIMULATION MIXING STEEL GAS IN PLANT LADLE - FURNACE

The physical modelling of steel mixing processes in the ladle had been executed. It is allowing to study the character of motion of flow of liquid and its interaction with silicone oil imitating slag for different conditions. The appear conditions and patterns behaviour of spot appearing on the oil surface from emerging of gas-liquid mixture are definite. On the basis of visualization of motion of gas-liquid streams, factors affecting involving in interfusion of slag had been shown.