

тот осцилляторов, которая обычно не обсуждается в литературе, и доказано, что функция Гамильтона (1) не является знакоопределенной. Это означает, что проблема устойчивости равновесных решений ограниченной задачи четырех тел должна решаться только в строгой нелинейной постановке на основе методов КАМ-теории.

Следует отметить, что при практической реализации рассмотренного алгоритма квадратичной нормализации гамильтониана необходима проверка вещественности получаемого канонического преобразования, что требует выполнения достаточно громоздких численных и символьных расчетов. Поэтому эффективная реализация алгоритма предполагает использование компьютера и современного программного обеспечения типа системы компьютерной алгебры Mathematica [3], например, которая и использовалась в данной работе для выполнения вычислений.

Благодарности. Исследования, представленные в этой работе, выполнены при поддержке гранта ECONET 21315ZF.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маркеев, А.П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. – М.: Наука, 1978. – 312 с.

2. Grebenikov E.A., Gadomski L., Prokopenya A.N. Studying the stability of equilibrium solutions in the planar circular restricted four-body problem // Nonlinear oscillations. – 2007. – Vol. 10, No. 1. – P. 66 – 82.
3. Wolfram S. The Mathematica book. 4th ed. Wolfram Media / Cambridge University Press, 1999. – 1470 p.
4. Ляпунов, А.М. Общая задача об устойчивости движения / Под ред. Г. Мюнтц – Череповец: Меркурий-Пресс, 2000. – 386 с.
5. Маркеев, А.П. Устойчивость гамильтоновых систем // Нелинейная механика: сб. ст. / Под ред. В.М. Матросова [и др.]. – М.: Физматлит, 2001. – С. 114–130.
6. Budzko D.A. Linear stability analysis of equilibrium solutions of restricted planar four-body problem // Computer Algebra Systems in Teaching and Research. Evolution, control and stability of dynamical systems / The College of Finance and Management (Siedlce, Poland); Eds.: L. Gadomski [and others]. – Siedlce, 2009. – P. 28–36.
7. Арнольд, В.И. Малые знаменатели и проблема устойчивости движения в классической и небесной механике // Успехи мат. наук. – 1963. – Т. 18, № 6. – С. 91–192.
8. Мозер, Ю. КАМ-теория и проблемы устойчивости. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 448 с.

Материал поступил в редакцию 05.10.09

BUDZKO D.A., WEIL J.A., PROKOPENYA A.N. Quadratic normalization of the Hamiltonian in the restricted four-body problem

A problem of normalizing a quadratic part of the Hamiltonian describing perturbed motion in the neighbourhood of equilibrium solutions in the restricted four-body problem, formulated on the basis of the Lagrange triangular solutions of the three-body problem, is investigated. It has been proved that the system under consideration is reduced to two independent harmonic oscillators having frequencies of opposite signs. It means that the Hamiltonian of the system is neither positive definite nor negative definite function and, hence, solving the stability problem of the equilibrium solutions requires an analysis of the complete nonlinear system of the equations of perturbed motion.

УДК 621.791

Буслюк В.В., Солдатенко А.Ф., Касаткина Е.Г., Яковлева Е.С.

КАЧЕСТВО ПЛАТИНИТА В УСЛОВИЯХ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Введение. Платинит – биметаллическая проволока, состоящая из железоникелевого сердечника (прецизионный сплав марки 43Н: 57 % железа, 43 % никеля), покрытого слоем меди.

По структуре композиции платинит представляет собой биметаллическую проволоку. По назначению относится к группе материалов с заданным значением коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) в радиальном направлении, применяемых для изготовления токопроводящих деталей, которые в конструкции прибора жестко и герметично сопрягаются со стеклом, керамикой или другими изоляторами. В зависимости от конкретного назначения коэффициент расширения таких материалов должен иметь очень малые или очень большие значения и должен быть равным КЛТР стекла или другого сопрягаемого материала. Платинит по значению КЛТР в радиальном направлении соответствует силикатным стеклам платиновой группы и применяется в качестве электродов-выводов, впаиваемых в стекло при изготовлении электровакуумных, полупроводниковых приборов, электрических ламп накаливания и др. [3].

Сортамент и требования к качеству платинита предусмотрены ОСТ 110077-84. В российской промышленности платинит производится по двум способам нанесения оболочки, регламентированным указанным документом: трубчатый и гальваническим. Технологии не отвечают современным требованиям по трудоемкости, производительности, экологической безопасности и др.

