

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ**

на правах рукописи

**ПОЛОВИНКИНА Людмила Борисовна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
ПРИ АВТОВАКУУМНОМ ПЛАКИРОВАНИИ**

Специальность: 05.14.05 - Теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1996

AB 34.622

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте технической теплофизики  
Национальной Академии Наук Украины

Научные руководители: доктор технических наук  
Н.М. Фиалко,  
кандидат технических наук  
В.Г.Прокопов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
А.Ф. Колесниченко  
кандидат технических наук  
В.Н.Коржик

Ведущая организация: Институт проблем материаловедения  
НАН Украины

Защита диссертации состоится "28" мар 1996 г. в 13<sup>30</sup>  
часов на заседании специализированного ученого совета  
К 50.04.03 в Институте технической теплофизики НАН Украины по  
адресу: 252057, г.Киев-57, ул. Желябова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
технической теплофизики НАН Украины

Автореферат разослан "26" апрел 1996 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760266 (R)

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета  
доктор технических наук

*Handwritten signature*

Г.Р. Кудрицкий

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из важных путей решения проблемы снижения материалоемкости выпускаемой продукции из цветных металлов и сплавов является, как известно, изготовление биметаллических изделий. В этом случае реализуется замена цельных деталей из дорогостоящих дефицитных цветных металлов на слоисто-неоднородные системы с основой из относительно дешевых конструкционных материалов и сравнительно тонкими слоями цветных металлов и сплавов. Такой подход к конструированию изделий оказывается особо целесообразным при производстве крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения, поскольку позволяет обеспечить значительную экономию цветных металлов.

К числу эффективных технологий производства биметаллических деталей тяжелого машиностроения относится технология автовакуумного плакирования, обладающая такими достоинствами, как высокая производительность (примерно на порядок превышающая производительность электродуговой наплавки), простота получения плакирующих слоев на деталях сложной конфигурации, высокие служебные свойства наносимого слоя, приближающиеся к таковым для материалов вакуумной выплавки, экологическая чистота и пр.

При реализации данной технологии от характера протекания тепловых процессов существенно зависят происходящие в материалах структурные, объемные изменения и в целом качество получаемых биметаллических изделий. В этой связи исследование тепловых аспектов технологии автовакуумного плакирования является актуальной проблемой.

**Цель работы.** Исследование процессов теплопереноса при автовакуумном плакировании крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения антифрикционными сплавами цветных металлов и нахождение данных, требующихся для определения рациональных условий реализации этой технологии.

### **Задачи исследования:**

1. Создание методических подходов к математическому моделированию температурных режимов деталей при автовакуумном плакировании.

2. Разработка требований к механизму и направленности процесса кристаллизации плакирующего слоя, выполнение которых обеспечивает получение качественных биметаллических изделий.

3. Анализ эффективности использования различных средств термического воздействия на процесс формирования плакирующего слоя.

4. Исследование закономерностей протекания тепловых явлений при автовакуумном плакировании деталей с рабочими поверхностями различной формы (плоскими и поверхностями вращения) и разработка на этой основе рекомендаций по эффективной организации технологического процесса.

#### **Научная новизна:**

- предложена методика математического моделирования температурных режимов деталей при автовакуумном плакировании, включающая в себя такие элементы, как решение задачи на последовательности временных сеток для отдельных стадий процесса кристаллизации плакирующего слоя, редуцирование применяемых математических постановок на базе учета эффектов регионального влияния и пр.;

- изучен ряд теплофизических аспектов проблемы рациональной организации технологии автовакуумного плакирования. При этом на основе выполненного комплекса исследований по анализу возможностей использования простейших средств термического воздействия на процесс формирования плакирующего слоя разработаны рекомендации в части проектирования эффективной технологии автовакуумного плакирования.

**Предмет и методы исследования.** Предмет исследования настоящей работы - теплофизический аспект технологии автовакуумного плакирования. Основным методом исследования служил метод математического моделирования.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

Полученные результаты исследований предназначены непосредственно для создания эффективных технологий автовакуумного плакирования крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения антифрикционными сплавами цветных металлов и широко внедрены на ПО "Уралмаш".

**Обоснованность и достоверность** результатов выполненных исследований обусловлены сопоставлением численных решений и данных натурных экспериментов, дублированием решения базовых задач на основе различных методов (метода конечных элементов и

комбинированных итерационных методов), тщательным тестированием разработанных прикладных программ и пр.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на всесоюзной конференции по математическим методам и САПР в сварочном производстве (Свердловск, 1990 г.), на республиканской конференции по проблемам наплавки деталей в машиностроении (Свердловск, 1987 г.), на конференциях молодых ученых ИТТФ НАН Украины (1986 - 1988 г.г.) и обсуждались на научных семинарах в ИТТФ НАНУ и Национальном техническом университете "Киевский политехнический институт".

