

Трегубенко Г. Н.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Установлено влияние разных факторов на процесс газовой выделенной водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов, в т. ч. на количество, размер и расположение газовых пор в отливках. Применение на практике установленных зависимостей дает возможность активно управлять процессом газовой выделенной и получать отливки с оптимальной газовой пористостью.

**Ключевые слова:** газовой выделение, водород, газовой пористость, кристаллизация, алюминий, отливка, газовой пузырь.

### 1. Введение

В настоящее время алюминиевые сплавы, благодаря их легкости, механическим свойствам, коррозионной устойчивости, технологичности и рециклируемости, находят широкое применение в машиностроении.

В результате выплавки и разлива алюминий взаимодействует с различными газами, что является причиной образования ряда дефектов. Основными из которых являются газовой пористость и неметаллические включения. Газы, экстрагированные из алюминия, состоят преимущественно из водорода [1]. Основным его источником является атомарный водород, образующийся при диссоциации водяного пара, адсорбируемого из воздуха, шихты, стенок тиглей или формы, а также его реакции с алюминием.

Газовой пористость значительно ухудшает механические и эксплуатационные свойства алюминия и его сплавов. Поэтому минимизация количества газовых пор и их размеров при производстве конструктивных алюминиевых сплавов является очень важной и актуальной задачей.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Возникновение газовой пористости в алюминиевых отливках объясняется резким изменением растворимости водорода при переходе алюминия с жидкого состояния в твердое. Поэтому водород в алюминиевых сплавах всегда считался вредной примесью и способам удаления водорода из алюминиевых расплавов посвящено большое количество работ как в Украине [2], так и за ее пределами [3–5]. Наряду с этим, начиная с середины XX века, начали появляться публикации, в которых отмечались те или иные аспекты положительного влияния водорода на процесс формирования отливок из алюминиевых сплавов [6]. Было отмечено, что всплытие пузырей водорода при кристаллизации способствует очищению расплава от неметаллических включений. Затем начали появляться сообщения, что в некоторых случаях газовой пузыри не ухудшают, а наоборот, позволяют улучшить механические и эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов [7, 8].

Подтверждением этому стало открытие нового класса литых пористых сплавов — газаров (газом армированный материал) [9, 10]. Газары обладают целым рядом замечательных свойств, в т. ч. повышенной теплоизоляцией, звукопоглощением, демпфированием удара. Они имеют прочность и пластичность намного превосходящие свойства ранее известных пористых материалов. Газары применяются как фильтры, самосмазывающиеся подшипники, распылители и смесители жидкостей и газов и т. п.

Таким образом, газовой выделение водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов может как негативно, так и позитивно влиять на процесс формирования отливок [11]. Так для конструктивных алюминиевых сплавов наличие газовой пористости резко ухудшает их механические и эксплуатационные свойства и даже приводит к браку, поэтому для ее полного или частичного предотвращения необходимо проведение ряда технологических мероприятий [2–5]. Для газаров, наоборот, выделение пузырей водорода при определенных условиях формирует отливки с необходимой пористой структурой и уникальными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками [9–11]. Поэтому для обеспечения оптимальной структуры отливок из алюминия и его сплавов необходимо знать какие факторы и как влияют на процесс газовой выделенной водорода.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объектом исследования* является процесс газовой выделенной водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов.

*Целью работы* является исследование влияния различных факторов на процесс газовой выделенной водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- Определить, какие факторы и как влияют на начало процесса газовой выделенной водорода и образования газовой пористости при кристаллизации отливок из алюминия и его сплавов.
- Определить влияние различных факторов на интенсивность процесса газовой выделенной и, соответственно, на количество и размер газовых пор.

**4. Материалы и методы исследований**

В качестве материалов исследований использовались алюминий и его сплавы. Методика проведения исследований базировалась на моделировании процесса газовыделения водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов.

