

Научная статья

УДК 621.357.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-103-118

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ГАЛЬВАНОПЛАСТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НИКЕЛЮ И ЕГО СПЛАВАМ (обзор)

Я.В. Толмачев¹, Д.В. Кравченко¹, И.А. Козлов¹, М.В. Герасимов², А.А. Никифоров¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук», Москва, Россия; dir@phych.ac.ru

Аннотация. Рассмотрены современные направления развития и особенности метода гальванопластики в отношении никеля и его сплавов. Представлен обзор гальванопластики с указанием особенностей метода и различных материалов. Приведены составы электролитов для гальванопластики никеля и физические свойства получаемых из них покрытий, а также особенности влияния различных добавок в электролитах на свойства изделий. Описаны типы оправок и материалы, проведено их сравнение, рассмотрены положительные и отрицательные стороны разных типов оправок. Значительное внимание уделено влиянию внутренних напряжений на свойства получаемых методом гальванопластики материалов.

Ключевые слова: гальванопластика, оправка, гальванические покрытия, никелирование, сульфаматный электролит, внутреннее напряжение

Для цитирования: Толмачев Я.В., Кравченко Д.В., Козлов И.А., Герасимов М.В., Никифоров А.А. Особенности развития и использования метода гальванопластики применительно к никелю и его сплавам (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-103-118.

Scientific article

PECULIARITIES OF THE DEVELOPMENT AND USE OF THE ELECTROFORMING METHOD FOR NICKEL AND ITS ALLOYS (review)

J.V. Tolmachev¹, D.V. Kravchenko¹, I.A. Kozlov¹, M.V. Gerasimov², A.A. Nikiforov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Federal State Budgetary Institution of Science A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; dir@phych.ac.ru

Abstract. The paper examines modern directions of development and features of the electroforming method in relation to nickel and its alloys. An overview of the electroforming method is presented, indicating reference sources, features of the method used and various materials. The compositions of electrolytes for nickel electroforming and the physical properties of the coatings obtained from them are presented. The peculiarities of the influence of various additives in electrolytes on the quality and consumer properties of products were considered. Different types of mandrels and materials for their production are described. Their comparison is carried out; the positive and negative aspects of different

types of mandrels are considered. Considerable attention is paid to the consideration of the effect of internal stresses on the properties of materials obtained by electroforming.

Keywords: *electroplating, mandrel, nickel plating, sulfamate electrolyte, internal stress*

For citation: Tolmachev J.V., Kravchenko D.V., Kozlov I.A., Gerasimov M.V., Nikiforov A.A. Peculiarities of the development and use of the electroforming method for nickel and its alloys (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-103-118.

Введение

Стратегия развития государства определяется тенденциями глобального развития, внешними вызовами и угрозами, текущим состоянием и динамикой развития собственной экономики и социальной сферы [1]. Материалы нового поколения составляют основу создания гражданской и специальной техники, конкурентоспособной на мировом рынке [2–4]. Они также требуются для освоения Арктики, к которой в настоящее время повышено внимание в силу сырьевых, транспортных, военных и геополитических причин [5–7].

Приведем в качестве примера лопасти вертолетов из полимерных композиционных материалов (ПКМ), подвергающиеся значительному эрозионному воздействию в результате взаимодействия с частицами пыли в воздухе во время вращения. Большой износ возникает на кончиках лопастей, где скорость движения сквозь воздух максимальная. В силу сложной геометрической формы лопастей большинство методов покрытия их износостойкими материалами не может быть применено.

Одним из перспективных способов нанесения металлического покрытия на ПКМ с сохранением изначальной геометрической формы детали является гальванопластика. Это универсальный метод, используемый в тех случаях, когда другие производственные подходы проблематичны, имеют высокую стоимость или технически не осуществимы. По ГОСТ 3.1109–82 гальванопластика – это «формообразование из жидкого материала при помощи осаждения металла из электролита под действием электрического тока».

При помощи гальванопластического метода можно воспроизвести детали с высокой точностью. Гальванопластика позволяет изготавливать сложнопрофильные предметы, которые трудно или невозможно изготовить иными методами, а также изделия из металлов и сплавов с особыми характеристиками.