**Личный вклад автора** состоит в разработке методики численных исследований процессов теплопереноса при автовакуумном плакировании, создании комплекса прикладных программ для расчетов теплового состояния систем "деталь-плакирующий слой-технологическая оснастка", проведении вычислительных экспериментов по определению эффективных условий осуществления рассматриваемой технологии посредством организации требуемого теплового состояния изучаемых конструкций. Автор принимал активное участие в постановке задач исследований и обобщении результатов проведенных разработок.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 2 работы.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Содержит 173 страницы, в том числе 62 рисунка, 16 таблиц; список литературы включает 87 источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы и кратко аннотируется содержание диссертации.

**В первой главе** проведен анализ литературных данных, посвященных изучению различных аспектов технологии автовакуумного плакирования. Рассмотрены основные особенности проявления так называемого автовакуумного эффекта, лежащего в основе указанной технологии. Последний заключается в том, что многие стали и сплавы в условиях нагрева, исключающих доступ воздуха к их поверхностям, проявляют склонность к самопроизвольной очистке от оксидных и нитридных пленок. При этом для данной ситуации изменение давления во времени внутри

замкнутой полости носит экстремальный характер, так что после кратковременного повышения наблюдается его весьма существенное падение вплоть до реализации вакуума.

Освещается специфика реализации технологии автовакуумного плакирования деталей тяжелого машиностроения антифрикционными сплавами цветных металлов. Эта технология осуществляется в газотермических печах общего назначения путем заливки жидкого металла в герметичную наплавочную полость, образованную основной деталью и технологической оснасткой. Определенное внимание уделяется рассмотрению данных, касающихся различных дефектов изготавливаемых деталей, которые могут иметь место при нерациональной организации технологии автовакуумного плакирования. Отмечаются возможные причины возникновения таких дефектов в связи с реализацией определенных тепловых состояний конструкций (основная деталь-плакирующий слой-технологическая оснастка).

Указывается на то обстоятельство, что исследованию теплофизической стороны рассматриваемой технологии посвящено весьма ограниченное количество работ. Причем, главным образом, это совместные разработки Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины и Производственного объединения "Уралмаш". Данные исследования, однако, далеко не завершают построение теплофизических основ рассматриваемой технологии. На основании проведенного анализа делается вывод о том, что актуальными являются формулировки уточненных математических постановок задач рассматриваемого класса, дальнейшие проработки в части создания специализированных методик математического моделирования, углубленные исследования теплового состояния деталей с рабочими поверхностями различного вида и т.д.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению следующих вопросов: а) изложению основного содержания методики математического моделирования теплового состояния деталей при автовакуумном плакировании; б) формулировке основных требований к закономерностям процесса затвердевания плакирующих слоев; в) анализу возможностей использования различных средств термического воздействия на процесс формирования плакирующих слоев применительно к изготовлению биметаллических деталей с плоскими рабочими поверхностями и разработке рекомендаций по эффективной организации технологии плакирования.

Основные особенности развиваемой методики математического моделирования обусловлены спецификой рассматриваемой физической ситуации. Решению подлежали многомерные задачи Стефана для областей сложной конфигурации, состоящих из разнородных элементов. Для численной реализации решения данных задач был предложен специальный методический прием, заключающийся в применении последовательности временных сеток для отдельных стадий кристаллизации плакирующего слоя. Необходимость использования этого приема определяется двумя моментами: с одной стороны - спецификой исследуемого процесса, характеризующейся тем, что продолжительности стадий охлаждения, на которых происходит движение фронтов кристаллизации, в общем случае, относительно невелики; с другой - потребностями детального исследования именно динамики движения фронтов кристаллизации, что диктуется проблемами технологической практики. В соответствии с предложенной методикой последовательности сеток решение задачи в целом разбивается на два этапа. На первом этапе реализация решения осуществлялась на временной сетке с достаточно большим временным шагом  $\Delta\tau_1$  и решение находилось для всей рассматриваемой временной области ( $0 < \tau < \tau_e$ ). При этом в ходе решения определялись времена начала и окончания тех стадий процесса, на которых имело место движение фронтов кристаллизации. На втором этапе находились уточненные решения задачи только для данных стадий; здесь дискретизация рассматриваемых временных подобластей проводилась с существенно меньшим, чем на первом этапе временным шагом  $\Delta\tau_2$ . Проведенные исследования показали высокую эффективность применения предложенного методического приема. Согласно полученным данным использование методики последовательности сеток позволило уменьшить затраты машинного времени на решение задач теплопереноса для ситуации автовакуумного плакирования скользящей опоры шагающего экскаватора и сферического подпятника конусных дробилок соответственно в 2,3 и 3,7 раза.