**5. Результаты исследований процесса газовыделения водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов**

При анализе перераспределения водорода между жидкой и твердой фазами при кристаллизации алюминия и его сплавов в работе [12] показано, что содержание водорода в расплаве, прилегающем к межфазной границе, увеличивается по мере затвердевания:

$$[H]_{ф.к.} = \frac{([H]_0 - \chi[H]_{ТВ})^2}{(1 - \chi)^2 [H]_{ТВ}}, \quad (1)$$

где  $[H]_{ф.к.}$  и  $[H]_0$  – содержание водорода в расплаве на фронте кристаллизации и до начала затвердевания, мас. %;  $\chi$  – доля закристаллизовавшегося металла;  $[H]_{ТВ}$  – растворимость водорода в твердом металле при температуре солидус, мас. %. При этом если  $[H]_{ф.к.}$  превысит предел растворимости водорода в жидком металле ( $[H]_{Ж}$ ) на некоторое пересыщение  $[H]_{П}$ , то может начаться газоэвтектическое превращение и произойти образование новой (третьей) фазы – газовых пузырей (рис. 1). На основании уравнения (1) можно рассчитать критическую долю закристаллизовавшегося металла ( $\chi_{крит}$ ), при достижении которой может начаться газовыделение на фронте кристаллизации:

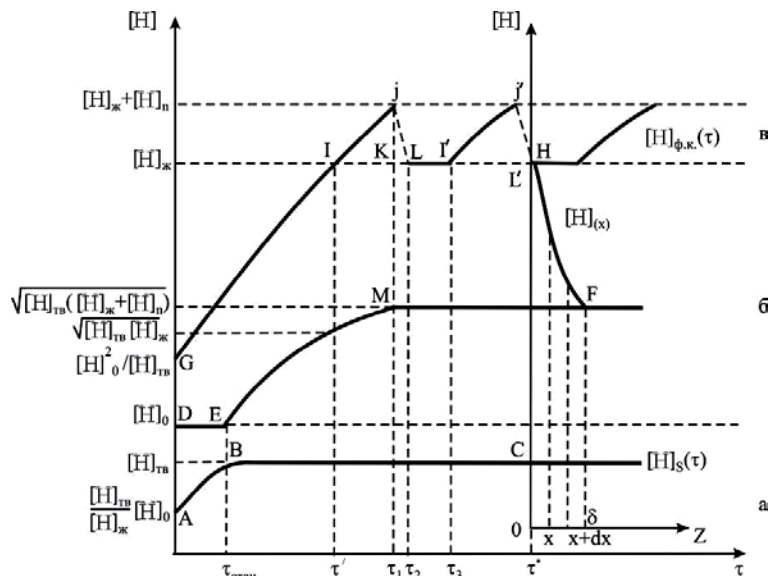
$$\chi_{крит} = \frac{\sqrt{[H]_{ТВ}([H]_{Ж} + [H]_{П}) - [H]_0}}{\sqrt{[H]_{ТВ}([H]_{Ж} + [H]_{П}) - [H]_{ТВ}}}. \quad (2)$$

Величина пересыщения расплава водородом зависит от условий, при которых происходит образование пузырька. Для начала газовыделения необходимо, чтобы равновесное давление водорода на фронте кристаллизации превысило величину противодействия, препятствующую образованию газовых пузырей:

$$\frac{[H]_{ф.к.}^2}{k_H^2} > P_{вн} + P_{мет} + P_{кап}, \quad (3)$$

где  $k_H$  – константа равновесия реакции растворения водорода в алюминии и его сплавах, мас. %/атм.<sup>0,5</sup>;  $P_{вн}$  – внешнее давление газовой фазы, атм.;  $P_{мет}$  – металло-статическое давление, атм.;  $P_{кап}$  – капиллярное давление, атм.

На рис. 1: *ABC* – изменение содержания водорода в твердой фазе с течением времени; *DEF* – изменение содержания водорода в объеме расплава с течением времени; *GJL* – изменение содержания водорода в расплаве, прилегающем к фронту кристаллизации с течением времени; *HF* – изменение локальной концентрации водорода на расстоянии  $x$  от фронта кристаллизации.



**Рис. 1.** Перераспределение водорода между тремя фазами при кристаллизации алюминия и его сплавов: *а* – распределение водорода в твердой фазе; *б* – распределение водорода в жидкой фазе; *в* – область выделения водорода в газовые пузыри

Учитывая, что  $P_{мет} = \rho_{ж}gh$  и  $P_{кап} = \frac{2\sigma}{R}$ , условие начала газообразования (3) можно представить в виде:

$$[H]_{ф.к.} = [H]_{Ж} + [H]_{П} > k_H \sqrt{P_{вн} + \rho_{ж}gh + \frac{2\sigma}{R}}, \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, см/с<sup>2</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность расплава, г/см<sup>3</sup>;  $h$  – высота столба жидкого металла над зародышем газового пузырька, см;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения металла, Н/см;  $R$  – радиус зародыша, см.