Для улучшения спаивания со стеклом на заключительном этапе

изготовления платинита на отечественных предприятиях производится его борирование, в результате которого на медной поверхности формируется тонкий борнозакисный слой, состоящий из безводного борнозакисного калия и закиси меди. За рубежом, наряду с борированным платинитом, производят платинит оксидированный, имеющий на поверхности тонкий однородный меднозакисный слой. В России оксидированный платинит не производится.

Сравнительный анализ основных потребительских свойств платинита. Сравнительный анализ проведен на основе нормативных требований и фактических материалах обследования образцов платинита отечественного производства по ОСТ 110077-84 и основных европейских производителей. Исследовались образцы платинита марки ПГБ массового промышленного производства и платинит опытной партии, изготовленный по технологии твердофазного соединения компонентов (методом оборачивания, СКБ «Луч», г. Владикавказ). Зарубежными аналогами явились образцы платинита производства IMPHY (Франция) и PHILIPS (Голландия).

В качестве характеристики равномерности распределения меди в плоскости поперечного сечения приведены значения показателя, рекомендуемого ОСТ 11 0077-84: КРТА – коэффициент разнотолщинности абсолютный, который определяется как отношение минимального значения толщины оболочки к максимальному значению.

Буслюк Виктор Вячеславович, главный инженер РУНИП «СКБ «Запад», г. Брест, РБ.

Солдатенко Анатолий Федорович, директор ЗАО «БЕЛМАГ», г. Магнитогорск, РФ.

Касаткина Елена Геннадьевна, доцент ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ.

Яковлева Екатерина Сергеевна, старший преподаватель ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, РФ.

Физика, математика, информатика

Таблица 1. Сравнительный анализ основных потребительских характеристик платинита различных производителей

Параметр	Значения параметров	
	ПГБ, ОСТ 11-0077-84 (разных производителей)	DUMET 42-24 (IMPHY, Франция)*
Состав композиции		
Содержание меди в композиции, %	21...30	17...28
Марка сердечника	43Н (43 % Ni)	Fe Ni 42 (42 % Ni) Fe Ni 47 (47 % Ni)
Толщина переходного слоя на границе раздела компонентов, мкм	до 4-5	до 4
Механические свойства (в скобках – фактические значения)		
Временное сопротивление разрыву, σ_{BR} , МПа	не регламентировано (550...700)	500 (470...500)
Относительное удлинение, %	18-24 (11...23)	не менее 20 (25...30)
Электротехническая характеристика		
Удельное электросопротивление, мкОм·см	не регламентировано	7,5...8,6
Проводимость, % IACS	не регламентировано	20...27
Геометрия поперечного сечения (в скобках – фактические значения)		
Коэффициент разнотолщинности оболочки (КРТА)	Требование: не менее 0,3...0,5 (гальванический: 0,85...1,0) (опытный: 0,35...0,60)	Не регламентировано (0,85...1,0)
Характеристика поверхности (фактические значения)		
Толщина окисного слоя, мкм	~ 6	~ 1-2
Состав поверхностного слоя	Бура, закись меди (фиолетово-бурый оттенок свидетельствует о присутствии в составе слоя окиси меди)	Закись меди
Коэффициент теплового расширения в радиальном направлении (в зависимости от марки)		
КЛТР, $\times 10^{-7} K^{-1}$ в интервале 20...300 °С	83...89	78...93

* Платинит производства PHILIPS (Голландия) имеет аналогичные характеристики

Анализ показал следующее (таблица 1). Анализируемые марки платинита имеют близкую по составу композицию. Массовой долей меди в композиции и содержанием никеля в материале сердечника обусловлено необходимое расширение сортамента платинита, различающегося значениями КЛТР: от 78 до $83 \times 10^{-7} K^{-1}$ и от 83 до $89 \times 10^{-7} K^{-1}$ для отечественных и зарубежных марок платинита, соответственно. Вместе с тем следует отметить, что в отечественной практике при изготовлении стеклянных конструкций возможно использование таких марок стекла, как ДС-10 со значением КЛТР, равным $90 \times 10^{-7} K^{-1}$, изготавливаемого по ТУ РБ 09429319.002-99 и применяемого в корпусах полупроводниковых приборов, а также СЛ97-1 со значением КЛТР, равным $97 \times 10^{-7} K^{-1}$, изготавливаемого по 16-91 ЖТДИ 670300.015 ТУ и используемого при изготовлении ламп накаливания.