Процесс гальванопластики широко применяется для непосредственного производства прецизионных деталей и компонентов из никеля и никелевых сплавов. К ним относятся волноводы и антенны, эрозионные экраны для лопаток вертолетных и авиационных двигателей, сильфоны и теплозащитные экраны для аэрокосмических и ракетных приложений, топливные вкладыши и коллекторы для винтовых и реактивных самолетов, а также камеры тяги с рекуперативным охлаждением для ракетных двигателей.

Гальванопластика никеля давно используется в качестве метода изготовления эрозионных экранов для таких компонентов, как лопасти вертолета, с помощью которого можно воспроизвести точный контур аэродинамического профиля и контролировать распределение электрического тока таким образом, чтобы самый толстый «налет» находился на передней кромке, где проблема эрозии наиболее серьезная. Данный факт свидетельствует, что выгодно наносить никель в состоянии сжимающего напряжения, поскольку это оказывает положительное влияние на сопротивление усталости за счет замедления распространения трещин.

В данной статье представлен общий обзор гальванопластики никеля и его сплавов с указанием справочных источников, типов используемых методов, материалов, к которым ее можно применять, и ряда приложений.

В автомобильной промышленности гальванические формы используют для изготовления конструктивных и декоративных компонентов, таких как кабины грузовиков, панели кузова и боковые молдинги. Крупная никелевая гальванокопия для производства компонентов кузова из армированного пластика для автомобильной промышленности показана на рис. 1, в. Внутреннее применение в основном относится к никелевым ротационным формам, которые используются для производства виниловых покрытий для приборных, дверных панелей и т. д. Одна из особенностей гальванопластики заключается в том, что текстура поверхности оправки идеально воспроизводится в обратном направлении на металле, что позволяет воспроизводить любую текстуру поверхности, например кожи. На рис. 1, г показана гальванокопия для компрессионного формования панелей древесно-волоконных плит.

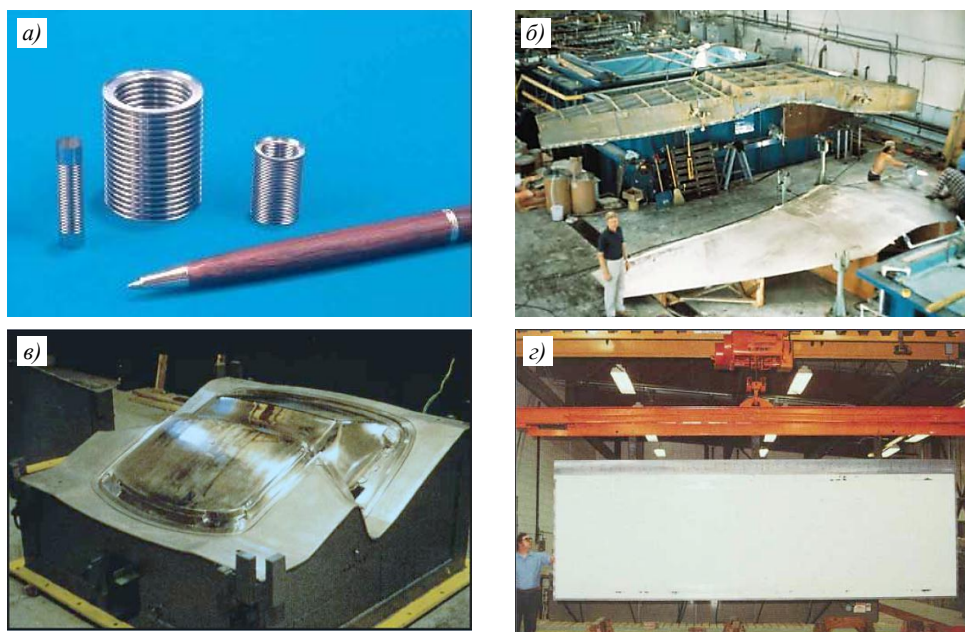


Рис. 1. Прецизионные никелевые сильфоны (а), никелевая гальванокопия обшивки крыла самолета HarrierJump-jet (б), никелевая гальванокопия для производства компонентов кузова автомобиля (в) и большая никелевая форма для компрессионного формования панелей древесно-волоконных плит (г), изготовленные методом гальванопластики

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Процессы электроформования никеля

Схематически процесс получения гальванокопии никеля показан на рис. 2. Электролиты для гальванического нанесения никеля, обычно используемые в гальванопластике, условно можно разделить на три группы: электролит Уоттса и растворы сульфата никеля как с добавками, так и без них. Для гальванопластики также используются растворы фторбората никеля, однако их популярность в настоящее время снижается. С коммерческой точки зрения наиболее важными являются те, которые основаны на сульфате никеля. Преимущества гальванопластики никеля из сульфаминовокислых электролитов заключаются в низком внутреннем напряжении в покрытиях и возможных высоких скоростях осаждения, особенно из концентрированного сульфаминовокислого электролита (Ni-Speed). Составы электролитов и режимы нанесения покрытий приведены в табл. 1 и 2.