К особенностям применяемых в настоящем исследовании методических приемов относится широкое использование при их разработке эффектов регионального влияния. Так, описанная методика последовательности сеток базируется на учете эффекта локализации во времени влияния особенностей процесса теплопере-

носа на отдельных сравнительно кратких временных его стадиях. Эффект пространственного регионального влияния был использован при решении задачи о тепловом состоянии скользящей опоры шагающего экскаватора (см. рис.1). Здесь принималось во внимание

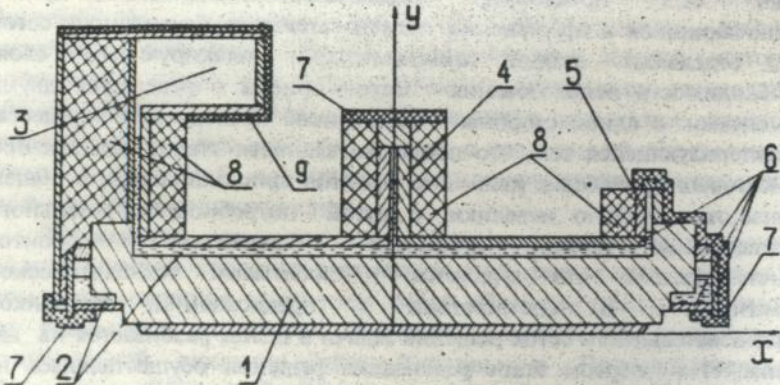


Рис.1. Общий вид скользящей опоры шагающего экскаватора с предлагаемой теплоизоляцией конструкции и модифицированной технологической оснасткой под плакирование: 1 - стальная основа изделия; 2 - наплавочные полости; 3 - коробчатый бункер; 4 - промежуточный питатель; 5 - питатель-газосборник; 6 - контрдетали; 7 - шестислойная изоляция из асбокартона; 8 - изоляция из асброкши; 9 - четырехслойная изоляция из асбокартона.

то обстоятельство, что специфика геометрии области, которая определяет ее асимметрию относительно промежуточного питателя (т.е. специфика конфигурации периферийных элементов конструкции - газосборника и коробчатого бункера), существенно сказывается на процессе формирования температурного режима конструкции лишь в пределах подобластей, непосредственно прилежащих к местам расположения указанных периферийных элементов. Это обусловило возможность разделения исходной задачи на две обособленные и позволило примерно втрое сократить затраты времени на реализацию решения.

Что касается общих требований к закономерностям кристаллизации лакирующих слоев, то необходимость их реализации обусловлена следующим. Данные проведенных исследований свидетельствуют о том, что одним из основополагающих моментов рациональной организации рассматриваемой технологии является обеспечение специального температурного режима конструкций, при котором наблюдаются определенные закономерности протекания процесса формирования лакирующего слоя и создается надежное соединение последнего с основой. То есть температурный режим конструкции в целом должен удовлетворять некоторым требованиям, предъявляемым к тепловому аспекту процесса кристаллизации лакирующего слоя. Первое из этих требований касается механизма затвердевания и указывает на необходимость обеспечения в данной физической ситуации так называемого промежуточного механизма в целях устранения нежелательной усадочной пористости. Второе требование выражает необходимость реализации направленного затвердевания лакирующего слоя, что диктуется условиями эффективного функционирования питателей и прибылей. В соответствии с третьим требованием движение фронта кристаллизации должно происходить в сторону нерабочих поверхностей с тем, чтобы повышенная химическая неоднородность лакирующего материала, наблюдаемая на участках, которые затвердевают в последнюю очередь, не имела места в непосредственной близости от наплавленной поверхности.

В работе анализ теплового состояния исследуемых конструкций проводился именно с позиции его соответствия указанным требованиям. Наряду с этим последние служили также основой при выборе средств термического воздействия на процесс формирования лакирующего слоя, ориентированных на получение необходимого технологического результата. Причем в данном плане основное внимание уделялось рассмотрению эффективности применения достаточно простых средств термического воздействия, таких как использование местной теплоизоляции конструкции и видоизменение геометрии стандартной технологической оснастки.

В этом контексте был проведен комплекс исследований применительно к изготавливаемым на ПО "Уралмаш" крупногабаритным деталям с различными рабочими поверхностями - плоскими и поверхностями вращения. В рамках данной главы приводятся результаты исследований, относящиеся к деталям с плоскими рабочими поверхностями. В качестве примера,

иллюстрирующего особенности процессов теплопереноса для такого вида деталей, рассматривается тепловая сторона технологии автовакуумного плакирования скользящей опоры шагающего экскаватора (скользуна) антифрикционными сплавами типа бронз. Соответствующая математическая постановка задачи об определении теплового состояния конструкции "основа скользуна-плакирующий слой-технологическая оснастка" в условиях автовакуумного плакирования представима в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \Lambda(x, y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \Lambda(x, y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] - P(x, y, \theta) \cdot K(x, y) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial F_0} = C_v(x, y, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial F_0}, \quad (1)$$