Минимальное пересыщение расплава водородом, при достижении которого начинается газовыделение, будет равно:

$$[H]_{П}^{мин} = [H]_{Ж} \left( \sqrt{P_{вн} + \rho_{ж}gh + \frac{2\sigma}{R}} - 1 \right). \quad (5)$$

Подставляя выражение (4) в (2) получим:

$$\chi_{крит} = \frac{\sqrt{[H]_{ТВ} k_H \sqrt{P_{вн} + \rho_{ж}gh + \frac{2\sigma}{R}} - [H]_0}}{\sqrt{[H]_{ТВ} k_H \sqrt{P_{вн} + \rho_{ж}gh + \frac{2\sigma}{R}} - [H]_{ТВ}}}. \quad (6)$$

Величину пересыщения расплава водородом, необходимую для начала газовой выделения, можно также выразить и через работу образования пузырька [13]:

$$[H]_{п} = \frac{A}{k^* V_{п}}, \quad (7)$$

где  $A$  — работа образования газового пузырька, Дж;  $k^*$  — коэффициент пропорциональности, Дж/(% см<sup>3</sup>);  $V_{п}$  — объем газового пузырька, см<sup>3</sup>.

Работу образования газового пузырька можно определить как разность конечной и начальной потенциальных энергий давления газа и жидкости и затратой энергии против действия сил поверхностного натяжения жидкости и адгезии кристаллизующегося металла:

$$A = -(P_{г} - P_{ж})V_{п} + \sigma S_{п} \left[ 1 - \frac{S_{а}}{S_{п}} (1 - \cos \theta) \right], \quad (8)$$

где  $P_{г}$  — давление газа внутри пузырька, атм.;  $P_{ж}$  — давление жидкости на пузырек, атм.;  $\theta$  — краевой угол;  $S_{а}$  — поверхность действия сил адгезии, см<sup>2</sup>;  $S_{п}$  — поверхность газового пузырька, см<sup>2</sup>.

Согласно формуле (8) пузырьки водорода возникают на поверхности твердой фазы с наименьшей затратой работы, а следовательно, с наибольшей вероятностью, в тех местах, где отношение  $S_{а}/S_{п}$  будет наибольшим. При любом значении краевого угла отношение  $S_{а}/S_{п}$  будет наибольшим во впадинах между растущими кристаллами при ячеисто-дендритном фронте кристаллизации и на поверхности неметаллических включений, поэтому именно в этих местах наиболее вероятно зарождение пузырьков водорода.

Угол прямой  $JL$  (рис. 1, в) зависит от скорости образования пузырька и при неизменных начальных условиях является постоянным. Причем, чем меньше минимальные размеры пузырька  $R_{п}^{\min}$ , тем меньшим должно быть время ( $\tau = \tau_2 - \tau_1$ ), предшествующее его зарождению. Поэтому, чем больше пересыщение водородом расплава на фронте кристаллизации и отношение  $S_{а}/S_{п}$ , а межфазное натяжение меньше тем, чем короче будет время, предшествующее зарождению пузырька, а участок  $KL$  на рис. 1 меньше.

Образовавшийся газовый пузырек всплывает не сразу, а может некоторое время удерживаться на фронте кристаллизации. При этом содержание водорода в расплаве на межфазной границе равно  $[H]_{ж}$  и не будет увеличиваться на участке  $LP$  (рис. 1), так как все «лишние» атомы водорода, выделившиеся при затвердевании, переходят в газовый пузырек, вызывая его рост. Чем дольше газовый пузырек удерживается на фронте затвердевания, тем участок  $LP$  больше.

Когда размер пузырька становится таким, что выталкивающая сила превысит силы, удерживающие его на фронте кристаллизации, пузырек всплывает. В работе [14] на основе теории капиллярности выводится следующая формула для диаметра отрывающегося пузырька:

$$D_{отр} = 0,02\theta \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_{ж} - \rho_{H}}}. \quad (9)$$

Принимая во внимание пульсацию  $[H]_{ф.к.}$ , в трехфазной зоне (рис. 1, в) следует ожидать постоянных изменений и содержания водорода в объеме расплава ( $[H]_{об}$ ), что казалось должно было бы привести к постоянным скачкам  $[H]_{об}$ . Но учитывая, что на фронте кристаллизации происходит одновременно, как и локальные пересыщения расплава водородом (линия  $IJ$ ), так и образование газовых пузырей (линия  $JL$ ), и их рост (линия  $LI'$ ), то это приводит к возникновению большого числа локальных диффузионных потоков атомов водорода, направленных в разные стороны и которые в среднем уравнивают друг друга и не приводят к изменению  $[H]_{об}$ .