1. Приготовление оправки

2. Электроосаждение

3. Разделение

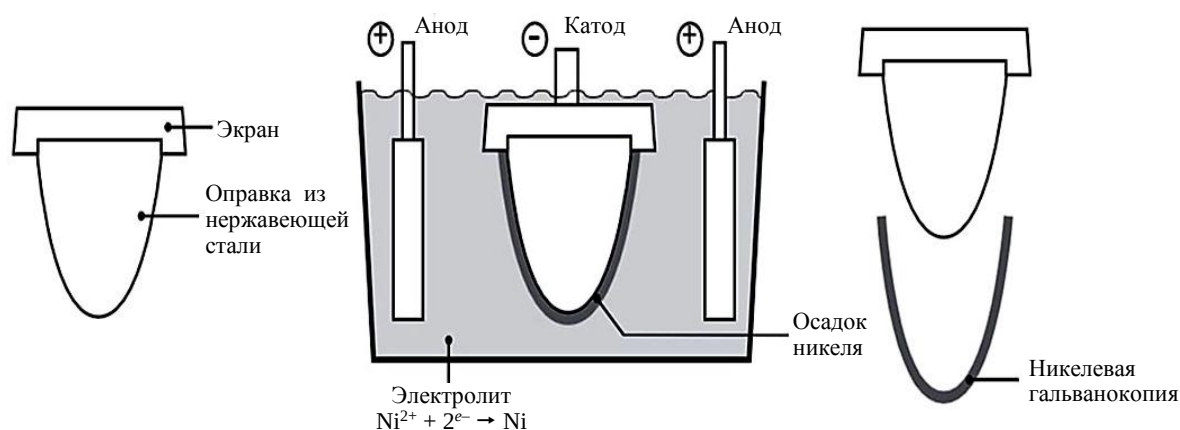


Рис. 2. Схема процесса получения никелевой гальваноконии

Таблица 1

Электролиты для гальванопластики никеля [8–13]

Параметры процесса	Электролиты		
	Уоттса	сульфаминовокислый	концентрированный сульфаминовокислый
Компоненты электролита, г/л			
$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	225–300	–	–
$Ni(SO_3NH_2)_2 \cdot 4H_2O$	–	315–450	500–650
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	37–53	0–22	5–15
H_3BO_3	30–45	30–45	30–45
Условия процесса			
Температура, °C	44–66	32–60	60–70
Перемешивание	Воздушное или механическое		
Катодная плотность тока, А/дм ²	3–11	0,5–32	До 90
Аноды	Никель		
pH	3,0–4,2	3,5–4,5	3,5–4,5

Таблица 2

Механические свойства никелевых покрытий [8–13]

Свойства	Значения свойств для электролита		
	Уоттса	сульфаминовокислого	концентрированного сульфаминовокислого
Растяжение, %	15–25	10–25	10–25
Твердость по Виккерсу, МПа (нагрузка 100 г)	130–200	170–230	150–250
Внутреннее напряжение (на растяжение), МПа	125–185	0–55	0

Электролит Уоттса. Данный электролит содержит сульфат никеля, хлорид никеля и борную кислоту и позволяет получать матовые на вид покрытия никеля, находящиеся под напряжением растяжения. Это относительно недорогое решение, успешно используемое для гальванопластики.

Сульфат никеля является основным источником ионов никеля в электролите Уоттса. Хлорид никеля повышает проводимость электролита и благотворно влияет на равномерность распределения металла на катоде. Борная кислота действует как буфер для

регулирования pH на границе раздела «катод–электролит». Смачивающие добавки необходимы для предотвращения точечной коррозии из-за прилипания пузырьков воздуха и водорода к катоду.