Влияние технологических параметров на потребительские свойства платинита. Получение вакуумплотного спая платинита и стекла обеспечивается наличием на поверхности платинита тонкого окисного слоя, который при пайке взаимодействует с окислами структурной сетки стекла с образованием слоя, состоящего из кристаллов сложных соединений типа шпинелей: $Cu_2O \cdot SiO_2$. Практика промышленного применения платинита (например, на заводе «Цветотрон») показала, что оптимальная толщина окисного слоя, состоящего только из закиси меди Cu_2O , составляет 1–2 мкм. По состоянию окисного слоя этим требованиям отвечает импортный платинит. Борированный платинит отечественного производства имеет борнозакисную пленку, толщиной до 6 мкм, что является одной из основных причин отказа от применения такого платинита в электронике, в производстве приборов для оборонной промышленности, авиации.

Толщина окисного слоя напрямую стандартом не регламентируется. Его качество оценивается по цвету, отражающему и толщину поверхностного слоя, и его состав. По требованиям ОСТ 110077-84, поверхность борированного платинита должна иметь цвет от светло-кирпичного до вишневого, что устанавливается образцами внешнего вида.

Приведенные обстоятельства обуславливают необходимость существенной реконструкции производства платинита в целом. Наи-

более прогрессивные технологии производства биметаллической проволоки базируются на процессах твердофазного соединения компонентов составной заготовки, получаемой методом оборачивания. Интерес к разработке и реализации производства платинита на основе данной технологии обусловлен следующими факторами:

- управляемостью режимов деформации, а, следовательно, формоизменения составной заготовки при прокатке;
- отсутствием развитой диффузионной зоны на границе раздела компонентов;
- возможностью расширения сортамента продукции как по содержанию меди в композиции, так и по материалу сердечника;
- возможностью комплексной автоматизации и компьютеризации производства;
- экологической чистотой производства.

Основные операции получения биметаллических заготовок по приведенному способу: подготовка контактных поверхностей исходных компонентов механическими или плазменными способами, формовка составной заготовки, сварка продольного шва плакирующей ленты и последующая совместная пластическая деформация полученной заготовки (горячая прокатка, волочение). Исходными компонентами являются железоникелевая (в других случаях стальная) проволока для сердечника и плакирующая медная лента.

Технология реализована в виде непрерывной промышленной линии, включающей следующие узлы и агрегаты:

- узел подготовки поверхностей компонентов;
- блок формирования составной биметаллической заготовки с узлом аргоно-дуговой сварки продольного шва оболочки;
- узел индукционного нагрева составной биметаллической заготовки;
- прокатный блок.

Назначение прокатного блока заключается в формировании надежного биметаллического соединения компонентов при их совместной пластической деформации. С целью активации процесса прокатки осуществляется в горячем состоянии. В качестве прокатного блока используется прокатная клеть, состоящая из двух последовательно расположенных двухвалковых калибров, с приводом на переднюю пару валков (рис. 1).

