

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скворчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Яцерицын П. И. Эффективность магнитно-абразивной обработки. – Мн.: Наука і тэхніка, 1991. – 216 с.
2. Горохов, В. А. Технология обработки материалов. Мн.: Беларуская навука, 2000. – 439 с.
3. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
4. Каргалов Н. И. А. с. № 55509 СССР.
5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Гардарики, 2003. – 317 с.

## Аннотация

### **Интенсификация магнитно-абразивной обработки отверстий больших диаметров, применением двойной магнитной обработки**

Показано, что на основании проведенных теоретических исследований и моделирования технологического процесса магнитно-абразивной обработки установлена возможность его эффективного применения с использованием двойного полюсного наконечника при обработке отверстий и определены условия для достижения требуемых показателей качества и надежности деталей машин.

## Abstract

### **Intensification of magnetic-abrasive processing of large-diameter holes, using a double magnetic treatment**

It is shown, that on the basis of the lead theoretical researches and modelling of technological process a magnet-abrasive of processing the opportunity of its effective application with use of a double polar tip is established at processing apertures and conditions for achievement of demanded parameters of quality and reliability of details of machines are certain

УДК 721.785

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОЧВОРЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИФфуЗИОННЫМ НАМОРАЖИВАНИЕМ ПОГРУЖЕНИЕМ В РАСПЛАВ**

**Бетенья Г.Ф.**, к.т.н., доцент, **Анискович Г.И.**, к.т.н., доцент  
*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

Почворежущие элементы серийного изготовления относятся к быстроизнашивающимся деталям. Типовыми представителями таких деталей являются: долота и лемехи плугов, оборотные рыхлительные лапы культиваторов, зубья борон, полозковые сошники и черенковые ножи сеялок, ковшовые зубья мелиоративных экскаваторов и др. детали. Их ресурс, как правило, в 2-4 раза меньше средней наработки одного полевого сезона [1,2].

Функциональные свойства этих деталей неадекватны почвенным условиям республики. Особенно неэффективно их использование для обработки супесчаных и песчаных почв, засоренных гравелистыми частицами.

Ресурс почворезущих элементов (ПРЭ) в основном предопределяется износостойкостью рабочей части детали. Из-за износа изменяются её размеры и форма, утрачиваются функциональные качества. Повышение ресурса почворезущих элементов является одной из важных проблем современного сельскохозяйственного машиностроения и ремонтного производства. Необходимо, чтобы вновь осваиваемые почворезущие элементы имели ресурс в 2-4 раза выше, по сравнению с заменяемыми изделиями [2,3].

Многолетний опыт производства и использования серийных почворезущих элементов показал, что из-за сложности их формы, переменного сечения рабочей части, необходимости массового изготовления традиционные методы упрочняющей технологии либо неприемлемы (индукционная наплавка), либо являются малоэффективными (термическая обработка) [3]. Анализ возможных путей повышения долговечности деталей, работающих в абразивной среде показывает, что их активные части, испытывающие повышенное давление почвенной массы, могут быть защищены от действия абразивных частиц почвы путем нанесения на поверхность трения высоколегированных износостойких сплавов. Однако и износостойкие наплавки не всегда решают проблему повышения долговечности деталей. В первую очередь это связано с неправильным выбором технологии нанесения износостойких покрытий, ограниченными возможностями технологий, несоответствием применяемых материалов условиям работы деталей.

Одним из перспективных способов поверхностного модифицирования деталей, работающих в абразивной среде, является наплавка намораживанием с использованием жидких расплавов и твердых заготовок. Исследования особенностей взаимодействия присадочного материала с основным металлом показывают, что механизм сплавления при наплавке намораживанием имеет диффузионную природу и происходит без оплавления основы. Наплавленный намораживанием слой металла имеет заданные физико-механические свойства и химический состав, кристаллическое строение, высокую прочность сцепления с металлом заготовки. Способ обеспечивает получение высоких эксплуатационных свойств, дифференцированных по объему и поверхности и оптимально отвечающих условиям работы и характеру изнашивания деталей.

Цель работы состояла в разработке научно-технических основ повышения ресурса почворезущих элементов с использованием диффузионного намораживания износостойких покрытий на поверхностях трения почворезущих профилей.

