

УДК: 669.715.66.03

**В. Ю. Шейгам**, научн. сотр., e-mail: onmlptima@ukr.net

**Н. П. Исайчева**, гл. технолог, e-mail: onmlptima@ukr.net

**А. Г. Пригунова**, д-р техн. наук, зав. отделом, e-mail: adel\_nayka@ukr.net

**Л. К. Шеневидько**, научн. сотр., e-mail: onmlptima@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕВЕРСИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СПЛАВОВ В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

*В работе приведены результаты исследований по усовершенствованию механического перемешивания с использованием реверсивного режима. По итогам работ, проведенных методом физического моделирования, установлены оптимальные параметры перемешивания, позволяющие обеспечить повышение однородности и совершенствование структуры и свойств литых изделий.*

**Ключевые слова:** реверсивное перемешивание, физическое моделирование.

**П**еремешивание, как один из технологических приемов подготовки расплава перед поступлением его в форму, а в некоторых случаях и в процессе формирования отливки, часто является решающим фактором в достижении потребительских свойств детали. Его применяют для интенсификации массообменных процессов, повышения степени однородности расплава, удаления неметаллических включений, регулирования температуры, а также для изменения морфологии и дисперсности структуры в твердом состоянии.

В зависимости от решаемых задач перемешивание осуществляется с использованием различных приемов: технологических переливов, вибрацией, под действием магнитного поля, механическими мешалками, барботажем и пульсационными обработками и др. Однако, ни один из них не является универсальным. Поэтому выбор того или иного способа перемешивания зависит от технологических потребностей и конкретных технических возможностей.

Из существующих способов перемешивания жидких сплавов особое внимание уделяется механическому перемешиванию, внедрение которого в производство не требует дорогостоящего оборудования, значительных материальных затрат, характеризуется простотой реализации и надежностью контроля параметров процесса, хорошо вписывается в существующие технологии литейного производства.

Важнейшим параметром, определяющим производительность процесса подготовки расплава к заливке, является достижение высокой степени его гомогенизации при минимальном времени перемешивания, в течение которого достигается выравнивание температуры и состава расплавленного металла.

Для качественной обработки необходимо привести в движение каждый элемент расплава, что обеспечивает отсутствие застойных зон. При этом траектории движения потоков не должны быть замкнутыми, чтобы близко расположенные в начальный момент элементы не сближались, создавая в дальнейшем хаотичное движение по всему объему тигля. Гужий А. А., Мелешко В. В. показали [1], что наибольшая интенсивность перемешивания наблюдается в областях с хаотичным движением, в то время как области стационарных движений остаются островами, препятствующими процессу перемешивания. Подобные результаты получены и профессором Массачусетского технологического института США Джулио М. Оттино. По его мнению, двумерное периодическое движение вязкой жидкости может стать хаотичным, а это обеспечивает эффективное перемешивание [2].

Л. Н. Рашкович в 1996 г. в Соросовском образовательном журнале опубликовал статью «Как растут кристаллы в растворе» [3], в которой отмечает, что им разработаны методы, позволяющие получать растворы, выдерживающие без массовой кристаллизации огромное пересыщение, а также позволяют осуществлять рост кристаллов в режиме, близком к кинетическому процессу выращивания крупных кристаллов высокого оптического совершенства. Автор отмечает, что в числе параметров, от которых зависит значительный эффект, – реверсивное перемешивание раствора.

В работе [4] на основе теоретического анализа влияния метода перемешивания на интенсивность движения жидкого ядра отливки предложены и апробированы на физической модели способы прерывистого и реверсивного перемешивания кристаллизующегося металла. В результате автор дает предпочтение реверсивному перемешиванию.

