

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

**Т.В. Виштак**<sup>1</sup>, вед. инж., **А.Н. Карлов**<sup>2</sup>, вед. инж., **И.П. Кондратенко**<sup>3</sup>, докт. техн. наук,  
**А.П. Ращепкин**<sup>4</sup>, докт. техн. наук

1–4 – Ин-т электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Проведены экспериментальные исследования модели двухобмоточного перемешивателя жидкого металла для кристаллизатора МНЛЗ. Исследования выполнялись при отдельном и совместном включении двух- и четырех-полюсных обмоток. Выполнено сравнение экспериментальных данных с теоретическими результатами, полученными с помощью расчетной методики. Библ. 6, рис. 4, табл. 5.*

**Ключевые слова:** многообмоточный перемешиватель жидкого металла, кристаллизатор, параметры перемешивателя.

Электромагнитное перемешивание (ЭМП) является одним из последних достижений, используемых при непрерывной разливке стали. Сообщения относительно первых успешных экспериментов по ЭМП при разливке мелких заготовок появились в начале 70-х годов XX ст.

Успех ЭМП объясняется целым рядом металлургических преимуществ, таких как уменьшение количества пор, раковин, шлаковых включений в металле, увеличение скорости литья, создание равномерного профиля распределения температуры в металле, получение более однородной структуры металла и т.д. [1, 5, 2].

Применение принудительного конвективного тепло- и массопереноса в металлургии на уровне жидкометаллического передела приводит к интенсификации производства, улучшению структуры и качества получаемой продукции. Убедительными достоинствами для создания направленных потоков обладают методы электромагнитного воздействия на жидкие металлы и сплавы.

Механизм ЭМП является результатом взаимодействия электродинамических, магнитогидродинамических и металлургических факторов. Несмотря на сложность этих факторов, в настоящее время имеется возможность описать особенности процесса и объяснить преимущества, которые он обеспечивает.

Электромагнитная система ЭМП состоит из статора асинхронного двигателя и ротора, которым является жидкая лунка непрерывного слитка. Наиболее часто в настоящее время применяется ЭМП с вращающимся полем и одной парой полюсов. Используются системы ЭМП цилиндрической формы с внутренним и наружным расположением относительно корпуса кристаллизатора.

Основные электрические параметры устройства ЭМП меняются в широких пределах. Для ЭМП мелких заготовок и блюмов вне кристаллизатора (в зоне вторичного охлаждения) обычно используются токи промышленной частоты; во всех других случаях необходимо применять токи низкой частоты (1...20 Гц), что позволяет снизить потери, связанные с наличием между индуктором и жидкой сталью медных стенок кристаллизатора или толстой оболочкой слитка. Другими важными электрическими параметрами являются число фаз (2 или 3), количество пар полюсов (1 или более), напряжение (< 400 В), установленная мощность (10...3000 кВА) и т.д.

Современные системы ЭМП позволяют регулировать электрические параметры источника низкочастотного тока (частота, напряжение, форма напряжения, фазовый сдвиг) и тем самым управлять процессом перемешивания металла в зависимости от сплава.

Величины скоростей, создаваемых ЭМП в жидкой стали, колеблются от 0,1 до 1,0 м/с. Характер потоков, создаваемых ЭМП, зависит от конкретных условий [2].

Наряду с преимуществами индукционного перемешивания в процессе эксплуатации были выявлены и его недостатки, в частности, индукционное перемешивание не позволяет устранить осевую сегрегацию. Возможность решения этой проблемы связывают с уменьшением скорости вращения жидкого металла в центральной зоне слитка.

Экспериментальные исследования магнитогидродинамических процессов на жидкой стали из-за высокой температуры последней являются трудноосуществимыми и поэтому в лабораторной практике общепринятыми стали исследования магнитогидродинамических процессов на макетах с использованием металлов с низкой температурой плавления, таких как галлий, сплав Вуда и т.д. Электропроводность этих сплавов и их вязкость хорошо согласуются с параметрами жидкой стали. Поэтому результаты экспериментальных исследований магнитогидродинамических явлений вполне могут быть обобщены на жидкую сталь.