Задачей исследования являлось обоснование технологических параметров, обеспечивающих формирование с монокристаллическим соединением слоя затвердевшего сплава требуемой толщины на деталях при их поверхностном модифицировании диффузионным намораживанием из расплава высокохромистого чугуна.

Сущность поверхностного модифицирования диффузионным намораживанием заключается в последовательном затвердевании сплава на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки, погруженной в расплав.

Из-за разности исходных температур расплава ( $T_1$ ) и заготовки ( $T_2$ ), (причем  $T_2 \ll T_1$ ), контактируемый локальный объем расплава с поверхностью заготовки охлаждается до температуры фазового перехода. Это позволяет при определённых температурно-временных условиях получать на поверхности заготовки, находящейся в расплаве, слой затвердевшего присадочного сплава соответствующей толщины. На рисунке 1 представлена принципиальная схема основных технологических операций, выполняемых при осуществлении диффузионного намораживания погружением заготовки в расплав.

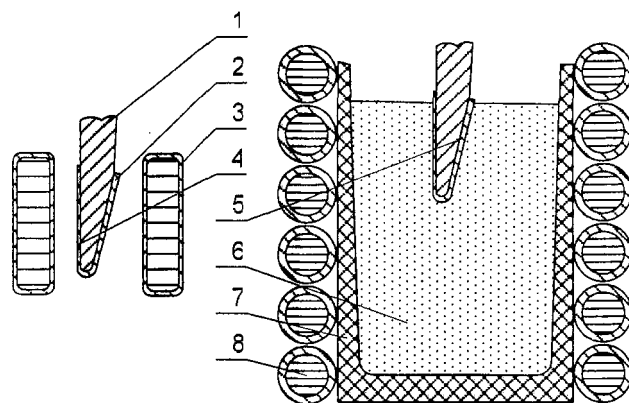


Рисунок 1 – Принципиальная схема диффузионного намораживания погружением заготовки в расплав присадочного материала: 1 – заготовка; 2 – флюс; 3 – индуктор закалочного генератора; 4 – теплоизоляционное покрытие; 5 – износостойкое покрытие (намораживаемый слой); 6 – расплав; 7 – тигель; 8 – индуктор плавильной установки

Из вышесказанного следует, что диффузионное намораживание представляет собой способ наращивания сплава (металла) на очищенную поверхность заготовки, кратковременно погруженную в перегретый расплав металлов. При этом активация наплавляемой поверхности заготовки осуществляется с применением флюсов и протекает при высокой температуре.

После активации, не допуская охлаждения, заготовка погружается в перегретый расплав и в течение определённого времени выдерживается в нём. Так как исходная температура заготовки ( $T_2$ ) значительно меньше температуры расплава ( $T_1$ ), то в результате теплообмена в контактируемом локальном объёме расплава с наплавляемой поверхностью заготовки достигается температура фазового перехода и происходит затвердевание (намораживание) слоя присадочного сплава.

Проведение активации поверхности заготовки перед её наплавкой необходимо для получения монолитного соединения присадочного сплава с основой. Известно, что расплав сохраняет способность смачивать твёрдую поверхность при определённой температуре. Минимальная температура определяется свойством последнего течь, т.е. его вязкостью. С ростом температуры расплава (при прочих равных условиях) эта способность к смачиванию возрастает. Однако излишний перегрев расплава при диффузионном намораживании не желателен. В результате повышенного перегрева в расплаве произойдёт интенсивное перемешивание, что, в свою очередь, повлечет за собой интенсивный размыв стенок тигля и быстрый выход его из строя.

Активация поверхности заготовки перед диффузионным намораживанием является исключительно ответственной операцией в обеспечении прочного соединения между наплавленным и основным металлами. С применением этой операции обеспечивается качественное удаление оксидной пленки с наплавляемой поверхности. Флюс, наряду с удалением оксидной плёнки, должен защищать поверхность от последующего окисления. Температура активации в значительной мере определяется свойствами применяемого флюса, требованиями, предъявляемыми к флюсу. Последние можно сформулировать в следующем порядке:

- флюс должен качественно удалять оксиды и хорошо растекаться по поверхности, образовывать сплошной слой, защищающий её от последующего окисления;
- температура флюса должна быть минимальной, а температура испарения превышать температуру расплавленного металла;

- флюс должен уменьшать поверхностное натяжение расплавленного металла, отделяться при погружении заготовки в расплав, способствовать полному смачиванию расплавом поверхности заготовки;

- флюс должен быть экологически чистым.