Ранее в работе авторов [5] методом гидромоделирования с использованием «светового ножа» исследовано влияние длительности процесса перемешивания лопастной, дисковой и турбинной мешалкой на развитие внутренних потоков расплава в тигле при следующих переменных факторах: тип мешалки (лопастная, дисковая, турбинная (рис. 1); расстояние от дна тигля до уровня мешалки  $H$ : 42, 84, 126 мм; скорость вращения мешалки  $n$ : 200, 400 и 800 об/мин; наличие отражателей и их отсутствие.

Качество перемешивания оценивали в виде коэффициента:

$$K = \frac{\sum S_{\text{инп}}}{S_T},$$

где:  $\sum S_{\text{инп}}$  – суммарная площадь зон интенсивного перемешивания,  $S_T$  – площадь тигля в сечении «светового ножа»

Установлено (рис. 2), что наилучшими показателями по времени вовлечения всего объема жидкости в режим перемешивания обладает турбинная мешалка в присутствии отражателей. Время начала перемешивания всего объема жидкости такой мешалкой по сравнению с лопастной и дисковой сокращается в 4–5 раз, а наличие отражателей позволяет повысить количество оборотов перемешивания. Например, для турбинной мешалки количество оборотов может быть повышено с 400 до 800 об/мин без образования воронки.

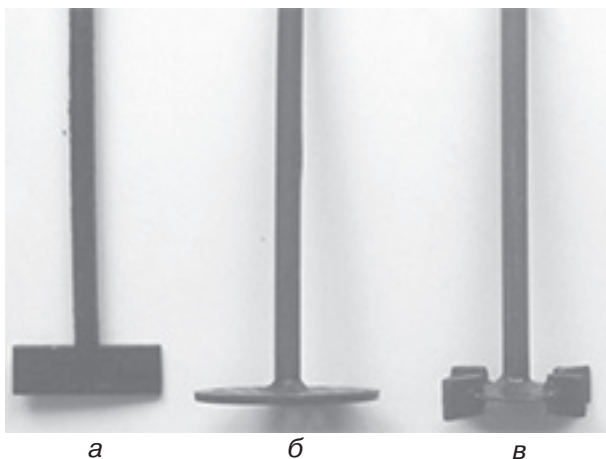


Рис. 1. Типы мешалок, используемых для натурных исследований: а – лопастная; б – дисковая; в – турбинная