В работе [13] была получена формула для определения времени  $\tau_{р.п.} = \tau_3 - \tau_2$  (рис. 1), соответствующего росту пузырька на межфазной границе:

$$\tau_{р.п.} = \frac{R_{пр.п.}^2 - R_{п}^{\min 2}}{2D_H [H]_{п}} [H]_{пуз}, \quad (10)$$

где  $\tau_{р.п.}$  — время роста газового пузырька, с;  $R_{пр.п.}$  — предельный размер пузырька, находящегося на фронте кристаллизации, см;  $[H]_{пуз}$  — концентрация водорода в пузырьке (в нашем случае ~100 %).

В этой же работе приводятся конкретные значения времени роста газового пузырька. Так при  $R_{п} = 0,01$  см оно составит от 0,5 до 3,1 с, а при 0,05 см — 13,2...78 с, соответственно.

Необходимо отметить, что по формуле (10) можно определить время жизни только одного газового пузырька, но реально на границе раздела фаз зарождается, растет и отрывается большое количество пузырей. Поэтому одним из важных параметров, характеризующих перераспределение водорода между тремя фазами при кристаллизации алюминия и его сплавов является интенсивность выделения водорода в газовые пузыри.

Интенсивность газовой выделения можно определить по формуле:

$$I_{H_2} = \frac{dV_H^в}{d\tau} = \frac{1}{\rho_H} \frac{dM_H^в}{d\tau}, \quad (11)$$

где  $I_{H_2}$  — интенсивность выделения водорода в газовые пузыри, см<sup>3</sup>/с;  $V_H^в$  и  $M_H^в$  — объем и масса выделившегося водорода, соответственно, см<sup>3</sup> и г;  $\rho_H$  — плотность водорода, г/см<sup>3</sup>.

Как уже отмечалось выше, масса выделившегося водорода в газовые пузыри равна массе перешедшего водорода из закристаллизовавшегося металла на фронт кристаллизации:

$$M_H^в = \frac{M_{закр}}{100\%} ([H]_{об}^{\max} - [H]_{тв}) = \frac{\rho_{тв} V_{закр}}{100\%} ([H]_{об}^{\max} - [H]_{тв}), \quad (12)$$

где  $[H]_{об}^{\max}$  — максимальное содержание водорода в объеме расплава, по достижению которого на фронте кристаллизации начинают выделяться пузыри, мас. %;  $M_{закр}$  и  $V_{закр}$  — масса и объем закристаллизовавшегося металла, соответственно, г и см<sup>3</sup>.

Максимальное содержание водорода в объеме расплава, соответствующее началу газовой выделению (рис. 1, б, точка  $M$ ), можно рассчитать по уравнениям, полученным в работе [12]:

$$[H]_{\text{ф.к.}} = \frac{[H]_{\text{об}}}{k}, \quad (13)$$

$$k = \frac{[H]_{\text{тв}}}{[H]_{\text{об}}} = \frac{[H]_{\text{тв}}(1-\chi)}{[H]_0 - \chi[H]_{\text{тв}}}, \quad (14)$$

где  $k$  — эффективный коэффициент распределения водорода.

Принимая во внимание, что  $[H]_{\text{ф.к.}} = [H]_{\text{ж}} + [H]_{\text{п}}$ , получим:

$$[H]_{\text{об}}^{\text{max}} = \sqrt{[H]_{\text{тв}}([H]_{\text{ж}} + [H]_{\text{п}})}. \quad (15)$$

Теперь подставим уравнение (15) в (12), а затем получившиеся выражение — в (11), считая  $[H]_{\text{п}}$  независящим от времени:

$$I_{\text{H}_2} = \frac{\rho_{\text{тв}}}{\rho_{\text{ж}} 100\%} \left( \sqrt{[H]_{\text{тв}}([H]_{\text{ж}} + [H]_{\text{п}})} - [H]_{\text{тв}} \right) \frac{dV_{\text{закр}}}{d\tau}. \quad (16)$$

Учитывая, что производная по времени объема закристаллизовавшегося металла есть не что иное, как объемная скорость затвердевания ( $v_{\text{об.кр.}}$ ), получим окончательную формулу для определения интенсивности газовой выделению:

$$I_{\text{H}_2} = \frac{\rho_{\text{тв}}[H]_{\text{тв}} v_{\text{об.кр.}}}{\rho_{\text{ж}} 100\%} \left( \sqrt{\frac{([H]_{\text{ж}} + [H]_{\text{п}})}{[H]_{\text{тв}}}} - 1 \right). \quad (17)$$

## 6. Обсуждение результатов исследования процесса газовой выделению водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов

Данное исследование является логическим продолжением ранее проведенного автором статьи моделирования процесса перераспределения водорода между жидкой и твердой фазами при кристаллизации алюминия и его сплавов [12].