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial n} - \frac{Bi_1(x, y, \theta)}{\Lambda(x, y, \theta)} \cdot (\theta - \theta_{c1}) \right]_{\Gamma_1} = 0, \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial n} - \frac{Bi_2(x, y, \theta)}{\Lambda(x, y, \theta)} \cdot (\theta - \theta_{c2}) \right]_{\Gamma_2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (4)$$

$$\theta \Big|_{F_0=0} = \theta_0 = 1, \quad (5)$$

где  $\theta_{c1} = \frac{t_{c1}}{t_0}$ ;  $\theta_{c2} = \frac{t_{c2}}{t_0}$ ;  $Bi_1(x, y, \theta) = \frac{\alpha_1 \cdot l_0}{\lambda_0}$ ;

$$Bi_2(x, y, \theta) = \frac{\alpha_2 \cdot l_0}{\lambda_0}; \quad n = \frac{n_p}{l_0}.$$

$t_{c1}, t_{c2}$  - температура печи в различных зонах;  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи на соответствующих ограничивающих поверхностях объекта;  $\Gamma_1$  - нижняя поверхность детали;  $\Gamma_2$  -

ограничивающая поверхность детали, не включающая в себя поверхности  $\Gamma_1$  и  $x=0$ ;  $n_p$  - нормаль к поверхности. В комплексах  $Bi_1(x, y, \theta)$  и  $Bi_2(x, y, \theta)$  отражается наличие в рассматриваемой ситуации как радиационного теплообмена, так и естественной конвекции

$$Bi_1(x, y, \theta) = \left[ \frac{\varepsilon(x, y, \theta)}{1 - \varepsilon(x, y, \theta)} \cdot Sk \cdot \frac{(\bar{\theta}^4 - \bar{B})}{(\theta - \theta_{c1})} + Bi_{1k} \right]_{\Gamma_1},$$

$$Bi_2(x, y, \theta) = \left[ \frac{\varepsilon(x, y, \theta)}{1 - \varepsilon(x, y, \theta)} \cdot Sk \cdot \frac{(\bar{\theta}^4 - \bar{B})}{(\theta - \theta_{c2})} + Bi_{2k} \right]_{\Gamma_2},$$

где  $\bar{\theta} = \frac{T}{t_0}$ ;  $Sk = \frac{\varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot t_0^3 \cdot l_0}{\lambda_0}$ ;  $\varepsilon(x, y, \theta) = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}$ ;

$$Bi_{1k} = \frac{\alpha_{1k} \cdot l_0}{\lambda_0}; \quad Bi_{2k} = \frac{\alpha_{2k} \cdot l_0}{\lambda_0}; \quad \bar{B} = \frac{B}{t_0^4 \cdot \sigma}.$$

$T$  - абсолютная температура конструкции;  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_p, \varepsilon_0$  - соответственно интегральная степень черноты поверхности конструкции и ее фиксированное значение для плакирующего материала;  $\alpha_{1k}, \alpha_{2k}$  - коэффициенты теплоотдачи конвекцией на поверхностях  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ;  $B$  - поверхностная плотность потока эффективного излучения, определяемая в результате решения на каждом временном шаге системы линейных интегральных уравнений

$$B_i = \sigma \cdot \epsilon_i \cdot T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \cdot \sum_{j=1}^N \int_{A_j} B_j \cdot \frac{d\varphi_{dA_i - dA_j}}{dA_j} dA_j, \quad 1 \leq i \leq N,$$

где  $N$  - порядок этой системы, равный общему количеству поверхностей собственно конструкции и газотермической печи, которые в совокупности образуют замкнутую пространственную область;  $d\varphi_{dA_i - dA_j}$  - элементарный угловой коэффициент излучения элементарной площадки  $dA_i$  поверхности  $i$  на элементарную площадку  $dA_j$  поверхности  $j$ ;  $A_j$  - площадь поверхности  $j$ .

В процессе исследований на первом отправном этапе изучались теплофизические аспекты заводского проектного варианта реализации технологии автовакуумного плакирования с целью оценки его эффективности в части обеспечения рационального протекания процесса формирования плакирующего слоя. Следующий этап состоял в проведении теплофизических исследований, направленных на рационализацию рассматриваемой технологии посредством использования указанных простейших технологических мероприятий. При этом выполнялись варианты параметрические вычислительные эксперименты на базе сформулированной математической модели (1)-(5).