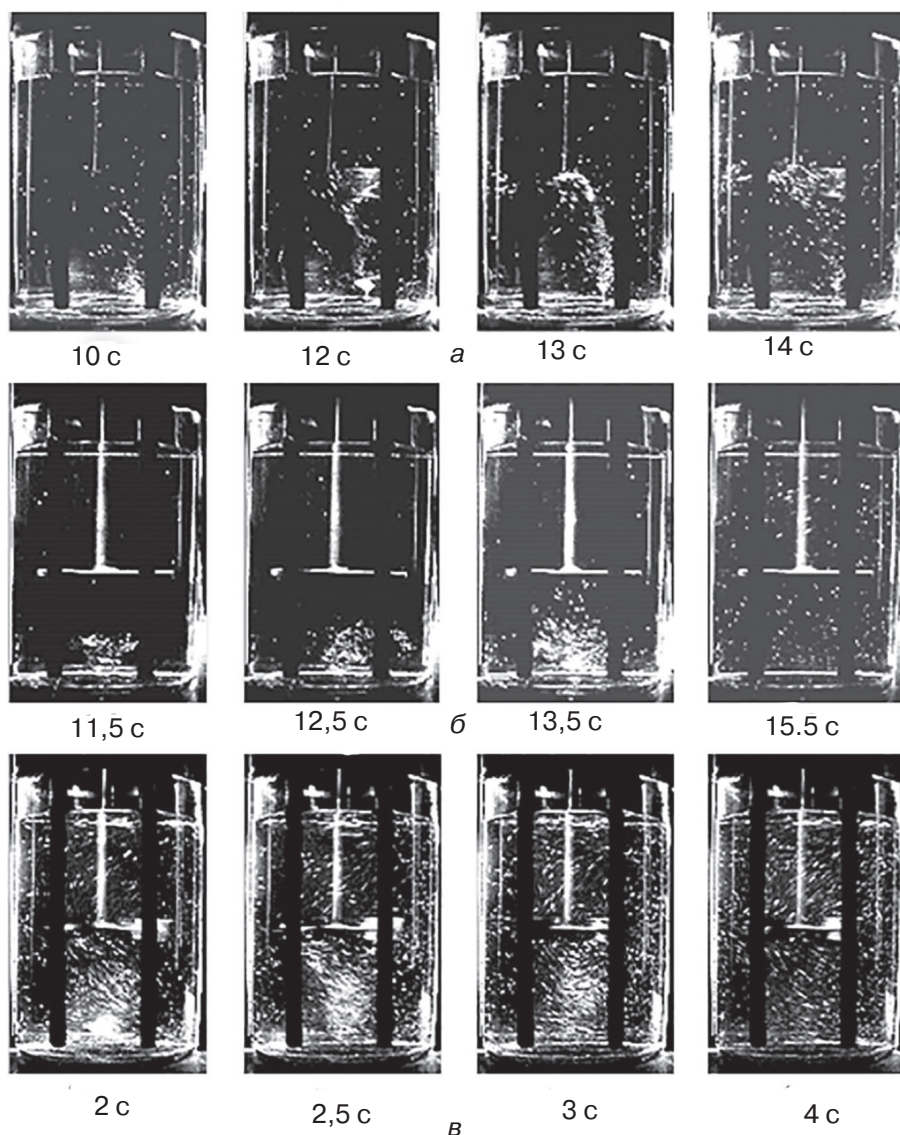


Рис. 2. Физическое моделирование динамики развития процесса перемешивания двухфазной жидкости в зависимости от типа мешалки при  $H = 84$  мм и  $n = 200$  об/мин: а – лопастная мешалка; б – дисковая мешалка; в – турбинная мешалка

Однако, этот вывод сделан без учета подготовки металла к заливке, заключающейся в том, что для работы отражателей необходимы дополнительные затраты энергии на поддержание их рабочей температуры. Кроме того, возникают трудности с обеспечением их стойкости в среде жидкого алюминиевого сплава. Вместе с тем, при отсутствии отражателей в перемешиваемом металле образуется воронка, которая может привести к дополнительному его окислению и выплеску из тигля. Внутренняя структура потока при этом характеризуется однонаправленной окружной циркуляцией.

Учитывая результаты этой работы по изучению влияния типа мешалки на процессы развития внутренних потоков в полости тигля и литературные данные, целью настоящего исследования является усовершенствование механического перемешивания с использованием попеременной направленности вращения, то есть реверсивного режима. Для этого использовали «турбинную» мешалку, позволяющую приводить в движение массы жидкого металла во всем объеме тигля.

## Гидродинамика процессов литья

Физическое моделирование процесса перемешивания проводили при сохранении геометрических размеров тигля и модели в масштабе 1:1. В качестве модельной жидкости использовали воду, а для визуализации потоков – полистироловые шарики диаметром 0,2 мм с плотностью, равной плотности воды, в количестве 5–8 %.

Процесс регистрировали с помощью фото- и видеосъемки (цифровая камера OLYMPUS CAMEDIA C-2040ZOOM). При просвечивании исследуемого сечения тигля узким (2–3 мм) световым лучом характер внутренних потоков жидкости фиксировали в виде движущихся с потоком светящихся в отраженном свете частичек полистирола.

Установка для перемешивания (рис. 3) включала в себя стеклянную модель тигля 1 высотой 210 мм и диаметром 110 мм, турбинную мешалку 2, лабораторный автотрансформатор 3 для регулирования скорости оборотов мешалки, «световой нож» 4, который представлял собой узкий световой луч, создаваемый с помощью двух вертикально установленных ламп накаливания, фотоаппарат 5. Вращение мешалки осуществляли с помощью реверсивного двигателя с прерывателем 6, количество оборотов контролировали с помощью тахометра Т4-10Р 7. Показания фотоаппарата с помощью компьютера 8 в дальнейшем использовали для видео- 9 и фотообработки 10.