С большой осторожностью внутренние напряжения в гальванопластике никеля можно контролировать с помощью органических добавок. Типичными средствами для снижения напряжений являются сахарин, паратолуолсульфонамид, метабензолдисульфонат и 1-3-6-нафталинтрисульфонат натрия. Все эти органические реагенты вносят серу в никелевые покрытия, что снижает температуру эксплуатации. Электролитические осадки никеля с небольшим содержанием серы охрупчиваются при воздействии температуры $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точная температура охрупчивания зависит от содержания серы, времени выдержки при повышенной температуре и других факторов. Контроль внутреннего напряжения с помощью органических добавок требует оптимального уровня добавки, регулярного пополнения по мере ее расхода и частой (или непрерывной) обработки углем для контроля концентрации продуктов разложения, образующихся в результате восстановления добавки на катоде.

Сульфаминовокислый электролит никелирования. Состав сульфаминовокислового электролита представлен в табл. 1. По своей сути он аналогичен электролитам Уоттса, в которых сульфат никеля заменен сульфаматом никеля. Внутреннее напряжение осадков, получаемых из этих электролитов, меньше, чем из электролита Уоттса, на что указывают данные табл. 1. Нулевого уровня напряжения можно достичь благодаря поддержанию высокой чистоты электролита и удалению хлорида никеля. Для обеспечения эффективного растворения материалов никелевого анода в отсутствие хлоридов важно использовать материалы никелевого анода, активированные серой, такие как электролитический никель S-Rounds или гранулы S-никеля. Даже при чрезвычайной осторожности могут возникать затруднения в поддержании нулевого уровня напряжения без использования небольших количеств органических добавок, о которых говорилось ранее. Добавки функционируют как в сульфаминовокислых электролитах никелирования, так и в электролитах Уоттса. Стабильное растягивающее напряжение можно поддерживать получением из сульфаминовокислового электролита никелирования путем:

- включения в их состав хлорида никеля;
- увеличения площади анода по отношению к катоду в 1,5–2 раза;
- использования полностью активного никелевого анода для поддержания более низкого значения потенциала и избегания, таким образом, окисления сульфамат-аниона.

В этих условиях уровень напряжения при растяжении обычно составляет от 35 до 55 МПа для хорошо проработанного электролита.

Анодное окисление сульфамат-анионов. В сульфаминовокислых электролитах происходит анодное окисление аниона с образованием частиц, которые диффундируют к катоду и восстанавливаются. В некоторых случаях это приводит к включению в никелевые покрытия серы, снижающей внутреннее напряжение и придающей блеск. Это происходит на нерастворимых основных или вспомогательных анодах или на никелевых анодах, работающих при высоких потенциалах.

На нерастворимом платиновом аноде образуется средство снижения напряжения – азодисульфонат, реагирующий на катоде и вносящий серу в никелевые покрытия. Использование небольшого вспомогательного платинового анода для контроля напряжения путем пропускания через него 1–2 % от общего тока вместе с первичными анодами было оценено в лабораторных условиях и подтвердило, что сера совместно откладывается и влияет на пластичность и другие механические свойства никеля, а также на его склонность к охрупчиванию при нагревании. Долгосрочное влияние использования нерастворимого вспомогательного анода, таким образом, не было определено.

Установлено, что может образовываться более одного продукта окисления сульфаматов. Тот, который образуется, зависит от потенциала анода. На нерастворимом платиновом аноде электродный потенциал высокий (1,2 В по сравнению с каломельным электродом), тогда как в концентрированном сульфаминовокислом электролите никелирования (Ni-Speed) электродный потенциал на аноде в резервуаре для кондиционирования контролируется на более низком уровне (~0,2 В по сравнению с каломельным электролитом). Существование нескольких видов продуктов окисления в сульфаминовокислых электролитах подтверждено китайскими исследователями в 1988 г. Процесс Ni-Speed позволяет наносить покрытие с нулевым напряжением при высоких скоростях, избегая при этом совместного осаждения серы.

Концентрированный сульфамат никеля (Ni-Speed). Процесс производства концентрированного сульфамата никеля позволяет осаждать никель с высокой скоростью и при низких уровнях напряжения в осадке. Это особенно важно для гальванопластики, где требуется нулевое напряжение для получения идеально плоских гальванопластических форм и где можно быстро нарастить толстые покрытия. Поскольку условия от низкого до нулевого напряжения могут быть достигнуты без добавления органических добавок, включения серы не происходит и покрытия не охрупчиваются при нагревании >200 °С. Состав электролита приведен в табл. 1. Электролит содержит 600 г/л сульфамата никеля.