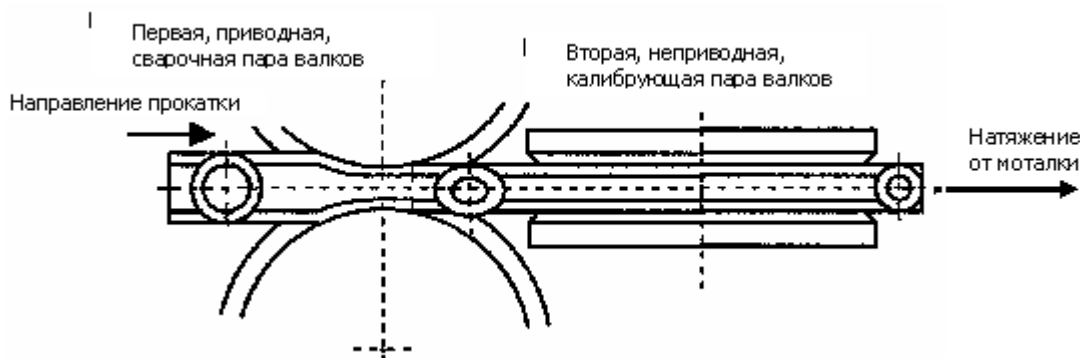


Рис. 1. Схема прокатки составной заготовки

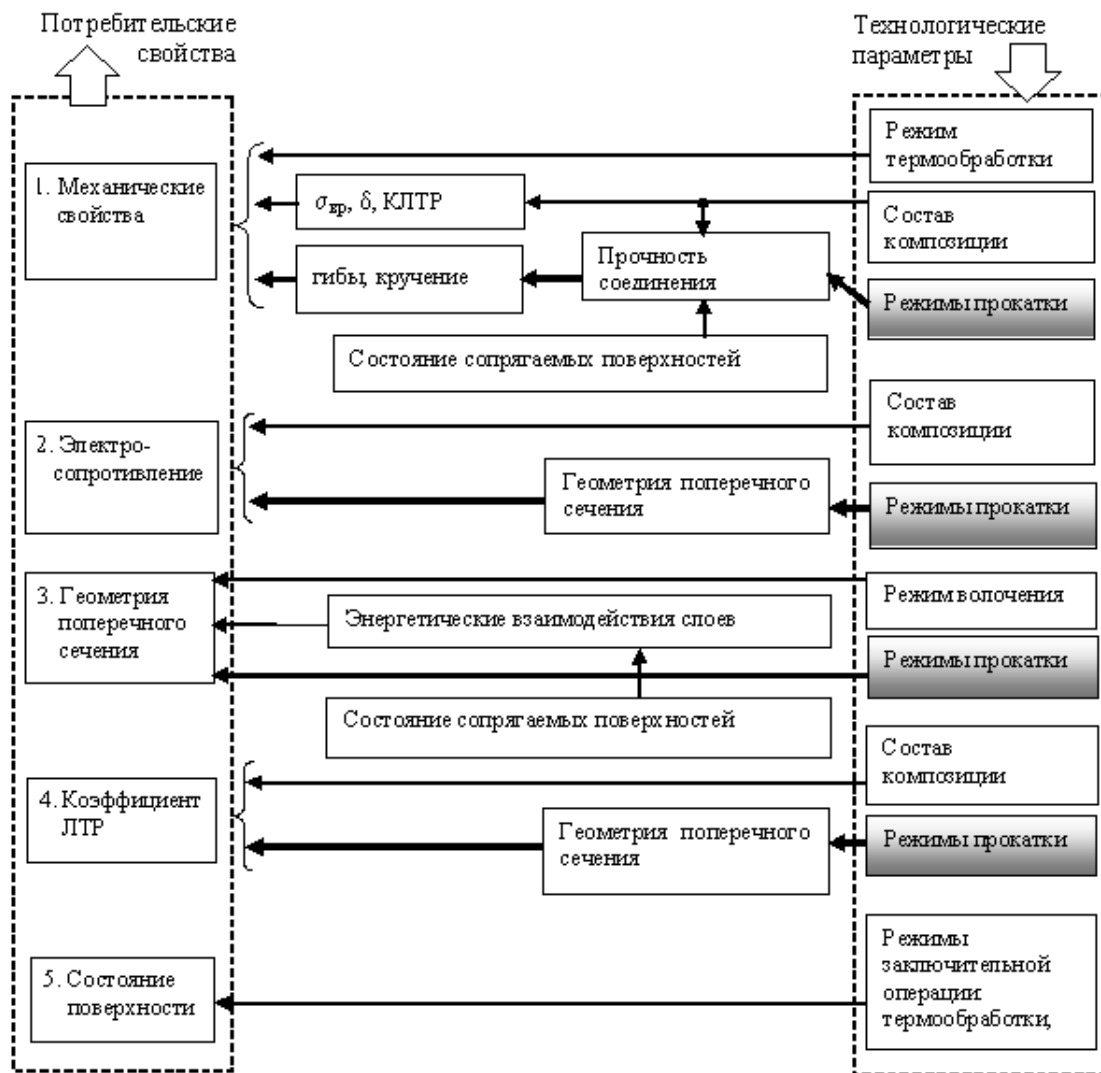


Рис. 2. Структурная схема формирования потребительских свойств

На рис. 2 приведена структурная схема, отражающая чувствительность потребительских характеристик платинита к режимам технологических операций и других факторов при его производстве на основе твердофазного соединения компонентов.