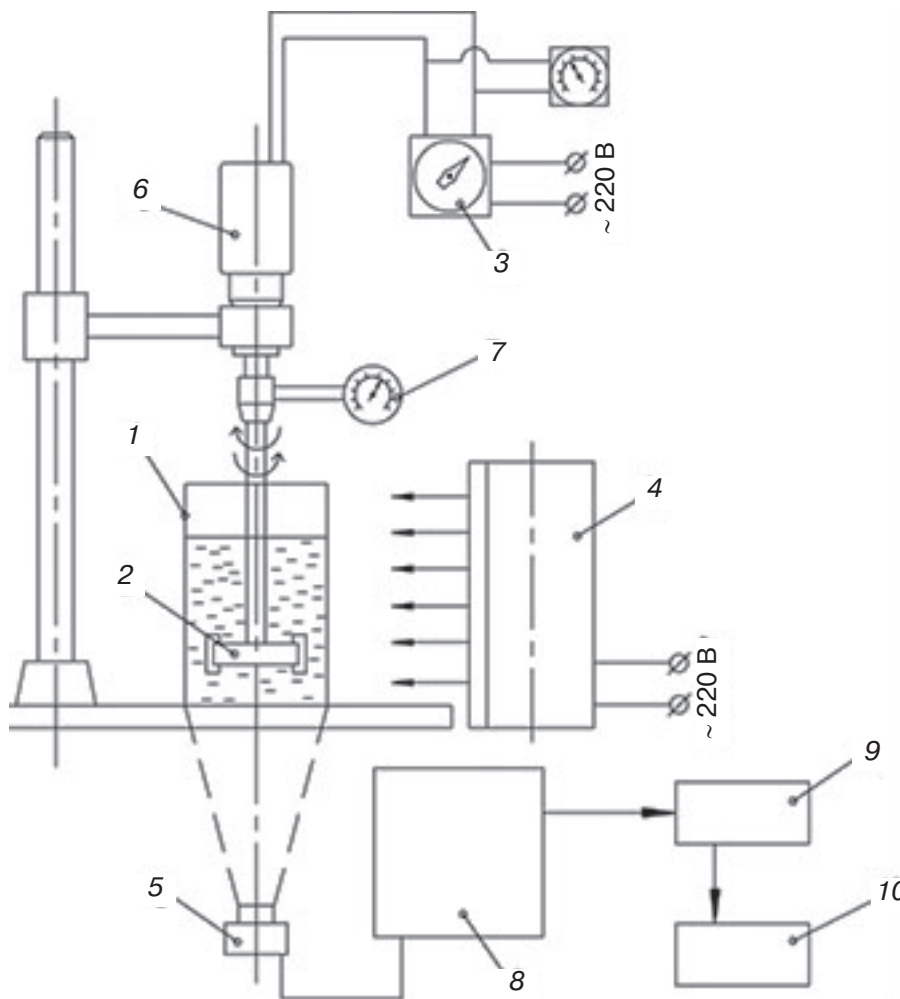


Рис. 3. Установка для перемешивания: 1 – тигель; 2 – мешалка; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – «световой нож»; 5 – фотоаппарат; 6 – реверсивный двигатель; 7 – тахометр; 8 – компьютер; 9 – видеообработка; 10 – фотообработка

Моделирование процесса перемешивания расплава проводили без отражателей с использованием турбинной мешалки, установленной на расстоянии от дна тигля 42 мм и 84 мм в реверсивных режимах 1/1, 3/3 и 5/5 (то есть один оборот в одну сторону – один оборот в другую сторону, три оборота в одну сторону – три оборота в другую сторону и т. д.) с регулированием частоты вращения 400 об/мин и 800 об/мин. Для сравнения эксперименты проводили как в реверсивном режиме, так и без него при всех прочих равных условиях.

