

Таблица 2. Расчетные значения параметров выпрямления материала с учетом радиального напряжения и трения

r/h_0	h_2/h_0	\bar{M}_2	\bar{N}_2
$\bar{N}_1 = 0$			
0.5	0.766	0.091	0.399
1.0	0.881	0.185	0.339
2.0	0.955	0.230	0.225
4.0	0.986	0.245	0.129
$\bar{N}_1 = 0.1$			
0.5	0.653	0.043	0.399
1.0	0.805	0.133	0.394
2.0	0.908	0.196	0.318
4.0	0.960	0.225	0.238
$\bar{N}_1 = 0.2$			
0.5	0.563	0.062	0.407
1.0	0.738	0.085	0.447
2.0	0.864	0.157	0.407
4.0	0.936	0.199	0.344

торая приводит к одновременному образованию четырех углов в сечении заготовки. Вначале материал изгибается на матрице и пуансоне, причем на кромках матрицы изгиб происходит с двух сторон, моменты M_1 и M_2 имеют разные знаки. После достижения углов гибки 90° на кромке матрицы происходит изгиб и выпрямление материала, направление M_2 изменяется на противоположное, сила N_2 резко возрастает, согласно (5), и в дальнейшем остается стабильной. Приведенные формулы позволяют прогнозировать утонение материала с учетом всех значимых факторов.

Следует обращать большое внимание на подготовку материала под гибку. Горячекатаную сталь целесообразно протравить перед гибкой, так как наличие окалина ведет к быстрому износу штампа.

Если требуется получить детали с точными размерами угла между полками и радиуса изгиба, то следует заготовки подвергнуть нормализации или отжигу. Небольшие заготовки целесообразно перед гибкой подвергать обкатке в барабане. Часто при гибке применяется зачистка кромок заготовок. Заготовки следует укладывать в штамп менее качественной стороной в сторону пуансона, чтобы растягивающие напряжения не вызвали развития дефектов, имеющихся на заготовке [2].

При вытяжке, в отличие от гибки, радиусы матрицы намного превышают толщину заготовки, поэтому утонение прямых стенок изделий типа коробок невелико. Применение перетяжных ребер меняет картину, но в этом случае становится существенным фактор зависимости напряжения текучести от циклического изменения знака среднего напряжения [4].

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975.—399 с.
2. Мошнин Е. Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. — М.: Машиностроение, 1959.—360 с.
3. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. — М.: Машиностроение, 1977.—278 с.
4. Sanchez L. R. A new cyclic anisotropic model for plane strain sheet metal forming // IJMS.—2000.—42.—P. 705—728.

BENDING AND STRAIGHTENING THE SHEET IN PLANE DEFORMATION CONDITIONS

N. N. Ubizkii, V. V. Filipenko, G. I. Schupliak, Yu. V. Olovarenko

We estimated the action of various factors on the tapering material moving along the die edge. We give the formulas and calculated values of material thickness after bending and straightening, depending on relative radius of the die and pressing force.

УДК 621.6.01.02/.02

ИМПУЛЬСНАЯ ФУНКЦИЯ В МОДЕЛИРОВАНИИ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВЫ

© Г. И. Сокол, У. Н. Тучина

Дніпропетровський національний університет

Розглянуто різноманітні методи інтенсифікації сплавів металів. Запропоновано спосіб поліпшення перемішування розплавів за допомогою періодичних ударних хвиль.

Введение. Свойства материалов на основе алюминия и железа, очень важных для современного ракетостроения, в значительной степени определяются технологическим процессом получения их

расплавов. Важную роль здесь играют перемешивание, рафинирование, т. е. освобождение от неметаллических твердых включений, дегазация. Важно также оптимально решить задачи повышения ин-

тенсификации, сокращения времени плавки, прохождения реакций окисления примесей, растворенных в расплавленной железной ванне.

Известным способом повышения качества алюминиевых сплавов (нежелательная примесь здесь железо, а из газов — водород) является переплав с использованием модификаторов. В работе [6] разработан модификатор для обработки жидкого металла. В расплаве под действием термической диссоциации примеси легко разлагались с образованием большого количества газообразных продуктов разной степени активности, что обеспечило связывание водорода и его удаление совместно с неметаллическими включениями. Однако этот способ не улучшает перемешивания расплавов.