Целью настоящих экспериментальных исследований является апробация разработанной методики расчета электромагнитных и магнитогидродинамических параметров перемешивателя жидкого металла [4, 3].

Для изучения процессов перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ был использован модельный образец двухобмоточного трехфазного индукционного перемешивателя мощностью 0,2 кВт. В качестве магнитопровода использован шихтованный статор асинхронной машины с  $z = 36$  пазами, диаметром расточки  $d = 0,125$  м и высотой  $l = 0,13$  м с заданными размерами паза.

Для обеспечения разнонаправленного движения металла теоретически определено соотношение токовых нагрузок двух- и четырехполюсной обмоток, которое для указанных размеров индуктора и модели кристаллизатора составляет 1/5. С учетом размера паза и при использовании обмоточного провода ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм (с учетом изоляционного покрытия его диаметр равен 0,89 мм) в пазу может разместиться 48 элементарных проводников [6]. В связи с полученным соотношением токовых нагрузок при последовательном соединении двух- и четырехполюсной обмоток в каждом пазу должно размещаться соответственно  $s_{n2} = 8$  и  $s_{n4} = 40$  проводников каждой обмотки.

Из соотношения  $z = 2 p m q$ , где  $z$  – количество пазов статора;  $p$  – количество пар полюсов обмотки;  $m$  – число фаз;  $q$  – число пазов обмотки на полюс и фазу, находим  $q = z / (2 \cdot p \cdot m)$ .

Число витков в фазе  $w = 2 p q (s_n / 2)$ .

Активное сопротивление обмоток:

двухполюсной

$$r_2 = \frac{2 (l + \pi d \cdot k_r / 2 p_2) w_2}{\sigma \cdot s_p}; \quad (1)$$

четырёхполюсной

$$r_4 = \frac{2 (l + \pi d \cdot k_r / 2 p_4) w_4}{\sigma \cdot s_p}, \quad (2)$$

где  $k_r = 1,1$  – поправочный коэффициент для ручной намотки;  $\sigma = 5 \cdot 10^7$  См – электропроводность проводников обмотки;  $s_p = 5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup> – сечение проводников.

Индуктивное сопротивление при заданной частоте тока  $f$ , согласно [6], следующее:

для двухполюсной обмотки

$$x_2 = 2 \mu \omega \left( \lambda_{n2} + q_2 \cdot 0,57 \frac{\pi d}{2 p_2 l} \right) \frac{l w_2^2}{p_2 q_2}, \quad (3)$$

для четырехполюсной обмотки

$$x_4 = 2 \mu \omega \left( \lambda_{n4} + q_4 \cdot 0,57 \frac{\pi d}{2 p_4 l} \right) \frac{l w_4^2}{p_4 q_4}, \quad (4)$$

где  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $p$  – число пар полюсов обмотки;  $l$  – длина магнитопровода машины;  $\lambda_{n2} = 1,1$ ,  $\lambda_{n4} = 2$  – пазовая проводимость двух- и четырехполюсных обмоток.

Полную мощность индуктора найдем, суммируя мощность, связанную с рассеянием магнитного поля в пазах и лобовых частях обмотки, и электромагнитные мощности каждой обмотки, найденные как радиальные составляющие вектора Умова-Пойнтинга:

$$S = S_1 + S_2 + S_4, \quad (5)$$

где комплексная мощность обмоток

$$S_1 = I^2 m (r_2 + r_4 + i(x_2 + x_4)); \quad (6)$$

$S_2$ ,  $S_4$  – электромагнитные мощности двух- и четырехполюсной обмоток.

По известной полной мощности найдем фазное напряжение обмотки:

$$U = |S| / m I. \quad (7)$$

В табл. 1 приведено сравнение экспериментальных и расчетных параметров двух- и четырехполюсной обмоток.