Проведенный анализ причинно-следственной связи рассматриваемой совокупности факторов и показателей качества наглядно иллюстрирует взаимообусловленность совмещаемых при прокатке процессов: обеспечение надежного биметаллического соединения компонентов и их контролируемое формоизменение. Пластическая деформация, являясь активирующим фактором развития топохимических процессов на границе раздела компонентов, обуславливает

прочность их биметаллической связи, которая в свою очередь влияет как на механические свойства биметаллической композиции, так и на развитие течения компонентов в очаге деформации, определяющееся не только настройкой калибра, но и динамикой формирования межслойного соединения. Таким образом, на фоне совокупности явлений, протекающих при прокатке составной биметаллической заготовки в прокатном блоке с целью сварки, режим деформации является важнейшим фактором, определяющим качество готовой продукции, в том числе основной из них – показатель (коэффициент) разнотолщинности оболочки КРТА.

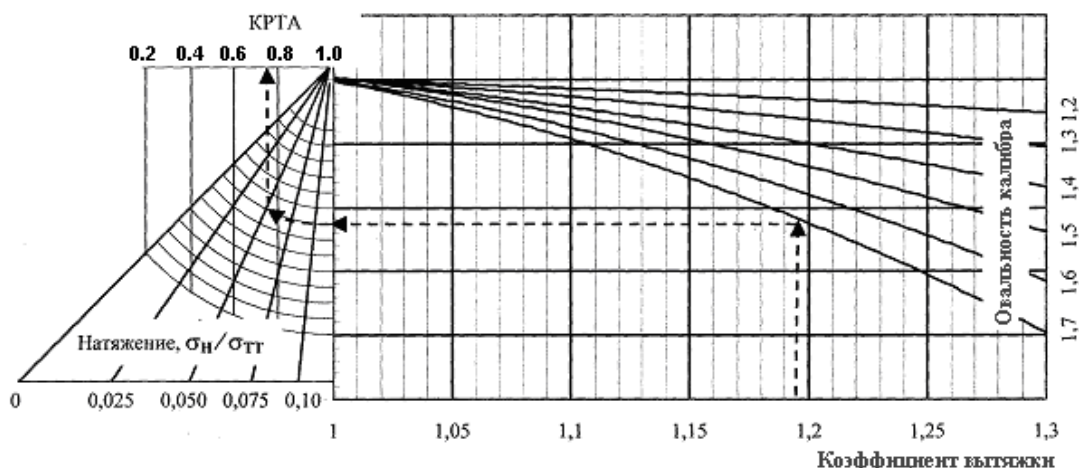


Рис. 3. Номограмма для определения показателя разнотолщинности оболочки на выходе из первой клетки в зависимости от режима прокатки

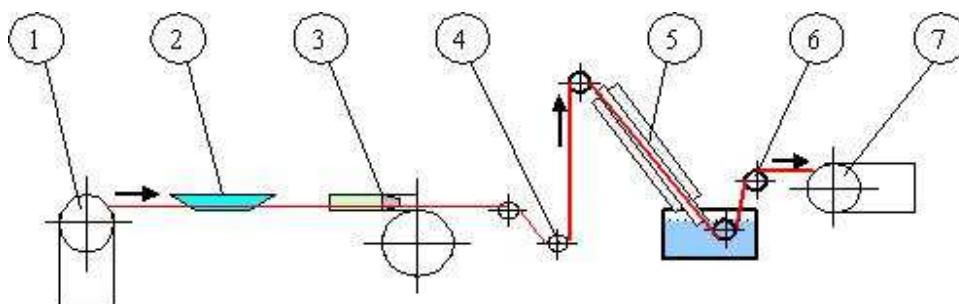


Рис. 4. Технологическая схема оксидирования

Экспериментальные исследования платинита новой технологии производства. По результатам выполненного анализа проведен комплекс технологических исследований. На основе экспериментальных исследований формоизменения составной биметаллической заготовки в калибрах простой формы на стадии формирования биметаллического соединения [1, 2] и разработанной математической модели течения бинарной системы при прокатке в системе «приводная клетка – неприводная клетка – моталка», установлены зависимости (рис. 3) качества конечной продукции от основных параметров процесса, включая переднее натяжение, как регулирующей фактор разнотолщинности оболочки [3, 4].

Полученная биметаллическая катанка подвергается дальнейшему волочению на конечный размер и, на заключительной стадии, формированию дополнительных свойств платинита на основе управляемого совмещенного процесса термообработки платинита и высокотемпературного окисления его поверхности [5].