Проведенные исследования показали, что для исходных условий, отвечающих заводскому варианту теплоизоляции скользунa и стандартной оснастке, технологический процесс автовакуумного плакирования оказывается неэффективным. В этой ситуации реализуется не требуемый промежуточный, а объемный механизм затвердевания плакирующего слоя (см. данные, обозначенные сплошными линиями на рис.2; здесь продолжительности второй и четвертой стадий заметно меньше длительности третьей стадии, что свидетельствует о наличии именно нежелательного объемного механизма затвердевания). При этом необходимое направленное затвердевание слоя плакирующего материала не наблюдается и, как следствие, не происходит непрерывная подпитка плакирующих слоев жидким металлом из питателя-газосборника, промежуточного питателя и прибыльной зоны коробчатого бункера. Таким

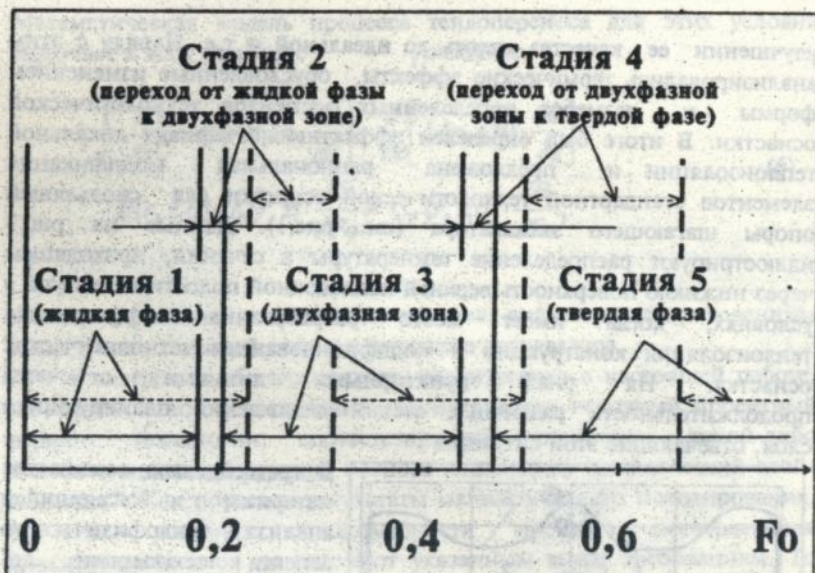


Рис.2. Продолжительности стадий нахождения основного слоя плакирующего материала верхней наплавочной полости в различных фазовых состояниях при плакировании скользящей опоры шагающего экскаватора: — заводской вариант теплоизоляции конструкции; - - - - вариант изоляции, предлагаемой к использованию.

образом, указанные выше требования к процессу затвердевания плакирующего материала здесь не выполняются и ввиду этого не достигается необходимый технологический результат.

В целях нахождения условий, обеспечивающих выполнение указанных выше требований за счет использования простейших технологических мероприятий, был проведен комплекс поисковых численных исследований по выявлению влияния различных факторов на динамику процесса кристаллизации плакирующего слоя. При этом особое внимание уделялось рассмотрению специфики воздействия различных вариантов местной теплоизоляции конструкции; исследовались эффекты изоляций, отличающихся между собой по местоположению изолированных участков; анализировались особенности воздействия таких характеристик изоляции, как толщина и площадь занимаемой ею поверхности; оценивались предельные возможности различных вариантов изоляции при

улучшении ее качества вплоть до идеальной и т.д. Наряду с этим анализировались термические эффекты, обусловленные изменением формы и размеров определенных элементов технологической оснастки. В итоге был определен эффективный вариант локальной теплоизоляции и предложена рациональная модификация элементов стандартной технологической оснастки для скользящей опоры шагающего экскаватора (см. рис.1). Данные на рис.3 иллюстрируют распределение температуры в сечении, проходящем через нижнюю поверхность верхней наплавочной полости скользящего в условиях, когда имеет место разработанная эффективная теплоизоляция конструкции и модифицированная технологическая оснастка. На рис.2 пунктирными линиями отмечены продолжительность различных стадий охлаждения плакирующего слоя, отвечающие этой ситуации.

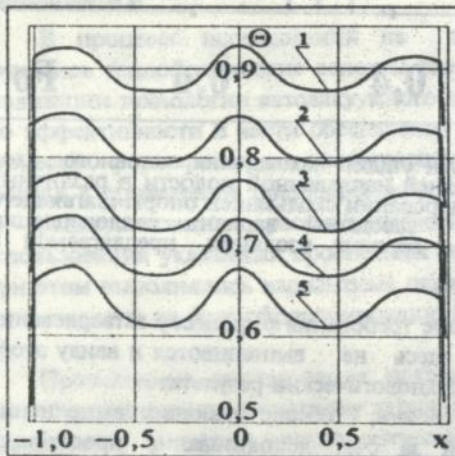


Рис.3. Зависимость  $\Theta=f(y)$  в сечении  $y=0,229$ , проходящем через нижнюю поверхность верхней наплавочной полости скользящей опоры шагающего экскаватора при наличии варианта изоляции, предлагаемой к использованию, в фиксированные моменты времени: 1- $F_0=0,137$ ; 2-0,246; 3-0,356; 4-0,438; 5-0,547.

В третьей главе освещается материал, касающийся анализа теплофизического аспекта технологии автовакуумного плакирования антифрикционными сплавами цветных металлов деталей с рабочими поверхностями в виде поверхностей вращения. Представленные здесь результаты исследований получены на базе использования общих методических подходов, основное содержание которых изложено во второй главе. В качестве характерного примера приводятся данные, отвечающие ситуации автовакуумного плакирования сферического подпятника конусных дробилок (подпятника).