Таблица 1

Обмоточные данные	Четырехполюсн.		Двухполюсн.	
	Расч.	Экспер.	Расч.	Экспер.
$q$	3	3	6	6
$w$	240	240	48	48
$x$ , Ом	3,24	-	0,25	-
$r$ , Ом	4,57	4,4	1,33	1,0

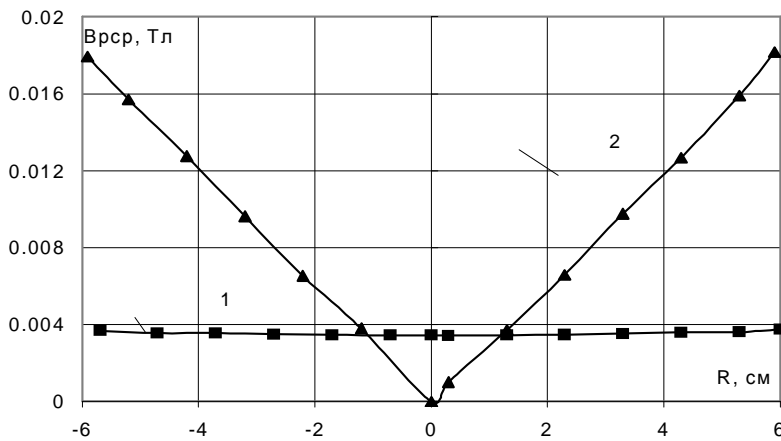


Рис. 1

На рис. 1 представлено экспериментальное распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля  $B_r$  в воздушном зазоре статора для двухполюсной (кривая 1) и четырехполюсной (кривая 2) обмоток, при питании током 3 А с частотой 50 Гц.

Из рисунка видно, что радиальная составляющая индукции магнитного поля двухполюсной обмотки пронизывает расточку статора, немного понижаясь к оси, а индукция четырехполюсной обмотки имеет максимальное значение на поверхности статора и равна нулю в центре. Этим и объясняется возможность создания противотоков в центральной и периферийной зонах слитка [4].

При помещении внутрь статора гильзы кристаллизатора (труба из нержавеющей стали диаметром 80 мм со стенкой 1 мм) измеренные значения электрических характеристик и индукции магнитного поля для четырехполюсной обмотки на частоте 50 Гц приведены в табл. 2. В таблице через  $B_1$  обозначено значение магнитной индукции в средней части расточки на поверхности индуктора, через  $B_2$  – на наружной поверхности гильзы,  $B_3$  – на внутренней поверхности гильзы.

При помещении внутрь статора гильзы кристаллизатора (труба из нержавеющей стали диаметром 80 мм со стенкой 1 мм) измеренные значения электрических характеристик и индукции магнитного поля для четырехполюсной обмотки на частоте 50 Гц приведены в табл. 2. В таблице через  $B_1$  обозначено значение магнитной индукции в средней части расточки на поверхности индуктора, через  $B_2$  – на наружной поверхности гильзы,  $B_3$  – на внутренней поверхности гильзы.

Таблица 2

Величина	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Среднее значение
Фазное напряжение $U$ , В	22,6	21	24,6	22,73
Фазный ток $I$ , А	3,2	2,95	3,4	3,18
Суммарная мощность $P$ , Вт	50	42	56	148
Диаметр, мм				80
Толщина стенки, мм				1
Индукция $B_1$ , Тл				0,02
Индукция $B_2$ , Тл				0,012
Индукция $B_3$ , Тл				0,01022

Из приведенных данных видно, что пустая гильза из нержавеющей стали оказывает незначительное влияние на величину магнитной индукции. Согласно данным о величине активной мощности при этом токе в обмотке можно будет судить о величине мощности, расходуемой на вращение жидкого металла.

При размещении в гильзе жидкого металла (в экспериментах использовался сплав Вуда, который по своим электромагнитным и гидродинамическим свойствам соответствует жидкой стали с температурой 1450 °С) под воздействием электромагнитного поля металл начинает двигаться.

Эксперимент проводился как при совместном действии магнитных полей двух- и четырехполюсной обмоток, так и исследовалось их раздельное действие на жидкий металл.