Структура непрерывной линии оксидирования, в состав которой входят семь основных узлов, приведена на рис. 4.

На узел размотки (позиция 1 на рис. 4) линии оксидирования платинит поступает после мокрого волочения на катушках емкостью до 10 кг.

Узел промывки (позиция 2 на рис. 4) предназначен для удаления с поверхности заготовки остатков смазки после волочения и др. Для промывки используются типовые растворы: кальцинированной соды, тринатрийфосфата, спиртовой раствор.

Узел подготовки поверхности (позиция 3 на рис. 4) обеспечивает дополнительную модификацию поверхности платинита перед оксидированием.

Узел нагрева и высокотемпературного окисления с ванной охлаждения (позиция 5 на рис. 4). Нагрев осуществляется в наклонной проходной электропечи, мощностью 0,4 кВт. Температура нагрева (до 1000 °С) регулируется с помощью тиристорного преобразователя и контролируется с помощью трех вмонтированных в печь термопар (марки ХА) с выводом сигнала на регистрирующий прибор. На выходе из печи установлен узел высокотемпературного окисления, включающий зону с контролируемой атмосферой.

Устройство протяжки заготовки (позиция 6 на рис. 4) выполняет основные функции по транспортировке заготовки через линию оксидирования с заданной скоростью (измеряется с помощью тахогене-

ратора, установленного на валу приводного двигателя мощностью 0,5 кВт, управляемой тиристорным преобразователем напряжения).

Готовый оксидированный платинит принимается узлом намотки (позиция 7 на рис. 4). Натяжение намотки регулируется специальным устройством. Намотка осуществляется на катушку емкостью до 10 кг.

Проведены исследования режимов нагрева и высокотемпературного окисления, по результатам которых определены рациональные параметры ведения совмещенного процесса термообработки и оксидирования. Результаты приведены на рис. 5.

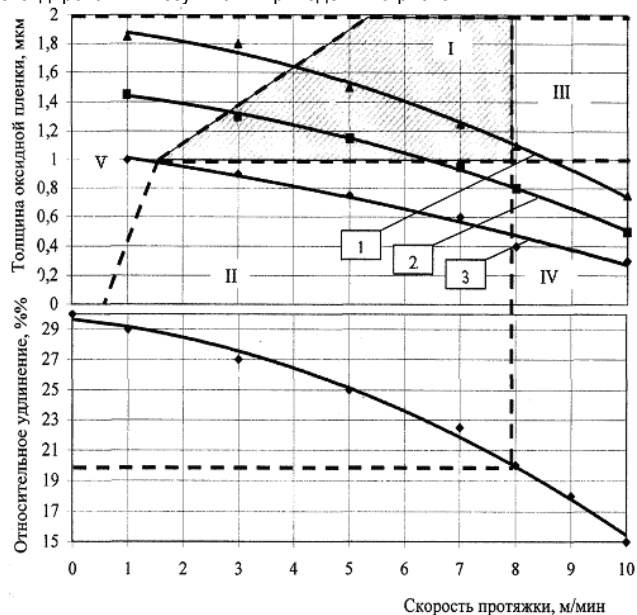


Рис. 5. Влияние скорости протяжки заготовки на относительное удлинение и толщину оксидной пленки платинита \varnothing 0,30...0,40 мм, при протяженности зоны высокотемпературного окисления: 1 – 20 мм; 2 – 12 мм и 3 – 5 мм (длина зоны нагрева печи 550 мм)

Таблица 2. Значения показателей качества оксидированного платинита $\varnothing 0,35$ мм по результатам входного контроля у потребителя

Проверяемый параметр	Значения параметра			
	По ОСТ	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Коэффициент разнотолщинности, не менее	0,5	0,85...0,95		
Относительное удлинение, %	≥ 20	18...23	25...28	29
Состав поверхностного слоя	Борзакись	Закись меди	Закись меди	Закись меди
Массовая доля оксидной пленки, %	$\sim 2,0$	0,17	0,56	1,15
Абсолютная масса пленки на 1 м, г	0,0162	0,001377	0,004536	0,009085
Расчетная толщина оксидной пленки, мкм	2,457	0,209	0,688	1,382
Цвет платинита	Вишневый	Желто-коричневый	Светло-коричневый	Розово-коричневый

На рис. 5. выделены зоны с I по V. Зоны со II по V по разным причинам не соответствуют требованиям к качеству платинита, а именно: в зоне II толщина оксидного слоя составляет менее 1 мкм; в зоне III – при удовлетворительной толщине оксидного слоя значение относительного удлинения меньше допустимого; в зоне IV – оба параметра не удовлетворяют требованиям; в зоне V – при требуемых значениях относительного удлинения и толщины оксидной пленки, в ее составе присутствуют примеси окиси меди CuO.