Целью настоящей работы является разработка способа улучшения перемешивания расплавов посредством периодических ударных волн, выявление связи между амплитудой спектральных составляющих периодических ударных волн и параметрами, характеризующими интенсификацию процесса выплавки металла, составление физической и математической моделей процесса.

Метод и результаты исследования. Основным способом производства стали в настоящее время является кислородно-конверторный процесс с продувкой ванны кислородом. Газообразный кислород, поступающий в жидкий расплав из газовой струи, является основным источником, снабжающим ванну кислородом. Интенсивность рафинирования в решающей мере зависит от параметров вдуваемого газа и от способа подачи дутья, т.е. организации дутьевого режима. Поэтому в сталеплавильных агрегатах роль и значение организации движения газов возросла. Управляющим фактором процесса продувки ванны и перемешивания металла является струя кислорода. Глубина проникновения струи в жидкий металл считается наиболее характерным показателем, позволяющим оценить степень воздействия струи на ванну. Глубина реакционной зоны зависит от скорости газа и диаметра сопла [11].

Известны различные формы струй кислорода: свободная изотермическая, струи, сталкивающиеся жидкостью и твердой стенкой, пульсирующие струи [3]. Осуществляется специальное формирование струй. При формировании струи необходимо учитывать, что чем больше ее скорость, тем глубже проникает кислород в жидкий металл. Поэтому преимущество в конструкции фурм имеют сопла Лаваля перед обычными цилиндрическими соплами. Эффективны также струи, распространяющиеся в каналах с кольцевыми отверстиями, что создает неустойчивые отрывные течения и возбуждение значительных пульсаций кратера в глубину.

Пограничный слой вокруг обтекаемого газом тела оказывает наименьшее сопротивление массопереносу в случае турбулентного газового потока. Следовательно, для продувки следует применять газовый поток с неустойчивым течением.

Перемешивание путем движения масс металла и шлака оказывает большое влияние на ход плавки. Поэтому перемешивание — это следующий параметр, характеризующий улучшение процесса плавки. Если при продувке создается стационарный поток окислителя, который действует на ванну металла с малым по величине избыточным давлением, то скорость перемешивания жидкого металла мала [11]. Это является недостатком такого способа продувки. Поэтому перешли к пульсирующему потоку [10]. Наиболее простым и эффективным в обеспечении пульсаций струи является периодическое прерывание газового потока. Известно, что пульсации частотой 80 Гц ускорили обезуглероживание на 40—45 %. [3, 11].

Возможно создание пульсирующего потока с применением резонаторов в конструкциях фурм. Например, в акустическом генераторе Гартмана струя, взаимодействующая с резонатором, генерирует ударные волны, которые, в свою очередь, за пределами фурмы генерируют внешнее акустическое поле с частотой от нескольких герц до десятков килогерц.

Эксперименты показали, что для интенсивного перемешивания расплава в конвертере нужны колебания полного давления в струях со сравнительно невысокой частотой и с большой амплитудой [3, 11]. Этот факт свидетельствует о возможности применения ИЗ-колебаний для интенсивного перемешивания расплава.

Пульсирующее дутье создается в потоке кислорода, который характеризуется числом Маха $M < 1$. Такой поток кислорода создает низкий уровень избыточного давления, действующего на поверхность ванны.

Как показывают экспериментальные и теоретические исследования, наложение акустических колебаний любой частоты на стационарное поле практически всегда оказывает положительное влияние на интенсивность теплообменных процессов. Наиболее существенным параметром здесь является интенсивность колебаний.

В работе [7] посредством измерений зарегистрировано, что октавные спектры шума во время продувки сталеплавильного процесса в конвертерах емкостью 150 и 350 т носят инфразвуковой характер. УЗД инфразвуковой области спектра при продувке конвертера емкостью 150 т достигают 94—97 дБ. Есть свидетельства [7], что такие уровни

ИЗ- и НЧ-шума в кислородно-конвертерных цехах обусловлены наличием интенсивных газовых потоков. Максимальные уровни ИЗ зарегистрированы в начале процесса продувки. В этой работе сделан вывод, что конвертер с находящимися в нем продуктами плавки колеблется как единое целое под действием внешней возбуждающей силы — под динамическим воздействием кислородной струи. Возможность использования для интенсификации процесса выплавки именно акустических НЧ-колебаний обусловлена объемом и массой жидкого металла в конвертере.