Исходная фотограмма перемешивания турбинной мешалкой без реверса с частотой вращения  $n = 400$  об/мин при расстоянии ее от дна тигля ( $H$ ), равном 42, 84 и 126 мм, представлены на рис. 4. Из фотограммы видно, что структура потока носит циркуляционный характер независимо от величины  $H$ . При этом, чем меньше значение  $H$ , тем меньше глубина воронки, величина которой через определенный промежуток времени остается неизменной до окончания процесса перемешивания. Так, при  $H = 42$  мм воронка возникает через 4,3 с и глубина ее составляет 20 мм, а через 5,9 с глубина ее возрастает до 26,4 мм и далее остается постоянной.

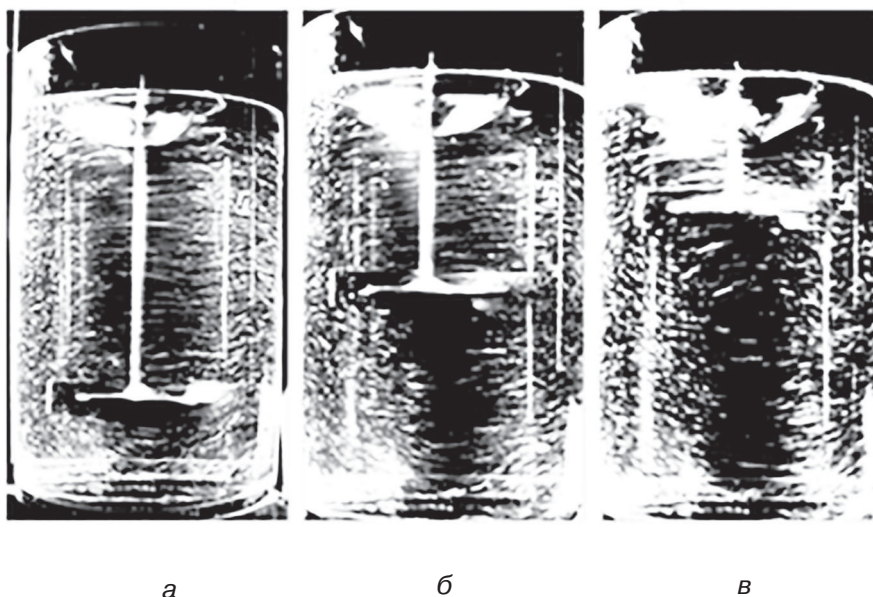


Рис. 4. Фотограмма процесса перемешивания в полости тигля с использованием турбинной мешалки без отражателей при  $n = 400$  об/мин: а –  $H = 42$  мм; б –  $H = 84$  мм; в –  $H = 126$  мм

При расстоянии мешалки от дна тигля 84 мм воронка возникает практически с момента начала перемешивания и глубина ее составляет 26,4 мм, а через 3,8 с ее глубина увеличивается до 39,6 мм и сохраняется вплоть до окончания процесса. Тем более, этот процесс ускоряется при  $H = 126$  мм.

Видеограммы процесса перемешивания в реверсивных режимах 1/1, 3/3 и 5/5 при  $H = 42$  мм,  $n = 400$  об/мин представлены на рис. 5–7, из рассмотрения которых видно, что соблюдение режима 1/1 (время цикла составляет 0,6 с) позволяет сохранять линию верхнего уровня жидкости тигля в пределах легкого колебательного движения на протяжении всего процесса перемешивания. При работе в реверсивном режиме 3/3 (время цикла составляет 1,1 с) и тем более в режиме 5/5 (время цикла составляет 4,1 с) возникают значительные колебания поверхности жидкости с образованием воронки.