Наиболее полно данному комплексу требований отвечают флюсы на основе буры и борного ангидрида. Эти обстоятельства позволяют рекомендовать их при диффузионном намораживании деталей из конструкционных сталей.

В соответствии с технологическим процессом диффузионного намораживания флюс на поверхности заготовки перед погружением в расплав находится в расплавленном состоянии при температуре последней. Отделение слоя флюса с наплавляемой поверхности и обеспечение смачивания её расплавом должно протекать по мере погружения заготовки в расплав. В противном случае металл будет смачивать не отделившийся флюс, на котором и произойдёт затверждение сплава. По наличию смачивания расплавом наплавляемой поверхности и затвердевания на ней слоя сплава при наплавке намораживанием можно выделить три наиболее характерные сочетания: область смачивания и затвердевания; область смачивания без затвердевания; область затвердевания без сплавления затвердевшего слоя с основой.

Наличие отмеченных областей, присущих процессу диффузионного намораживания, обуславливается комплексным влиянием температурно-временных факторов исходных температур заготовки и расплава, времени пребывания заготовки в расплаве. Реализации процесса наплавки намораживанием соответствует область смачивания и затвердевания. В этой области выполняются условия отделяемости флюса от поверхности заготовки по мере погружения её в расплав с заданной скоростью. В результате этого создаётся возможность вступления расплава в непосредственный контакт с наплавляемой поверхностью. Во-вторых, наличие слоя затвердевшего сплава предполагает выполнение в этой области условия затверждения перегретого сплава.

Обеспечение смачивания является необходимым условием получения прочного монолитного соединения затвердевшего сплава с основой. Реализация условий затвердевания способствует при определённой продолжительности процесса получению соответствующей толщины слоя затвердевшего сплава. Эти два явления при наплавке намораживанием протекают одновременно. И, как показали исследования, при нарушении хотя бы одного из указанных условий (смачивания или затвердевания) процесс наплавки невозможен.

Таким образом, можно заключить, что наращивание деталей диффузионным намораживанием сопряжено с реализацией двух основных взаимосвязанных задач: во-первых, нужно получить металлопокрытие необходимой толщины с высокими физико-механическими и служебными свойствами; во-вторых, обеспечить прочное соединение наплавленного сплава с основой.

На основании экспериментального исследования, теоретического анализа и производственной проверки автором определены температурные и временные области получения металлопокрытий диффузионным намораживанием. Установлено, что смачиваемость и затвердевание сплава, а также сохранение затвердевшего слоя при диффузионном намораживании реализуются только при определенном сочетании исходных температур перегрева расплава, активации и продолжительности выдержки заготовки в расплаве. Выявлено также, что с увеличением перегрева расплава при неизменной исходной температуре заготовки, или с ростом температуры активации при постоянной исходной температуре расплава толщина слоя затвердевшего сплава уменьшается. При одинаковой разности между различными начальными значениями температуры расплава и заготовки, большие значения толщины слоя затвердевшего сплава соответствуют условиям, когда выше запас энтальпии заготовки.

Процесс теплообмена в системе расплав – флюс – заготовка начинается с момента их взаимного соприкосновения. Присадочный сплав вытесняет флюс с наплавляемой поверхности и смачивает её. Опираясь на теоретические основы затвердевания отливок, для условий диффузионного намораживания погружением в расплав можно составить следующее уравнение теплового баланса

$$Q_2 = Q_{пер} + Q_3, \quad (1)$$

где  $Q_2$  – количество теплоты, отводимое от расплава заготовки, Дж;

$Q_{пер}$  – количество теплоты перегрева массы расплава, участвующего в теплообмене, Дж;

$Q_3$  – количество скрытой теплоты затвердевания, выделившейся в результате затвердевания сплава, Дж.