К параметрам, характеризующим улучшение процесса плавки, можно отнести еще и рафинирование металла, то есть степень поглощения (или коэффициент использования) кислорода металлом, повышение массопереноса в ванне, коэффициент теплоотдачи. Интенсификация теплообмена начинается только тогда, когда амплитуда пульсирующей составляющей скорости U превышает стационарную составляющую скорости U_0 . Эти данные являются предпосылкой к разработке такой принципиальной схемы фурмы, которая обеспечит максимально высокое значение амплитуды пульсирующей составляющей скорости потока U . Есть модели описания процессов при производстве расплавов на основе эмпирических зависимостей [11], теоретических моделей с использованием системы уравнений Навье — Стокса [4], численных методов [6]. Однако все эти работы рассматривают случай стационарного или пульсирующего газового потока при воздействии на расплав.

Здесь предлагается новый способ воздействия струи на расплав с периодическими ударными волнами, переходящими в акустические.

Для описания теоретической модели воздействия периодических ударных волн на поверхность расплава вводится импульсная функция периодического избыточного давления $p(t)$ кислорода в зависимости от времени, которая представлена двумя составляющими: периодом следования ударных волн T и промежутком времени τ , когда ударная волна действует на расплав (рис. 1):

$$p(t) = \begin{cases} p_M, & \text{для } 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \text{для } \tau \leq t \leq T, \end{cases}$$

где p_M — амплитуда в ударной волне.

В работе [11] для величины усвоения расплавом кислорода получена формула

$$G = 27.5 \lg i_{cp}, \quad (1)$$

где G — количество усвоенного ванной кислорода, i_{cp} — среднее давление струи на поверхность ванны.

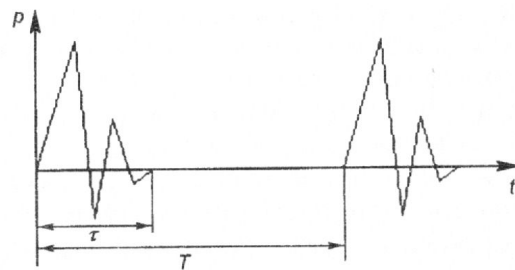


Рис. 1. Функция периодической ударной волны

Интенсификация процесса выплавки жидкого металла улучшает степень усвоения кислорода G путем повышения среднего избыточного давления i_{cp} на поверхность ванны. При этом логично заменить пульсирующее дутье, характеризующееся дозвуковым потоком кислорода по каналу фурмы с числом Маха $M < 1$, дутьем со сверхзвуковым потоком по каналу фурмы с числом Маха $M > 1$, в котором встречей с вводимым твердым телом периодически формируются ударные волны с высоким избыточным давлением. Это повышает среднее давление струи на поверхность ванны i_{cp} .

Генерирование периодических ударных волн для воздействия на поверхность жидкого металла осуществляем следующим образом. Так как продувку ванны жидкого металла в конвертере необходимо проводить потоком кислорода, движущегося вдоль фурмы со сверхзвуковой скоростью. Устанавливаем внутри фурмы сопло Лавала. Далее в поток, движущийся уже со сверхзвуковой скоростью, периодически вводится острое твердое тело, вследствие чего в потоке периодически генерируются ударные волны. Воздействуя на поверхность ванны, ударные волны вызывают в ванне жидкого металла периодически следующие друг за другом зоны повышенного и пониженного давления, увлекают порции металла и интенсифицируют его перемешивание.

В отличие других методов интенсификации продувку осуществляем периодическими ударными волнами, которые генерируют в сверхзвуковой струе окислителя.

По мере распространения в полости конвертера от фурмы до поверхности расплава ударная волна большой мощности постепенно теряет свою амплитуду, при встрече ударной волны с поверхностью расплава имеют место поглощение и отражение энергии волны, поэтому она переходит в акустическую ударную волну с амплитудой p_{ak} :

$$p_{ak} = \rho_m c_m^2 M, \quad (2)$$

где ρ_m — плотность среды жидкого металла, c_m — скорость звука в среде жидкого металла.