На основании полученных в работе выражений можно достаточно просто определять влияние различных технологических и физико-химических параметров процесса производства отливок из алюминия и его сплавов (скорости кристаллизации, исходного содержания водорода в расплаве, степени пересыщения твердого раствора, величины внешнего давления газовой фазы и др.) на начало и интенсивность протекания газовой выделению при затвердевании металла.

Применение на практике установленных зависимостей дает возможность активно управлять процессом газовой выделению водорода при кристаллизации алюминия и его сплавов и получать отливки с оптимальной газовой пористостью.

Недостатком проведенного исследования является то, что при моделировании процесса газовой выделению водорода при затвердевании алюминия и его сплавов рассматривался наиболее простой и потому наиболее обсуждаемый в литературе вариант, когда фронт кристаллизации перемещается в неограниченном объеме расплава. Этот случай действительно имеет место, когда одновременно навстречу друг другу растут либо два зерна, либо две ветви одного дендрита и он будет правомерен до такого момента сближения фронтов кристаллизации, пока поля концентраций в расплаве не начнут взаимодействовать между собой. Это взаимодействие начинается, когда расстояние между фронтами затвердевания уменьшится до двойной толщины обогащенного водородом пограничного диффузионного слоя ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$  см). Поэтому в дальнейшем планируется усовершенствовать полученную модель процесса газовой выделению водорода при затвердевании алюминия и его сплавов с учетом изложенных выше особенностей.

## 7. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Определено, что для более позднего выделения водорода в газовой пузырь при затвердевании алюминия и его сплавов необходимо повышать степень пересыщения твердого металла водородом (увеличивая внешнее давление газовой фазы и скорость кристаллизации, вводя гидридообразующие элементы и т. п.), уменьшать исходное содержание водорода в расплаве (проводя дегазацию тем или иным способом), повышать плотность и поверхностное натяжение расплава, увеличивать работу образования зародыша газовой пузыря (применяя фильтрацию).

2. Установлено, что для снижения интенсивности выделения водорода в газовой пузырь при затвердевании алюминия и его сплавов необходимо уменьшать скорость кристаллизации и степень пересыщения расплава водородом.

3. Применение на практике полученных выражений позволяет:

- при производстве конструкционных алюминиевых сплавов оптимизировать технологический процесс с целью минимизации количества газовой пор и их размеров, а также получения закрытой газовой пористости даже после проведения термо- или механической обработки;
- при получении литых пористых алюминиевых сплавов (газаров) активно управлять процессом газовой выделению водорода при кристаллизации и получать отливки с необходимой газовой пористостью.

## Литература

1. Чернега, Д. Ф. Газы в цветных металлах и сплавах [Текст] / Д. Ф. Чернега, О. М. Бялик, Д. Ф. Иванчук. — М.: Металлургия, 1982. — 176 с.
2. Нестеренко, Т. М. Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної та вторинної сировини [Текст]: навч. пос. / Т. М. Нестеренко, О. М. Нестеренко, Г. О. Колобов, В. П. Грицай. — К.: Вища школа, 2007. — 207 с.
3. Напалков, В. И. Физико-химические процессы рафинирования алюминия и его сплавов [Текст]: монография / В. И. Напалков, С. В. Махов, Б. Л. Бобрышев, С. М. Моисеев. — М.: Теплотехник, 2011. — 490 с.