Математическая модель процесса теплопереноса для этих условий включает в себя основное уравнение

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot \Lambda(r, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \Lambda(r, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] -$$

$$- P(r, z, \theta) \cdot K(r, z) \cdot \frac{\partial \delta}{\partial Fo} = C_v(r, z, \theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Fo}, \quad (6)$$

а также начальные и граничные условия, аналогичные приведенным выше для скользящей опоры шагающего экскаватора.

В контексте общего подхода, реализуемого в настоящей работе, на первом этапе исследований рассматривался исходный проектный вариант технологии, соответствующий отсутствию какой-либо теплоизоляции конструкции "основа подпятника-плакирующий слой-оснастка". Как показали результаты математического моделирования, в этих условиях закономерности процесса затвердевания плакирующего слоя не отвечают указанным выше требованиям. То есть здесь механизм затвердевания плакирующего материала оказывается объемным. При этом требование направленного затвердевания не реализуется, а значит, не обеспечивается необходимая подпитка кристаллизующихся слоев жидким металлом из прибыли кольцевого бункера.

На втором этапе исследований в результате проведения широких вариантных расчетов была предложена специальная теплоизоляция конструкции и рекомендованы определенные видоизменения элементов технологической оснастки (см.рис.4), благодаря применению которых достигалось высокое качество получаемого биметаллического соединения. В этой ситуации выполнялись все требования, предъявляемые к характеру процесса кристаллизации плакирующего слоя. Рис.5 иллюстрирует наличие направленного затвердевания в данном слое. На рис.6 представлено температурное поле конструкции, реализующееся в этих условиях.

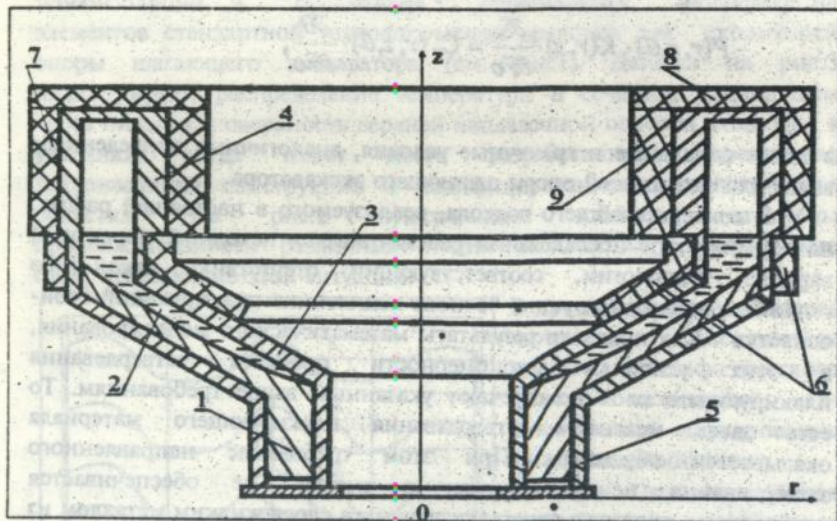
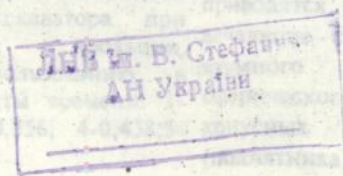


Рис.4. Общий вид сферического подпятника конусных дробилок с предлагаемой теплоизоляцией конструкции и модифицированной технологической оснасткой под плакирование: 1 - стальная основа изделия; 2 - наплавочные полости; 3 - контрдеталь; 4 - кольцевой бункер; 5 - кожу; 6-9 - пятислойная, семислойная, шестислойная и восьмислойная теплоизоляция из асбокартона соответственно.



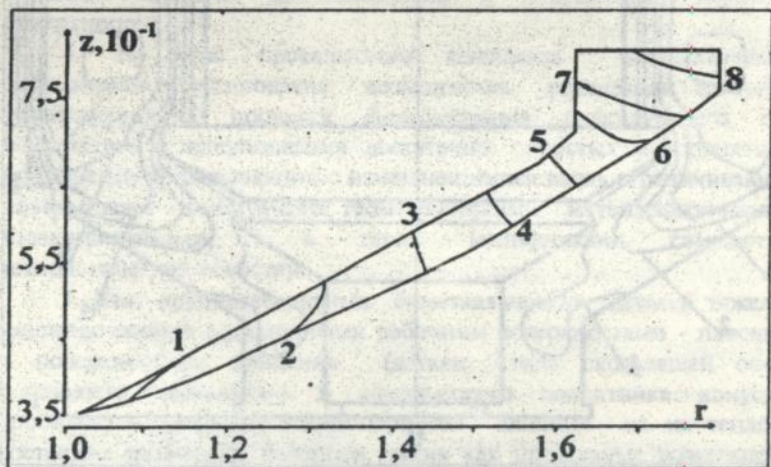


Рис.5. Движение изотермы ликвидуса в плакирующем слое бронзы в условиях наплавки сферического подпятника конусных дробилок при наличии варианта теплоизоляции, предлагаемой для использования: 1 -  $Fo=0,82$ ; 2 - 0,87; 3 - 0,95; 4 - 1,0; 5 - 1,035; 6 - 1,049; 7 - 1,053; 8 - 1,056.