Отличительная особенность и преимущество работы в реверсивном режиме в сравнении с режимом простого перемешивания (см. рис. 4) заключается в том, что структура внутренних потоков жидкости в тигле на протяжении всего процесса

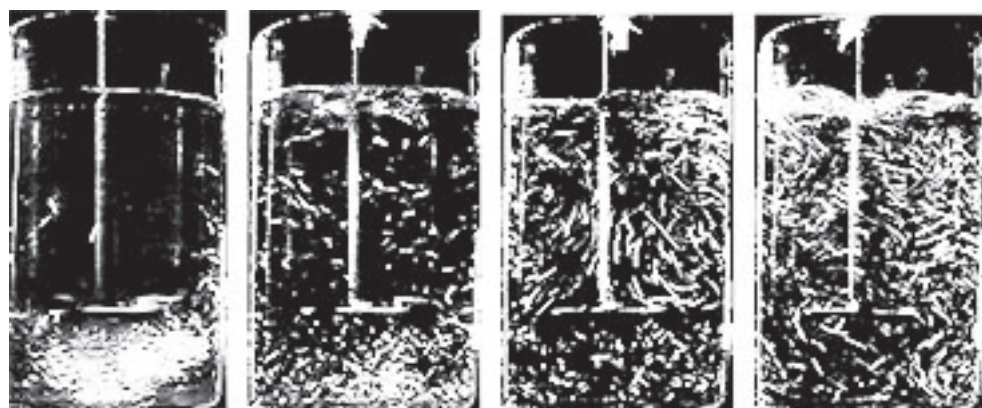


Рис. 5. Видеogramма процесса перемешивания турбинной мешалкой в режиме реверса 1/1,  $H = 42$  мм,  $n = 400$  об/мин

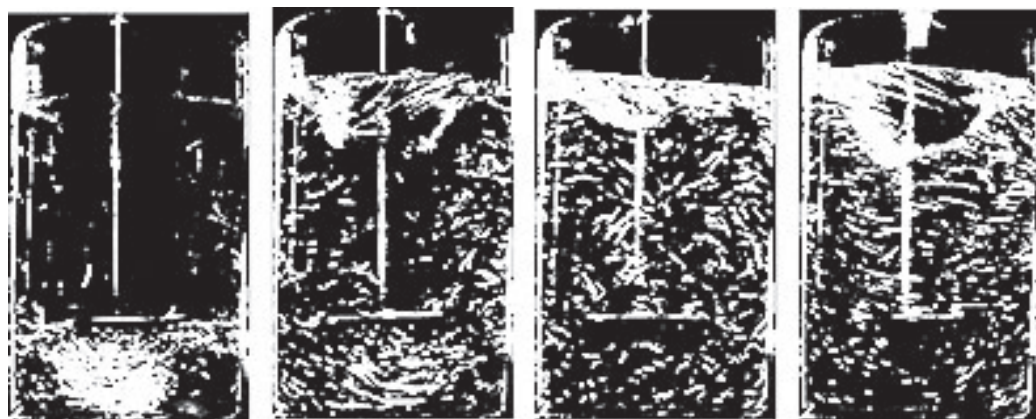


Рис. 6. Видеogramма процесса перемешивания турбинной мешалкой в реверса 3/3,  $H = 42$  мм,  $n = 400$  об/мин