Для ударных волн число Маха $M = 1, 2, \dots$ и т. д. Поэтому воздействие на жидкий металл периодическими ударными волнами в M раз больше, чем при осуществлении простого пульсирующего дутья.

Это указывает на значительное преимущество воздействия на расплав ударными волнами, формируемыми в сверхзвуковой струе, по сравнению с воздействием дозвуковыми струями. Принимаем, что давление струи, действующей на поверхность ванны $i_{\text{ср}}$, равно избыточному давлению в акустической ударной волне $p_{\text{ак}}$ в месте встречи волны с поверхностью расплавленного металла.

Далее в расплаве распространяется акустическая волна, звуковое давление в которой $p_{\text{ак}}$ постепенно уменьшается из-за затухания. Подставляя (2) в (1), имеем

$$G = 27.5 \lg p_{\text{ак}} = 27.5 \lg \rho_m c_m^2 M. \quad (3)$$

Зависимость (3) дает возможность представить преимущество воздействия на расплав периодическими ударными волнами по сравнению с другими видами воздействий. Здесь получена прямо пропорциональная связь между степенью усвоения кислорода G и избыточным давлением в ударной волне $p_{\text{ак}}$.

На первом этапе следует задать частоту следования ударных волн равной резонансной частоте ванны жидкого металла, тогда акустическое давление значительно возрастет. На этом режиме перемешивание можно улучшить за счет волн меньшей интенсивности, чем на других частотах.

Строго говоря, частота следования ударных волн, равная резонансной частоте ванны жидкого металла, может не сразу дать желаемый результат увеличения амплитуды колебаний, так как форма ударной волны такова, что предполагает разложение ее на спектральные составляющие. В этом случае интенсивность перемешивания максимальна при совпадении резонансной частоты ванны с частотой одной из гармонических составляющих ударной волны.

Поэтому на втором этапе исследования функцию $p_{\text{ак}}(t)$ разложим в ряд Фурье и определим ее гармонические составляющие. На рис. 2 показаны спектральные составляющие функции периодической ударной волны.

Спектральный анализ функции ударной волны показал, что значительными в спектре являются низкочастотные составляющие. Поэтому именно они способствуют улучшению перемешивания жидкого металла в ванне, резонансная частота которой является также низкой. При аппроксимировании конвертера резонатором Гельмгольца или емкостью с узким горлом получено, что при объеме конвер-

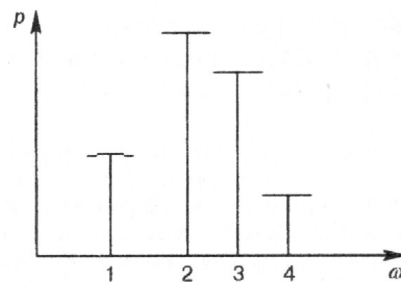


Рис. 2. Спектральные составляющие функции периодической ударной волны

тера $V = 82 \text{ м}^3$ и радиусе горла 1.15 м основная круговая частота составляет 5 рад/с .

Для реализации описанного процесса воздействия периодических ударных волн на расплав разработана принципиальная схема фурмы [5]. Акустическая фурма содержит сопло Лавалья, установленное в канале. В канал периодически вводится клиновидное тело с помощью электромеханического вибратора. Сопло Лавалья с каналом объединено водоохлаждаемым корпусом.

Поток кислорода движется через сопло Лавалья со сверхзвуковой скоростью. Клиновидное тело вводится в сверхзвуковой поток, что и формирует ударные волны с большой амплитудой колебаний.

Как уже было отмечено, перемешивание жидкого металла в ванне необходимо интенсифицировать, так как это приводит к уменьшению толщины пограничного слоя, к развитию межфазных поверхностей. Вследствие этого ускоряется перенос тепла и вещества [10]. Перемешивание металла оказывает непосредственное влияние на общую скорость гетерогенного превращения. Кроме этого, за счет выходящего из реакционной зоны (лунки, где происходит взаимодействие струи с расплавом) газа осуществляется перемешивание расплава с образованием вращения слоев.

С целью придания массе металла вращательного движения относительно оси конвертера несколько фурм наклонены в одну сторону к внутренней поверхности конвертера.