Как показали экспериментальные исследования, затвердевание (намораживание) локального объёма перегретого расплава протекает при установившейся на наплавляемой поверхности температуры затвердевания наплавляемого сплава ( $T_{1сол}$ ). Следовательно, при диффузионном намораживании первоначально возникает в заготовке разность температур  $T_{1сол} - T_2$ , а в расплаве –  $T_1 - T_{1сол}$ . Эта разность будет сохраняться до тех пор, пока тепло не проникнет во всю толщину заготовки. При известной установившейся температуре на наплавляемой поверхности, согласно общей теории теплопроводности [4], количество теплоты, отводимое заготовкой от расплава может быть определено отдельно для каждой из стадий прогрева пластины. На первой стадии процесса диффузионного намораживания через наплавляемую поверхность площадью  $S$ , количество аккумулированной заготовкой теплоты может быть определено по формуле

$$Q_{2(I)} = \frac{2b_2}{\sqrt{\pi}} S \cdot (T_{1сол} - T_2) \sqrt{\tau_1} \quad (2)$$

где  $Q_{2(I)}$  – количество теплоты, отводимой от расплава плоской заготовкой на первой стадии её прогрева, Дж;

$b_2$  – коэффициент тепловой аккумуляции материала заготовки,  $\text{Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;

$S$  – площадь наплавляемой поверхности заготовки,  $\text{м}^2$ ;

$T_{1сол}$  – температура солидуса намораживаемого сплава,  $\text{К}$ ;

$T_2$  – исходная (первоначальная) температура нагрева заготовки,  $\text{К}$ ;

$\tau_1$  – продолжительность нагрева заготовки в расплаве в период первой стадии, с.

Количество теплоты, отводимой от расплава плоской заготовкой, на второй стадии её прогрева может быть определено из следующей зависимости [4]

$$Q_{2(II)} = Q_0 \left\{ 1 - 0,615 \exp \left[ -2,6 (F_{0II} - 0,12) \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $Q_0$  – количество теплоты, необходимое для нагрева плоской заготовки толщиной  $X$  по всему объёму от  $T_2$  до  $T_{1сол}$ , Дж;

$F_{0II}$  – критерий Фурье.

Количество теплоты, требуемое для нагрева плоской заготовки толщиной  $x$  по всему объёму от первоначальной температуры  $T_2$  до температуры солидуса намораживаемого сплава  $T_{1сол}$  определяется из выражения

$$Q_0 = S X \rho_2 c_2 (T_{1сол} - T_2), \quad (4)$$

где  $\rho_2$  – плотность материала заготовки  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c_2$  – удельная теплоёмкость материала заготовки,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

Как показывают практические расчеты и рекомендации [4], выражение в фигурных скобках уравнения (3) является громоздким. Можно считать обоснованным его замену на выражение  $\text{erf} \sqrt{F_{\text{оп}}}$ , так как она не вносит существенных различий в конечные численные результаты. С учетом этого, уравнение (3) можно записать в следующей форме

$$Q_{2(\text{II})} = Q_0 \text{erf} \sqrt{F_{\text{оп}}} \quad (5)$$

Количество теплоты перегрева, аккумулированное заготовкой от расплава через поверхность контакта  $S$ , можно определить по формуле

$$Q_{\text{пер}} = \frac{2b_1}{\sqrt{\pi}} S (T_1 - T_{\text{исх}}) \sqrt{\tau} \quad (6)$$

где  $b_1$  – коэффициент тепловой аккумуляции материала расплава (без учета конвекции),  $\text{Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;

$T_1$  – исходная температура расплава, К;

$\tau$  – продолжительность процесса диффузионного намораживания, с.

Известно, что скрытая теплота затвердевания, выделившаяся при намораживании сплава, прямо пропорциональна объёму появившейся твёрдой фазы. Её величину можно представить уравнением

$$Q_{\text{сп}} = \rho_1 \ell_1 S \xi \quad (7)$$

где  $\ell_1$  – удельная скрытая теплота затвердевания сплава, Дж/кг;  $\rho_1$  – плотность сплава в твёрдом состоянии вблизи температуры затвердевания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\xi$  – толщина слоя затвердевшего сплава за время процесса диффузионного намораживания, м.