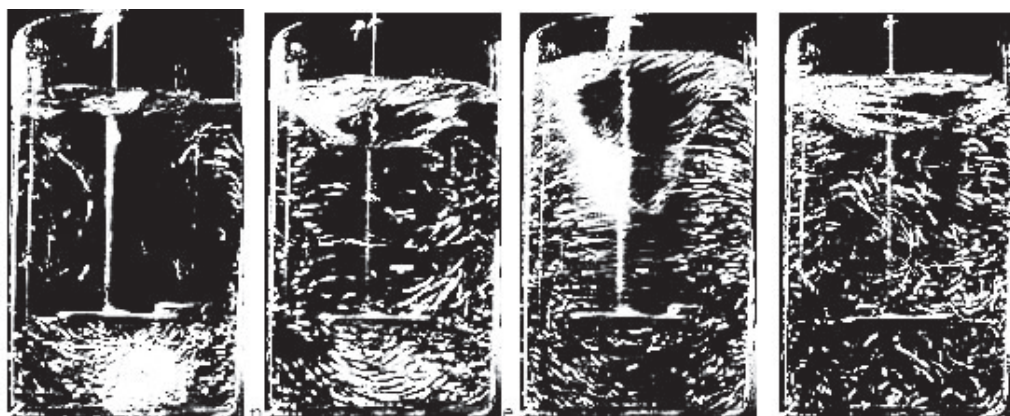


Рис. 7. Видеogramма процесса перемешивания турбинной мешалкой в режиме реверса 5/5,  $H = 42$  мм,  $n = 400$  об/мин

перемешивания, независимо от расстояния мешалки от дна тигля, характеризуется как цикличностью с образованием турбулентных зон циркуляции, так и струйных течений то в одном, то в другом направлениях, которые наблюдаются во всем объеме среды. В результате каждый ее элемент приведен в движение.

При увеличении расстояния мешалки от дна тигля до 84 мм в реверсивных режимах 1/1, 3/3, 5/5 ухудшаются условия гидродинамики развития внутренних потоков жидкости в тигле. Даже при реверсе 1/1 наблюдаются значительные колебания уровня жидкости, граничащие с образованием воронки (рис. 8). Замеченная тенденция тем более усиливается в режимах 3/3 и 5/5.

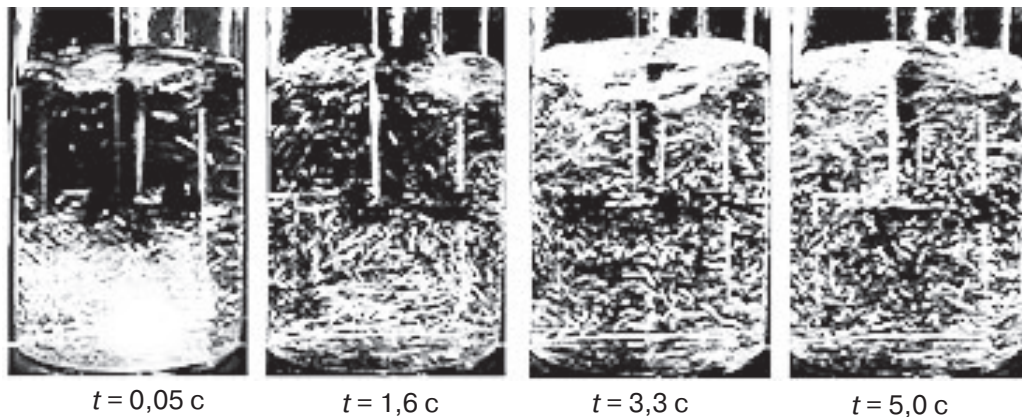


Рис. 8. Видеограмма процесса перемешивания турбинной мешалкой в режиме реверса 1/1,  $H = 84$  мм,  $n = 400$  об/мин

### Выводы

На основании проведенных исследований установлено, что наилучшее распределение частиц достигается при реверсивном перемешивании в режиме 1/1, при котором создаются встречные потоки, приводящие к высокой степени хаотичности движения, с одновременным процессом устранения воронки. Это позволяет рекомендовать его для внедрения в производство с целью повышения однородности и усовершенствовании структуры и свойств литых изделий.