В табл. 3 приведены экспериментальные и расчетные данные по электромагнитному воздействию на жидкий металл четырехполюсной обмотки при различных значениях фазных токов на частоте 50 Гц.

Таблица 3

Величина	$I=4$ А		$I=6$ А	
	Экспериментально	Теоретически	Экспериментально	Теоретически
Фазное напряжение $U$ , В	30,73	33	45,5	47
Фазный ток $I$ , А	4,4	4,4	6,13	6,2
Суммарная мощность $P$ , Вт	263	265	585	529
Полная мощность $S$ , ВА	405,78	432	837,6	875,014
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,648	0,608	0,698	0,605
Индукция $B_1$ , Тл	0,027	0,0285	0,0402	0,0402
Индукция $B_2$ , Тл	-	0,0178	-	0,0251
Азим. скорость $V$ , м/с	-	0,39	-	0,78

Сопоставление экспериментальных и теоретических данных свидетельствует о их согласованности в части электромагнитных параметров – тока, напряжения, индукции магнитного поля.

В табл. 4 приведены экспериментальные и расчетные данные по электромагнитному воздействию на жидкий металл двухполюсной обмотки при различных значениях фазных токов на частоте 50 Гц.

Таблица 4

Величина	$I=4$ А		$I=6$ А	
	Экспериментально	Теоретически	Экспериментально	Теоретически
Фазное напряжение $U$ , В	5,13	6,1	7,8	9,5

Фазный ток $I$ , А	4,3	4,3	6,53	6,7
Суммарная мощность $P$ , Вт	54	73,7	148	179
Полная мощность $S$ , ВА	66,38	79	153,08	191
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,8135	0,937	0,967	0,937
Индукция $B_1$ , Тл	0,00422	0,00556	0,011261	0,0086
Индукция $B_2$ , Тл	-	0,00554	-	0,0086
Азим. скорость $V$ , м/с	-	0,16	-	0,39

В случае отдельного включения двухполюсной обмотки, как и для четырехполюсной, отметим удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных результатов в части определения электромагнитных характеристик.

Расчетное распределение скорости от радиуса для двух- и четырехполюсных обмоток при токе 4,4 А для данных табл. 3 и 4 показано на рис. 2, где обозначено: 1 – распределение скорости от радиуса для двухполюсной обмотки, 2 – распределение скорости от радиуса для четырехполюсной обмотки.

При включении двух- и четырехполюсной обмоток статора, включенных электрически последовательно, но встречно по направлению вращающихся магнитных полей, на трехфазный источник напряжения частотой 50 Гц экспериментальные и расчетные результаты приведены в табл. 5.

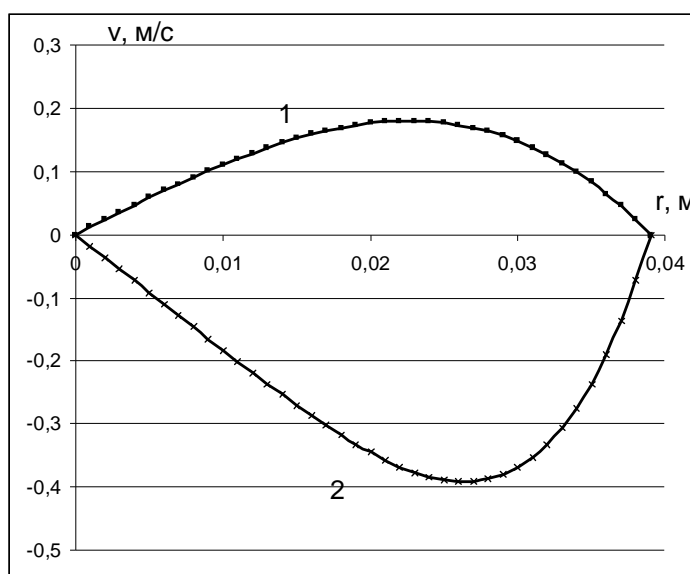


Рис. 2

Таблица 5

Величина	$I=4$ А		$I=6$ А	
	Экспериментально	Теоретически	Экспериментально	Теоретически
Фазное напряжение $U$ , В	35,83	37,9	54,3	54,6
Фазный ток $I$ , А	4,27	4,3	6,2	6,2
Суммарная мощность $P$ , Вт	335	327	775	684
Полная мощность $S$ , ВА	459,15	488	1010,9	1015,8
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,73	0,67	0,77	0,67
Индукция $B_1$ , Тл	0,0298	0,0279	0,041	0,0401
Индукция $B_2$ , Тл	-	0,0174	-	0,0251
Скорость $V$ , м/с	-	0,227	-	0,385