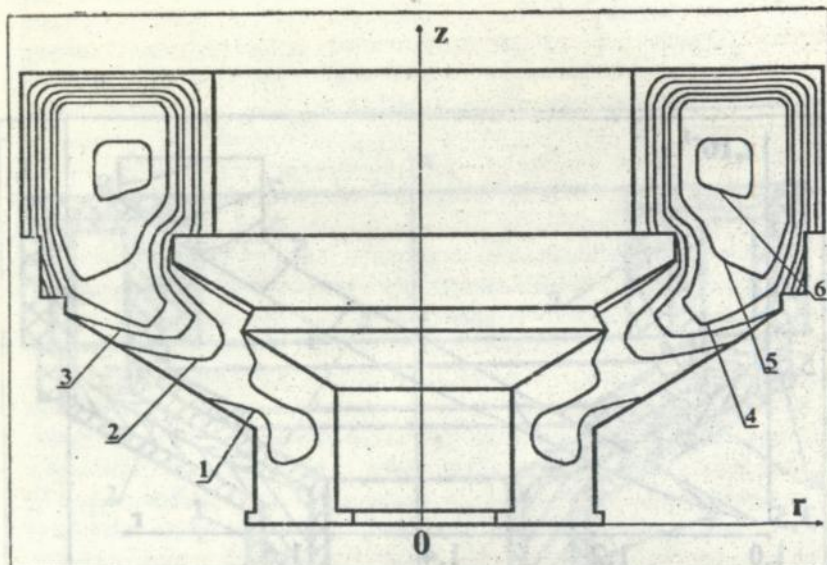


Рис.6. Температурное поле сферического подпятника конусных дробилок в момент времени, отвечающий  $Fo=1,53$ , при наличии варианта теплоизоляции, предлагаемой к использованию: 1- $\theta=0,678$ ; 2-0,687; 3-0,696; 4-0,713; 5-0,722; 6-0,736.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ закономерностей протекания тепловых явлений при реализации технологии автовакуумного плакирования крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения антифрикционными сплавами цветных металлов.

2. Разработана методика математического моделирования теплового состояния деталей в условиях автовакуумного плакирования. Предложен специальный методический прием решения задач рассматриваемого класса на последовательности временных сеток для отдельных стадий процесса кристаллизации плакирующего слоя. Изучены возможности учета эффектов регионального влияния при постановке данных задач и в процессе собственно получения решения.

3. Сформулированы основные требования, касающиеся закономерностей протекания процесса затвердевания плакирующего

слоя, при выполнении которых обеспечивается получение эффективного технологического результата. Показано, что в данной физической ситуации должны быть реализованы такие температурные режимы исследуемых конструкций, при которых в плакирующем слое имеет место, во-первых, промежуточный механизм затвердевания, во-вторых, так называемое направленное затвердевание и, в-третьих, движение фронтов кристаллизации в направлении нерабочих поверхностей.

4. На базе проведенного комплекса вычислительных экспериментов установлена возможность реализации требуемых закономерностей процесса формирования плакирующего слоя посредством использования достаточно простых мероприятий - применения теплоизоляции с изменяющимися вдоль ограничивающих поверхностей конструкций геометрическими и теплофизическими характеристиками, а также модификации стандартной технологической оснастки.

5. Для крупногабаритных биметаллических деталей тяжелого машиностроения с различными рабочими поверхностями - плоскими и поверхностями вращения (детали типа скользящей опоры шагающего экскаватора и сферического подпятника конусных дробилок) - изучены закономерности влияния на их тепловое состояние различных факторов, таких как предельные возможности различных вариантов теплоизоляции, местоположение изолированных участков, изменение формы и размеров определенных элементов технологической оснастки и пр.

6. Применительно к рассматриваемым типам деталей на базе выполненных теплофизических исследований разработаны и внедрены в технологическую практику ПО "Уралмаш" обоснованные рекомендации по эффективной организации процесса автовакуумного плакирования за счет использования рациональных вариантов местной теплоизоляции конструкции и модификации технологической оснастки.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:**

1. Кудинов В.Д., Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Половинкина Л.Б., Терещук Т.Р., Яковлев В.В. Расчет технологических параметров при автовакуумной наплавке скользящих опор шагающих экскаваторов// Сб.трудов под ред.Е.А.Кириллова, В.В.Яковлева

“Сварка при изготовлении изделий тяжелого машиностроения”: НИИТяжмаш.- Свердловск, 1991.- С.55-69.

2. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Половинкина Л.Б., Терещук Т.Р., Кудинов В.Д., Яковлев В.В. Эффекты регионального влияния в процессах теплопереноса при автовакуумном плакировании// Сб.трудов под ред.Е.А.Кириллова, В.В.Яковлева “Сварка при изготовлении изделий тяжелого машиностроения”: НИИТяжмаш.- Свердловск, 1991.- С.6-19.

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$\theta$  - безразмерная температура,  $\theta = t / t_0$ ;  $Fo$  - число Фурье,

$$Fo = \frac{a_0 \cdot \tau}{l_0^2}; K - \text{число фазового перехода}, K = \frac{a_0 \cdot \rho_0 \cdot L}{\lambda_0 \cdot t_0}; \Lambda, C_V, P -$$

безразмерные коэффициент теплопроводности, удельная объемная теплоемкость и плотность,  $\Lambda = \lambda / \lambda_0$ ,  $C_V = c_V / c_{V_0}$ ;  $P = \rho / \rho_0$ ;

$x, y$  и  $r, z$  - безразмерные координаты соответственно декартовой и цилиндрической системы координат,

$$x = x_p / l_0; y = y_0 / l_0; r_0 = r_0 / l_0; z_0 = z_0 / l_0; t, t_0 - \text{текущая и начальная}$$

температура детали;  $\tau$  - время;  $\lambda, C_V, \rho$  - соответственно коэффициент теплопроводности, удельная объемная теплоемкость и плотность

материала;  $a$  - коэффициент температуропроводности материала;  $L$  - удельная теплота плавления (кристаллизации);  $S$  - относительная доля

жидкой фазы;  $x_p, y_p, r_p, z_p$  - размерные координаты соответственно декартовой и цилиндрической системы координат;  $l_0$  - характерный

размер; индекс “0” при  $\lambda, C_V, a, \rho$  отвечает характерным значениям этих характеристик.

## SUMMARY

The basic laws are established which govern heat transfer during the process of autovacuum plating of large-sized workpieces with antifriction nonferrous alloys in heavy mashin building. A procedure is developed for mathematical simulation of the thermal state of workpieces subjected to autovacuum plating. Some general requirements to crystallization processes in plating layer, which provide efficient technological results, are represented. It is shown that the above requirements can be fulfilled by using the simplest means of heat influence on plating layer formation. This means include special local thermal insulation of workpieces and modification of the standard technological equipment. Some recommendations based on the research carried out are given to achieve the efficient implementation of the autovacuum plating technology for heavy mashin building workpieces of various working surfaces, including flat and rotation surfaces.

## АННОТАЦИЯ

Половинкина Л.Б. Исследование теплового состояния деталей при автовакуумном плакировании.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 "Теоретическая теплотехника". Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев, 1996.

Установлены основные закономерности протекания процессов теплопереноса при реализации технологии автовакуумного плакирования крупногабаритных деталей тяжелого машиностроения антифрикционными сплавами цветных металлов. Разработана методика математического моделирования теплового состояния деталей в условиях автовакуумного плакирования. Сформулированы общие требования к закономерностям протекания процессов кристаллизации плакирующего слоя, выполнение которых необходимо для достижения эффективного технологического результата. Показана возможность реализации отмеченных требований посредством использования простейших средств термического воздействия на процесс формирования плакирующего слоя, таких как применение специальной местной теплоизоляции конструкции и модификация стандартной технологической оснастки. На основе выполненных теплофизических исследований даны

рекомендации по эффективной организации технологии автовакуумного плакирования деталей тяжелого машиностроения с различными рабочими поверхностями - плоскими и поверхностями вращения.

Ключові слова: температурні режими, математичне моделювання, автовакуумне плакування, автовакуумний ефект, плакуючий шар.

Подписано к печати 23.04.96 г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл.-печ. лист 1,0. Уч.-изд. лист 1,0.

Тираж 100. Заказ 186.

Полиграф. уч-к Института электродинамики НАН Украины  
252057, Киев-57, проспект Победч, 56

AB 3H ESS  
AB 3H ESS

446907

АВ 34.622

**АВ 34.622**

рекомендации по эффективному  
автовакуумного газификации деля  
различными рабочими поверхностями - плоскими и изогнутыми  
поверхностями.

Ключевые слова: температура, вакуум, математическое  
моделирование, автовакуумное плавление, автовакуумный  
эффект, плазменный шар.

Принято в печать 23.04.96г. - формат 60x84/16  
Тираж 100 экз. Усл.-печ. лист 1,0. Уч.-изд. лист 1,0.  
Цена 100 коп. Заказ 176.

Издатель: ул. Института электродинамики НАН Украины  
25267, Киев-67, проспект Победы, 56

УДК 621.372.6.01