Скорость осаждения никелевого покрытия с минимальными внутренними напряжениями из концентрированного сульфаматного электролита зависит от катодной плотности тока и температуры электролита, что показано на рис. 3.

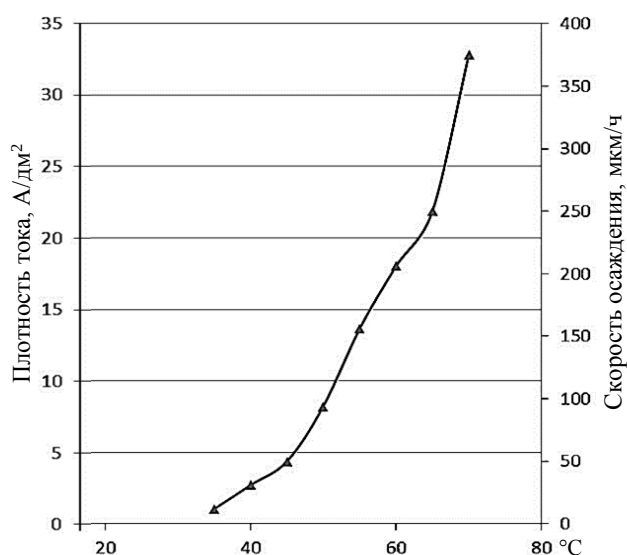


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения никелевого покрытия из концентрированного сульфаминовокислого электролита от катодной плотности тока и температуры электролита

Покрытие никель-кобальтовым сплавом. Никель-кобальтовые сплавы можно осаждать из концентрированных сульфаминовокислых электролитов никелирования при контролируемых внутренних напряжениях. Содержание кобальта в электролите поддерживается добавлением сульфамата кобальта или использованием электролитических кобальтовых анодов, подключенных к отдельному источнику питания рядом с никелевыми анодами. Соосаждение кобальта приводит к получению покрытий с микротвердостью, превосходящей данный показатель у чистого никелевого покрытия,

а также улучшает высокотемпературные свойства узлов и деталей, полученных методом гальванопластики. Содержание кобальта в осадке увеличивается с повышением количества кобальта в электролите и снижается с увеличением плотности тока. По мере возрастания содержания кобальта в электролите твердость осадка увеличивается до максимального значения. Пик приходится на содержание кобальта в осадке в количестве 35 %, что соответствует ~6 г/л кобальта в электролите. Внутреннее напряжение осадка увеличивается с повышением плотности тока, а также содержания кобальта в электролите. В качестве примера на рис. 4 приведены детали из сплава системы никель–кобальт, полученные методом гальванопластики.

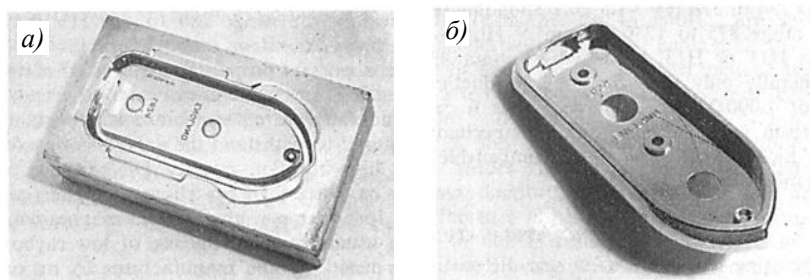


Рис. 4. Матрица для литья под давлением (а) из сплава системы никель–кобальт, полученная методом гальванопластики, и пуансон, изготовленный из цинковой отливки (б)

Никель-кобальтовые сплавы можно осаждать из сульфаминовокислого электролита и сернокислых электролитов, однако осаждение сплавов из концентрированного сульфаминовокислого электролита позволяет контролировать внутреннее напряжение без использования органических добавок [14, 15].