Расчетная кривая распределения линейной скорости по радиусу для случая совместного действия магнитных полей двух- и четырехполюсной обмоток с током 4 А изображена на рис. 3.

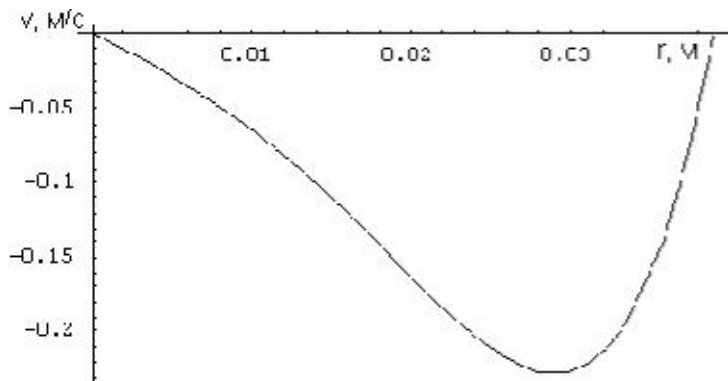


Рис. 3

зывает, что активная мощность электромагнитного перемешивателя при включении двух обмоток равна сумме мощностей при включении каждой обмотки отдельно, а скорость движения металла оказывается меньше, чем при включении лишь одной четырехполюсной обмотки. Однако характер движения металла оказывается иным. Судя по рис. 3 и визуальным наблюдениям, центральная зона жидкого металла вращается с относительно меньшей скоростью.

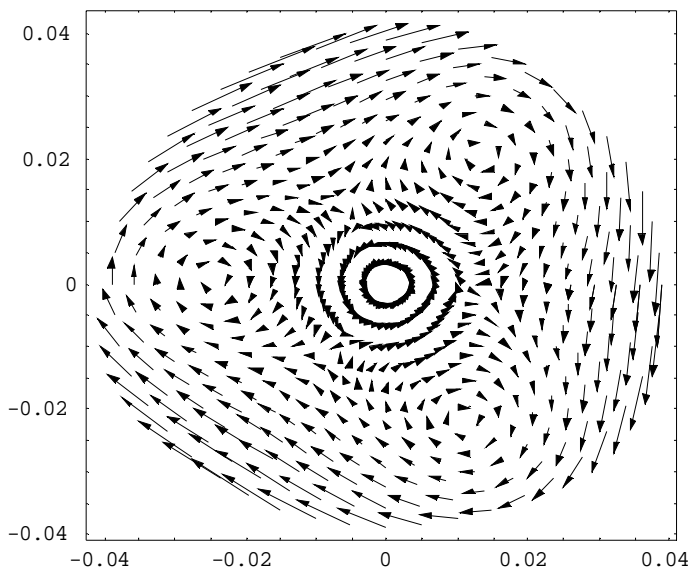


Рис. 4

зателей позволяет утверждать, что такое движение металла возможно.

Для успешной работы рассматриваемого электромагнитного перемешивателя целесообразно использовать независимое электропитание обмоток.

**Выводы.** Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов исследования двухобмоточного электромагнитного перемешивателя жидкого металла свидетельствует о высокой достоверности теоретических результатов расчета электромагнитных и электрических параметров ЭМП.

Для достижения необходимой по технологическим требованиям скорости движения металла на фронте кристаллизации двухобмоточный ЭМП потребляет большую мощность, чем классический однообмоточный.

Для уменьшения потребляемой мощности двухобмоточным ЭМП целесообразно размещать его в непосредственной близости от гильзы с жидким металлом.