4. Simon, R. Untersuchungen zur entgasung von aluminium schmelzen — einfluss des rotordesigns auf die effektivitat der wasserstoffentfernung [Text] / R. Simon, R. Kendrick, A. Froscher, P. Evans // Giesserei Rdsch. — 2012. — Vol. 59, № 7–8. — P. 201–206.
5. Савченко, С. В. Первый в России опыт применения роторного Дегазатора SNIF®TD 1000 «Pugotek Inc.» при рафинировании вторичных алюминиевых сплавов [Текст] / С. В. Савченко, А. А. Плаксин, С. В. Усенко // Цветные металлы. — 2007. — № 4. — С. 117–120.
6. Афанасьев, В. К. Водород и свойства сплавов алюминия с кремнием [Текст] / В. К. Афанасьев, И. Н. Афанасьева, М. В. Попова. — Абакан: Хакасское изд-во, 1998. — 192 с.
7. Афанасьев, В. К. Применение водорода для получения необходимых свойств алюминиевых сплавов [Текст] / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, А. А. Ружило и др. // Материалы международной научно-технической конференции «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов». — Киев, 2005. — С. 243–245.
8. Котляровский, Ф. М. Влияние водородной обработки силуминовых расплавов на механические свойства отливок [Текст] / Ф. М. Котляровский, Г. П. Борисов, В. И. Белик и др. // Процессы литья. — 2004. — № 2. — С. 56–61.
9. Шаповалов, В. И. Легирование водородом [Текст] / В. И. Шаповалов. — Днепропетровск: Журфонд, 2013. — 385 с.
10. Таран, Ю. Н. Новые материалы [Текст]: уч. пос. / Ю. Н. Таран, С. И. Губенко, В. И. Большаков и др. — Днепропетровск: НМетАУ, Арт-Пресс, 2001. — 154 с.
11. Котляровский, Ф. М. О двойственной роли водорода в процессах формирования отливок из алюминиевых сплавов [Текст] / Ф. М. Котляровский, Г. П. Борисов // 50 лет Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС. — Киев: ФТИМС НАН Украины, 2008. — С. 423–461.
12. Трегубенко, Г. Н. Перераспределение водорода между фазами при кристаллизации алюминия и его сплавов [Текст]: зб. наук. пр. / Г. Н. Трегубенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». — 2015. — № 49(1158). — С. 21–26.
13. Походня, И. К. Газы в сварных швах [Текст] / И. К. Походня. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
14. Присняков, В. Ф. Кипение Текст / В. Ф. Присняков. — К.: Наукова думка, 1988. — 237 с.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗОВИДІЛЕННЯ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ АЛЮМІНІЮ І ЙОГО СПЛАВІВ

Встановлено вплив різних чинників на процес газовиділення водню при кристалізації алюмінію і його сплавів, у т. ч. на кількість, розмір і розташування газових пір у відливках. Застосування на практиці встановлених залежностей дає можливість активно управляти процесом газовиділення і отримувати відливки з оптимальною газовою пористістю.

**Ключові слова:** газовиділення, водень, газова пористість, кристалізація, алюміній, відливка, газовий пазир.

*Трегубенко Геннадій Николаевич, доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, кафедра електрометалургії, Національна металургічна академія України, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: gen.tregubenko@gmail.com.*

*Трегубенко Геннадій Миколайович, доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, кафедра електрометалургії, Національна металургічна академія України, Дніпропетровськ, Україна.*

*Tregubenko Gennady, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: gen.tregubenko@gmail.com*

УДК 629.3.017

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.56635

Ярошенко П. М.

## ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ МАНЕВРОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМБІНОВАНИХ НАЧІПНИХ МАШИНИХ АГРЕГАТІВ

*Досліджено маневрові властивості комбінованих начіпних агрегатів на прикладі ґрунтообробно-посівного машинного агрегату. Встановлено вплив різних показників маневреності на роботу агрегату в цілому. Визначені показники неоднозначно описують експлуатаційні параметри агрегату. Особливо це стосується параметрів поворотливості і керованості, які впливають на розміри поворотних смуг і прямолінійність сівби. Визначено параметри роботи агрегату під час виконання технологічної операції.*

**Ключові слова:** маневреність, поворотливість, стійкість руху, керованість агрегату, прохідність.

### 1. Вступ

Маневрові властивості машинних сільськогосподарських агрегатів відносяться до спеціальних експлуатаційних властивостей і характеризуються: поворотливістю, стійкістю та керованістю руху, прохідністю. Особливо маневрові властивості слід враховувати при виборі агрегатів для конкретних умов: малі ділянки та короткі гони; робота в теплицях; міжрядний обробіток технічних культур з малими захисними смугами; необхідність транспортування через залізничний переїзд,

місток, тобто можливість швидкого переведення агрегату в положення для тривалого транспортування тощо.

Поворотливість — це властивість агрегату переходити з прямолінійного на криволінійний рух та навпаки, тобто властивість колісного трактора здійснювати повороти із заданою кривизною траєкторії [1, 2].

Стійкість руху (поздовжня та поперечна) — це властивість агрегату зберігати сталий напрямок руху.

Керованість руху — це властивість трактора підкорятися діям механізатора для збереження заданого напрямку руху або змінювати його відповідно до