Зона I является областью рекомендуемых режимов ведения совмещенного процесса термообработки и оксидирования, поскольку относительное удлинение платинита, толщина и состав его оксидной пленки соответствуют предъявляемым требованиям.

Опытные партии платинита, изготовленные в рекомендуемых режимах, с целью оценки их качества, были предоставлены ряду потребителей для промышленных испытаний, по результатам которых (табл. 2) получены положительные заключения.

Заключение. Проведены комплексные экспериментальные исследования свойств платинита, изготавливаемого по новой технологии, базирующейся на процессах твердофазного соединения компонентов составной заготовки, и совмещенной с высокотемпературным окислением его поверхности. Установлены зависимости электрофизических параметров и показателей качества платинитовых проволок от технологических режимов совмещенного процесса термообработки и оксидирования. Определена область рекомендуемых режимов, обеспечивающая требуемый уровень качества в условиях промышленного производства. Работа проведена по инициативе и при участии техни-

ческих служб завода «Цветотрон» и Специального конструкторского бюро «Запад» (г. Брест, Беларусь) – крупнейших предприятий в СНГ по производству полупроводниковых приборов в стеклянном корпусе.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стебляно, В.Л. Неравномерность деформации компонентов при сварке биметалла прокаткой в калибре / В.Л. Стебляно, А.Ф. Солдатенко // Теория и практика процессов обработки композиционных и сплошных материалов: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГМИ, 1990. – С. 11–19.
2. Солдатенко, А.Ф. Влияние распределения компонентов биметаллической проволоки в плоскости поперечного сечения на потребительские свойства / А.Ф. Солдатенко, Е.Г. Касаткина // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – С. 205–211.
3. Гунн, Г.С. Математическая модель течения биметаллической заготовки при прокатке в калибре / Г.С. Гунн, Е.Г. Касаткина, А.Ф. Солдатенко // Труды междунар. науч.-технич. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». – Санкт-Петербург: Изд-во политехнического университета, 2005. – С. 40–43.
4. Касаткина, Е.Г. Управление показателями качества при производстве платинита // Материалы 64-й науч.-технич. конф.: сб. докл. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 83–85.
5. Солдатенко, А.Ф. Способ изготовления платинитовой проволоки / А.Ф. Солдатенко, Е.Г. Касаткина // Пат. № 2354517 РФ на изобретение, МПК В 23 К 20/04. БИПМ, 2009. № 13. – С. 522–523.

Материал поступил в редакцию 30.11.09

BUSLIUK V.V., SOLDATENKO A.F., KASATKINA E.G., YAKOVLEVA E.S. The quality of platynite at new production technology

Complex experimental research of platynite qualities was carried out for its new production technology, which is based on a solid-phase conjunction of the composite billet and is combined with high-temperature oxidizing of the material surface. The physical parameters and quality factors dependences from the technology regimes of thermal treatment and oxidizing were determined for platynite wires as far as recommended regimes area for required quality.

УДК 535

Тарасюк Н.П., Луценко Е.В., Гладыщук А.А.

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОСНОВНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОЛНОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MATHEMATICA

Введение. Интенсивное развитие приборов оптоэлектроники сопровождается применением сложных геометрий многослойных волноводов. Это осложняет аналитический расчет данных структур. Поэтому важное значение приобретают численные методы расчета волноводов [1–3].

В работе представлены три наиболее популярных численных метода расчета волноводов: метод матриц переноса (ММП), метод

конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). На примере простой модели трехслойного плоского волновода с активной областью GaAs проведено сравнение точности вычислений эффективных показателей преломления и интенсивностей волноводных мод данными методами между собой и с расчетом дисперсионного уравнения.

Тарасюк Николай Петрович, ст. преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Гладыщук Анатолий Антонович, кандидат физико-математических наук, зав. кафедрой физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Луценко Евгений Викторович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.