Выравнивающие добавки. Использование выравнивающих добавок, таких как 2-бутиновый диол, в соотношении 1:4 может улучшить распределение металла на оправке за счет подавления роста конкреций и предотвращения образования ослабленной поверхности при гальванопластике в углу. Как правило, выравнивающие добавки увеличивают внутреннее напряжение в направлении растяжения. В случае осаждения никеля или никель-кобальтовых сплавов из уже рассмотренных концентрированных сульфаминовокислых электролитов можно контролировать повышение внутреннего напряжения, возникающего в результате использования выравнивающей добавки, и достигать его приемлемого уровня. Предлагаемая начальная концентрация 1,4-бутиндиола для концентрированного сульфаминовокислого электролита нанесения покрытия «никель–кобальт» с содержанием кобальта 1,25 г/л (в пересчете на металл) следующая: нужно ввести ~20 мг/л 1,4-бутиндиола и проводить периодическую корректировку из расчета 0,5 мг на 1 А·ч пропущенного через электролит электричества. Продукты разложения, образованные органическими добавками, обычно увеличивают внутреннее напряжение.

Композиты с металлической матрицей и другие инновации. Процессы гальванопластики, которые приводят к включению частиц, равномерно распределенных по электроосажденной металлической матрице, исследовали в связи с гальванопластикой. Путем тщательного отбора окклюзируемых частиц получены гальванические формы никеля с уникальными механическими и физическими свойствами. Оксиды, нитриды, карбиды и бориды вводят в никелевые покрытия для получения высокотемпературных, устойчивых к окислению материалов. Совместное осаждение слюды с никелем приводит к образованию покрытий с низким коэффициентом трения. Включение волокон в металлические матрицы посредством электроосаждения также возможно, и в настоящее время этому вопросу уделяется повышенное внимание.

Возможность создания изделий с уникальными свойствами за счет включения металлических и неметаллических частиц и волокон электролитическим или неэлектролитическим способом существует и может еще больше расширить границы полезности гальванопластики [16–23].

Типы оправок и материалы

Оправки можно классифицировать как проводящие и непроводящие электричество, и каждая из них может быть многоразовой, полумногоразовой или одноразовой.

Токопроводящие оправки обычно изготавливают из металлов или сплавов, с которыми гальванопокрытие связывается достаточно хорошо, чтобы предотвратить преждевременное разделение, но позволяет легко удалить готовую гальваническую форму.

Недостатком непроводящих оправок является то, что их нужно сделать проводящими, чтобы начать процесс электроосаждения. Этого достигают путем нанесения тонкой металлической пленки, обычно серебра или никеля.

Выбор многоразовой или одноразовой оправки во многом зависит от геометрии и количества необходимых гальванических форм. Если не используются повторяющиеся формы или углы, применяют многоразовые жесткие оправки, которые можно отделять от гальванической формы и многократно использовать повторно. Данная процедура предпочтительна при больших объемах производства. Если речь идет о входящих углах и формах, необходимо использовать материалы оправки, которые можно удалить плавлением или химическим растворением, либо деформируемые материалы.

Многоразовые оправки. Аустенитная нержавеющая сталь является хорошим материалом для использования в качестве многоразовой токопроводящей оправки. К недостаткам относят сложность механической обработки с жестким допуском. Однако высокая стойкость к повреждениям при использовании и высокая электрическая проводимость нивелируют недостатки. К преимуществам также следует отнести пассивные пленки на поверхности сталей, предотвращающие адгезию между гальванопластической копией и оправкой.

Медь и латунь также используют в качестве многоразовых токопроводящих оправок. Они относительно легко поддаются механической обработке и подходят для применения, когда требуются сложные текстурированные поверхности. Отделить гальваническую форму от медной или латунной оправки легко с помощью разделительной пленки.

В качестве материала оправки можно использовать углеродистую (черную) сталь, она недорогая и легко обрабатывается. Обычно такую оправку необходимо никелировать, чтобы гарантировать разделение.

Инвар или ковар – это сплавы с низким температурным коэффициентом линейного расширения, но относительно дорогостоящие. Они используются в критических случаях, когда точность размеров является главной задачей. Гальванопластическую копию и оправку разделяют путем одновременного нагрева. Большее тепловое расширение гальванопластической копии позволяет отделить оправку.

Чистый никель, несмотря на то, что его трудно обрабатывать, можно использовать в качестве постоянной оправки.

Пластмассы используют для изготовления многоразовых оправок, но они требуют металлизации.