Анализ уравнений (2) и (3) свидетельствует, что процесс диффузионного намораживания сопровождается приращением энтальпии заготовки в результате ее нагрева в расплаве. Таким образом, по мере пребывания заготовки в расплаве количество теплоты, недостающей для её нагрева до определённой (предельной) температуры, уменьшается. Графически это можно представить следующим образом (рисунок 2).

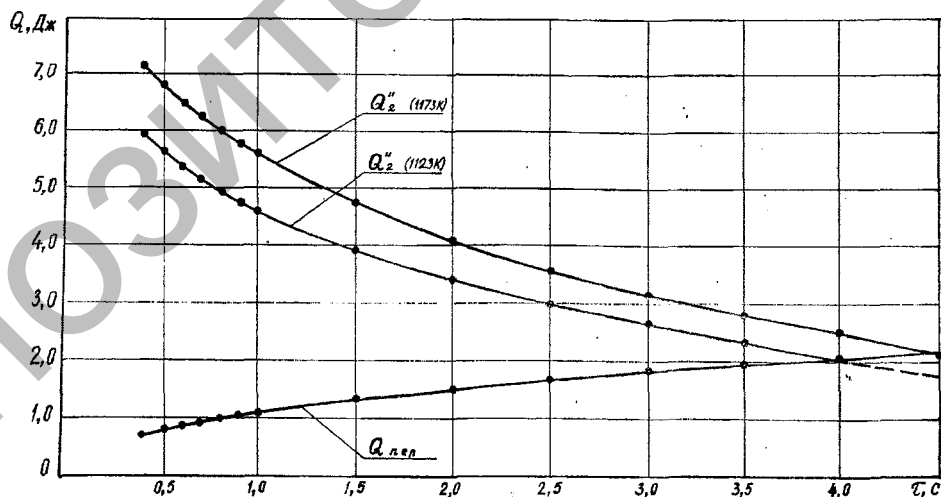


Рисунок 2 – Изменение энтальпии заготовки и аккумулированной ею от расплава теплоты перегрева при диффузионном намораживании

На графике видно, что с истечением некоторого времени имеет место пересечение кривых, с одной стороны, характеризующих изменение  $Q_2$ , а с другой – количество акку-

мулированной заготовкой теплоты перегрева расплава  $Q_{пер}$ . Пересечение кривых на графике соответствует условиям достижения предельной температуры заготовки и окончания процесса намораживания.

Наращивание слоя затвердевшего сплава при диффузионном намораживании происходит последовательно. Для наиболее характерных условий диффузионного намораживания изделий с плоской режущей частью, установлена количественная оценка толщины слоя затвердевшего сплава. Опытные значения толщины слоя затвердевшего сплава, соответствующие определённому времени первой стадии нагрева образца в расплаве, аппроксимируются зависимостью

$$\xi_1 = 1,128 \sqrt{\tau_1} \frac{b_2(T_{1сол} - T_2) - b_1(T_1 - T_{1сол})}{\ell_1 \rho_1}, \quad (8)$$

где  $b_1, b_2$  – коэффициенты аккумуляции тепла соответственно материала расплава и образца,  $Вт \cdot с^{0,5} / м^2 \cdot К$ ;

$T_1, T_2$  – начальная температура соответственно расплава и образца,  $К$ ;

$T_{1сол}$  – температура солидуса сплава,  $К$ ;

$\ell_1$  – удельная скрытая теплота затвердевания сплава,  $Дж/кг$ ;

$\rho_1$  – плотность сплава в твердом состоянии,  $кг/м^3$ ;

$\tau_1$  – время, соответствующее первой стадии прогрева образца,  $с$ .