ВЫВОДЫ

1. Разработана теоретическая модель интенсификации процесса выплавки металлов при воздействии на расплав периодическими ударными волнами.
2. Получена зависимость степени усвоения кислорода от акустического давления и числа Маха.

3. Разработана принципиальная схема фурмы для продувки металла, позволяющая генерировать периодические ударные волны в струе кислорода.

1. Баптизмский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса. — М.: Металлургия, 1975.—176 с.
2. Волчок И. П., Митяев А. А. Ресурсосберегающая технология производства алюминиевых сплавов // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. — Д.: РИА «Днепр-VAI», 2004.—Вып. 26.—С. 246—249.
3. Засухин О. Н., Иванов А. П., Святоха А. Н., Сизов А. М. Нестационарные струи как средство интенсификации металлургических процессов // Матер. 6-й междунар. конф. ученых Украины, России, Белоруссии, 29 сент.—3 окт. Севастополь, 1997.—С. 56.
4. Коваль В. П., Потапов А. В. Математическое моделирование движения жидкости в осесимметричной ванне под действием вдуваемой струи // ИФЖ.—1977.—32, № 3.
5. Косыко И. К., Сокол Г. И. и др. Акустическая фурма для продувки металла в конвертере // Автор. свидетельство № 1195653, 1986.
6. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэродинамике и тепломассообмене. — Киев.: Наук. думка, 2003.—382 с.
7. Сокол Г. И. Повышение эффективности выплавки металлов посредством периодических ударных волн // Строительство,

во, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. Стародубские чтения. — Днепропетровск: ПГАСА, 2003.—Т. 1.—С. 201—205.

8. Сокол Г. И., Тучина У. Н. Импульсные функции в акустических системах // Акустический симпозиум «Консонанс-2003»: Сб. тр. — Киев, 2003.—С. 246—252.
9. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голямина. — М.: Сов. энциклопедия, 1979.—400 с.
10. Явойский В. И. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. — М.: Металлургия, 1985.—176 с.
11. Явойский В. И., Дорофеев Г. А., Повх И. Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. — М.: Металлургия, 1974.—495 с.

IMPULSE FUNCTION IN SIMULATION OF ACOUSTIC INFLUENCE ON MELTS

G. I. Sokol, U. N. Tuchina

Various methods of the intensification of metal melts are considered. The method of the blast of a bath of liquid metal with periodic strike waves is offered. The relation between the degree of adopting of oxygen and verpressure in a strike wave is obtained. The construction of an acoustic tube for realization of the offered method is developed.

УДК 622.235.2

© И. А. Угрюмов, А. С. Козлов, М. А. Илюшин, И. В. Целинский

Санкт-Петербургский державний технологічний інститут (технічний університет)

ЭНЕРГОЕМКИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Синтезовані комплексні перхлорати d-металів на основі 5-гідразинотетразолу. Вивчено їхні фізико-хімічні, вибухові властивості, чутливість до лазерного моноімпульсу.

Лазерное инициирование — относительно новый способ подрыва взрывчатых веществ, отличающийся повышенной безопасностью [7]. При лазерном инициировании обеспечивается высокий уровень изоляции светодетонатора от ложного импульса передаваемого по линии связи с импульсным лазером, поскольку в оптическом диапазоне отсутствуют случайные источники с мощностью, достаточной для подрыва детонатора. Светодетонаторы нечувствительны к электромагнитным наводкам и зарядам статического электричества. Одним из основных элементов цепи лазерного инициирования являются светочувствительные энергоемкие вещества.

В качестве таких веществ нами был синтезирован и изучены комплексные перхлораты меди (II), кобальта (II), никеля (II) с 5-гидразинотетразолом (ГТ) в качестве лиганда. Данный выбор основыва-

ется на высокой положительной энтальпии образования 5-гидразинотетразола, мощной окислительной способности перхлорат-иона, высоких потенциалах ионизации катионов d-металлов, что должно привести к получению высокоэнергоемких соединений с коротким участком перехода горения в детонацию, чувствительных к лазерному излучению [4, 5].

Синтез комплексных соединений проводился по схеме [1—3], где Me = Cu²⁺, Co²⁺, Ni²⁺ (см. схему).