Расчетное распределение электродинамических сил в поперечном сечении жидкого металла при совместном действии магнитных полей двух- и четырехполюсной обмоток с правильным выбором параметров обмоток для конкретного кристаллизатора представлено на рис. 4.

Анализ экспериментальных и расчетных результатов, полученных при одновременном включении двух- и четырехполюсной обмоток, показывает, что активная мощность электромагнитного перемешивателя при включении двух обмоток равна сумме мощностей при включении каждой обмотки отдельно, а скорость движения металла оказывается меньше, чем при включении лишь одной четырехполюсной обмотки. Однако характер движения металла оказывается иным. Судя по рис. 3 и визуальным наблюдениям, центральная зона жидкого металла вращается с относительно меньшей скоростью. Образование воронки не исключается, но время на ее образование увеличивается. Кроме того, визуально на поверхности мениска, особенно в начальный момент включения, наблюдаются вихревые образования, перемещающиеся по азимуту.

Следует указать также на несколько неудачный выбор соотношения числа витков двух- и четырехполюсной обмоток (1/5), что не позволило наблюдать встречные течения в центральной и периферийной зонах слитка. Такое отношение количества витков обмоток рассчитано для предполагаемой многополюсной модели с медной гильзой и частотой тока питания 5 Гц. Однако хорошее совпадение экспериментальных и расчетных показате-

1. Арно П., Миньо Ж.Ф., Бира Ж.П., Руэ Ж. Электромагнитное перемешивание по способу «Магнетогир» на МНЛЗ // Черные металлы. – 1980. – № 22. – С. 9–13.
2. Грачев В.Г., Шифрин И.Н., Сивак Б.А., Кузмина Л.И., Солодовник Ф.С. Электромагнитное перемешивание на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ // Сталь. – 2002. – № 11. – С. 21–26.

3. Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Метод расчета электродинамических сил в цилиндрических кристаллизаторах под действием комбинированных бегущих полей // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 5. – С. 56–62.
4. Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Расчет электромагнитного поля в цилиндрическом кристаллизаторе многообмоточного электромагнитного перемешивателя жидкого металла // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 4. – С. 61–65.
5. Маточкин В.А. Новые технические решения и этапы реконструкции МНЛЗ-3 на Белорусском металлургическом заводе // Сталь. – 2002. – № 10. – С. 26–28.
6. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для втузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

УДК 621.313

**Т.В. Віштак<sup>1</sup>**, пров. інж., **О.М. Карлов<sup>2</sup>**, пров. інж., **І.П. Кондратенко<sup>3</sup>**, докт. техн. наук, **А.П. Ращепкін<sup>4</sup>**, докт. техн. наук

1–4 – Ін-т електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Експериментальне дослідження перемішувача рідкого металу**

*Проведено експериментальні дослідження моделі двообмоткового перемішувача рідкого металу для кристалізатора МБЛЗ. Дослідження виконувалися при роздільному і спільному включенні дво- і чотиріполюсних обмоток. Виконано порівняння експериментальних даних з теоретичними результатами, отриманими за допомогою розрахункової методики. Бібл. 6, рис. 4, табл. 5.*

**Ключові слова:** багатообмотковий перемішувач рідкого металу, кристалізатор, параметри перемішувача.

**T.V. Vyshtak<sup>1</sup>**, **O.M. Karlov<sup>2</sup>**, **I.P. Kondratenko<sup>3</sup>**, **A.P. Rashchepkin<sup>4</sup>**

1–4 – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine

#### **Experimental research of stirrer of liquid metal**

*Experimental researches of two-winding stirrer model of liquid metal in continuous casting mold has been carried out. Researches carried out at separate and joint connection of two-pole and four-pole windings. Comparison of obtained experimental data with the theoretical results gained by means of a calculation method has been executed. References 6, figures 4, tables 5.*

**Key words:** multiwinding stirrer of liquid metal, continuous casting mold, parameters of stirrer of liquid metal.

Надійшла 21.07.2011

Received 21.07.2011