Толщина слоя затвердевшего сплава, соответствующая определённому времени второй стадии прогрева образца в расплаве, аппроксимируется формулой

$$\xi_2 = \frac{xc_2 \rho_2 \Delta T_2 \operatorname{erf} \sqrt{F_{0II}} - 1,128 b_1 \Delta T_1 \sqrt{\tau_2}}{\ell_1 \rho_1}, \quad (9)$$

где  $x$  – толщина стальной плитки,  $м$ ;

$c_2$  – удельная теплоемкость материала образца,  $Дж/кг \cdot К$ ;

$\rho_2$  – плотность материала образца,  $кг/м^3$ ;

$\Delta T_1, \Delta T_2$  – разность температур соответственно,  $T_{1сол} - T_2$  и  $T_1 - T_{1сол}$ ,  $К$ ;

$\tau_2$  – время соответствующее второй стадии прогрева образца,  $с$ ;

$F_{0II}$  – критерий Фурье.

Представление результатов толщины затвердевшего слоя в виде аппроксимирующих формул, устанавливающих функциональную связь между относительно зависимыми и независимыми переменными и критериями подобия, позволяет распространить эти результаты на группу физически подобных процессов. С учётом этого можно полагать, что формулы (8) и (9) являются приближенной обобщенной математической моделью процесса диффузионного намораживания погружением заготовки в расплав. Они могут быть использованы технологами в инженерных расчетах при определении толщины слоя затвердевшего сплава в ходе диффузионного намораживания.

Из анализа формул (8) и (9) также следует, что параметры, влияющие на толщину слоя затвердевшего сплава при диффузионном намораживании, можно подразделить на две группы. К первой группе относятся теплофизические характеристики материалов заготовки и расплава; коэффициент тепловой аккумуляции, удельная скрытая теплота кристаллизации, толщина стенки и плотности металла. Ко второй группе относятся: исходная температура расплава и заготовки; продолжительность взаимного контактирования заготовки с расплавом. Параметры второй группы являются управляемыми. Их числовые зна-

чения можно задавать в определённом интервале. Интервалы их оптимальных значений устанавливаются в ходе экспериментальных исследований.

Исследования поверхностного модифицирования почворезущих элементов диффузионным намораживанием погружением в расплав показали, что основными технологическими параметрами обеспечения монолитного соединения в зоне сплавления и формирования намораживаемого металлопокрытия являются: обеспечение и наличие физически чистой наплавляемой поверхности заготовки; определенная исходная температура расплава; вязкость флюса; соответствие скорости истечения флюса и скорости погружения заготовки в расплав; время пребывания заготовки в расплаве. Установлено, что при диффузионном намораживании плоской заготовки погружением в расплав, толщина слоя затвердевшего сплава зависит от исходной температуры расплава ( $T_1$ ) и флюсования ( $T_2$ ), теплофизических характеристик материала заготовки ( $b_2, c_2, \rho_2$ ) и расплава ( $b_1, c_1, \rho_1$ ) толщины заготовки ( $2X$ ) и продолжительности процесса ( $\tau$ ). Результаты исследования рекомендуются для прогнозирования применения диффузионного намораживания в конкретных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: Фролов К.В. и др. М.: Машиностроение. Сельскохозяйственные машины и оборудование. Т.IV-16 / И.П.Ксенович, Г.П.Варламов, Н.Н.Колчин и др.; под ред. И.П.Ксеновича. 2002. – 720 с.
2. Панов И.М., Черепахин А.Н. Технический уровень почвообрабатывающих и посевных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины, -- 2000. №8 и №9.
3. Бетень Г.Ф. Повышение долговечности почворезущих элементов сельскохозяйственной техники наплавкой намораживанием. – Мн.: БелНИИТИ, 1986. – 44 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. 1967. – 600 с.

#### Аннотация

##### **Математическая модель поверхностного модифицирования почворезущих элементов диффузионным намораживанием погружением в расплав**

В статье обоснованы технологические параметры поверхностного модифицирования деталей диффузионным намораживанием погружением в расплав, влияющие на толщину слоя затвердевшего сплава, и разработана математическая модель процесса, которая может быть использована для прогнозирования применения диффузионного намораживания в конкретных условиях.

#### Abstract

##### **A mathematical model of surface modification pochvrezhuschih element diffusion namorazhivaniem immersion in the melt**

The article justified the technological parameters of surface modification details diffusion namorazhivaniem immersion in the melt, affecting the thickness of the hardened alloy, and a mathematical model that can be used to predict the use of diffusion namorazhivaniya in specific circumstances.