### Список литературы

1. Институт гидромеханики Национальной Академии наук Украины. Отдел вихревых движений. – URL: [www.hydro-mech.kiev.ua/rus/ovd/nauch\\_dost.html](http://www.hydro-mech.kiev.ua/rus/ovd/nauch_dost.html).
2. Джжوليو И. Оттино. Перемешивание жидкостей. – URL: [www.bestrefesat.ru/referat.4948.html](http://www.bestrefesat.ru/referat.4948.html)
3. Рашкович Л. Н. Как растут кристаллы в растворе // Соросовский образовательный журнал: МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 1996. – № 3. – С. 18–20.
4. Жук В. И. Анализ способов перемешивания жидкого ядра затвердевающей отливки // В кн. «Вісник Приазовського державного технічного університету. Збірник наукових праць». Серія «Технічні науки». – Вып. 20. – С. 149–153.
5. Борисов Г. П., Шейгам В. Ю., Исайчева Н. П., Семенченко А. И., Недужий А. Н., Вернидуб А. Г. Оптимизация процесса перемешивания двухфазных алюминиевых сплавов // VII Международная научно-практическая конференция «Литье 2011». – Запорожье. – С. 42–43.

Поступила 28.08.2018

### References

1. Institut gidromechaniki Nacionalnoy Akademii nauk Ukrainy. Otdel vichrevykh dvizheniy. URL: [www.hydro-mech.kiev.ua/rus/ovd/nauch\\_dost.html](http://www.hydro-mech.kiev.ua/rus/ovd/nauch_dost.html) [in Russian].
2. Dsholio I. Ottino. Mixing of Liquids. URL: [www.bestrefesat.ru/referat.4948.html](http://www.bestrefesat.ru/referat.4948.html) [in Russian].

3. *Rashkovich, L.N.* (1996) How crystals grow in solution. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal* : MGU im. M.D.Lomonosova. Moskva, no. 3, pp.18–20 [in Russian].
4. *Zhuk, V.I.* Analysis of methods for mixing a liquid core of the hardening casting. V kn. «Visnyk Priazovskogo derzhavnogo technicheskogo universitetu. Zbirnyk naukovykh prats», Seriya «Technichni nauki». Vyr. 20, pp.149–153 [in Russian].
5. *Borisov, G.P., Sheigam, V.Y., Isaicheva, N.P., Semenchenko, A.I., Neduzhiy, A.N., Vernidub, A.G.* Optimization of the mixing process of two-phase aluminum alloys. VII Mezhdunarodnaja nauchno prakticheskaja konferentsiya «Litie 2011», Zaporozhje, pp. 42–43 [in Russian].

Received 28.08.2018

**В. Ю. Шейгам**, наук. співр., e-mail: onmlptima@ukr.net

**Н. П. Ісайчева**, гол. технолог, e-mail: onmlptima@ukr.net

**А. Г. Пригунова**, д-р техн. наук, зав. відділом, e-mail: adel\_nayka@ukr.net

**Л. К. Шеневідько**, наук. співр., e-mail: onmlptima@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

### ЭФЕКТИВНІСТЬ РЕВЕРСИВНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ СПЛАВІВ У РІДКОМУ СТАНІ

*У роботі приведено результати досліджень по вдосконаленню механічного перемішування з використанням реверсивного режиму. За підсумками робіт, що були проведені методом фізичного моделювання, встановлено оптимальні параметри перемішування, що дозволяють забезпечити підвищення однорідності і вдосконалення структури та властивостей литих виробів.*

**Ключові слова:** реверсивне перемішування, фізичне моделювання.

**V. Yu. Sheygam**, *Researcher*, e-mail: onmlptima@ukr.net

**N. P. Isaycheva**, *Chief Technologist*, e-mail: onmlptima@ukr.net

**A. G. Prigunova**, *Doctor of Engineering Sciences, Head of Department*, e-mail: adel\_nayka@ukr.net

**L. K. Shenevidko**, *Researcher*, e-mail: onmlptima@ukr.net

Physico-technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

### EFFECTIVENESS OF REVERSE MIXTURE OF ALLOYS IN A LIQUID STATE

*Results of study on improvement of mechanical stirring using reversible regime are presented in this paper. On the base of study used method of physical modeling optimal parameters of stirring that provides rise of homogeneity and improving of structure and properties of casted product were determined.*

**Keywords:** reversible stirring, physical modeling.