Стекло очень трудно обрабатывать (легко повреждается), оно относительно дорогостоящее и требует металлизации, но поддерживает жесткие допуски.

Дерево, кожу и ткани можно использовать в качестве материалов оправки в том случае, когда желательно воспроизвести текстуру и рисунок на их поверхности. Данные материалы пористые и требуют герметизации.

Одноразовые оправки. Алюминий используют в качестве материала для оправки. Он легко поддается механической обработке, ему можно придать высокую чистоту поверхности. Однако это относительно дорогостоящий материал и легко повреждается. При использовании в качестве одноразовой оправки алюминий можно растворять в растворе щелочи.

Цинк имеет аналогичные характеристики и используется в качестве одноразовых оправок. Оправку можно растворить в растворе соляной кислоты.

Воски также используют, потому что они хорошо поддаются отливке из готовой гальванопластической формы, однако имеют множество недостатков в силу своей хрупкости. Проводящий воск с графитовым наполнителем успешно применяют в качестве одноразовой оправки.

Важно, чтобы оправка сохраняла свои размеры в теплых гальванических ваннах. Воск и большинство пластиков расширяются под воздействием электролитов, работающих при повышенных температурах [24–28].

Технологические особенности

Успешная гальванопластика требует тщательного контроля чистоты электролита и рабочих параметров, таких как pH, плотность тока, температура процесса и перемешивание. В этом отношении контроль аналогичен контролю декоративного никелирования. Контроль является более сложным и, возможно, более важным в случае гальванопластики, поскольку обработка может занять часы или дни. Общие проблемы, возникающие при гальванопластике, включают контроль распределения металла, внутренних напряжений, шероховатости и образования узлов. Дополнительные добавки могут помочь решить некоторые из этих проблем, но их концентрации должны строго контролироваться.

Распределение металла. Изменение толщины металла, осажденного в различных точках поверхности оправки, связано с распределением тока. Углубленные области будут получать меньше тока; к областям, выступающим над поверхностью, будет поступать ток с более высокими значениями плотности. Плотность тока и скорость осаждения металла будут меньше в углубленных областях, в отличие от областей, выступающих над поверхностью. В результате во многих случаях распределение металла по поверхности изделия будет неравномерным, а покрытие будет относительно тонким в углублениях и толстым на выступах.

Некоторые электролиты менее чувствительны к изменениям плотности тока, чем другие. Способность электролита наносить равномерные покрытия, несмотря на изменения плотности тока на поверхности гальванопластической копии, называется его рассеивающей способностью. Рассеивающая способность электролита устанавливает взаимосвязь между распределением металла и электропроводностью, поляризацией, выходом по току и геометрической формой профиля поверхности формируемой детали. Результаты исследований рассеивающей способности электролитов никелирования позволяют предположить, что ее (способность) можно повысить благодаря снижению плотности тока, увеличению расстояния между анодом и катодом, а также за счет повышения pH, температуры и содержания металла в ванне. Полностью хлоридные электролиты никелирования (которые не используются для гальванопластики из-за высоких внутренних напряжений в осадках) имеют лучшую метательную способность, чем электролиты Уоттса. Сульфаминовокислые электролиты предпочтительнее электролитов Уоттса, но не так хороши, как полностью хлоридные электролиты.

Конкретный процесс никелирования обычно выбирают на основе указанных механических и физических свойств, а не мощности выброса. Распределение металла затем улучшается за счет применения экранов и/или вспомогательных анодов. Использование этих технологических добавок позволяет контролировать распределение металла и получать относительно однородные никелевые покрытия. Хотя эти методы оптимизируются путем проб и ошибок, моделирование операции гальванопластики в сочетании с определением профилей потенциала катода может облегчить проектирование и размещение экранов и вспомогательных анодов. Доступное компьютерное программное обеспечение также помогает улучшить распределение металла на катоде.

Внутреннее напряжение. Контроль внутренних напряжений чрезвычайно важен при гальванопластике. Внутреннее напряжение относится к силам, возникающим в покрытии в результате электрокристаллизации и/или совместного осаждения примесей, таких как водород, сера и другие элементы. Силы носят либо растягивающий, либо сжимающий характер; редко продукты электроосаждения свободны от некоторой степени внутреннего напряжения. Чрезмерное растягивающее или сжимающее напряжение может вызвать следующие проблемы:

- деформация гальваноконструкции при ее отделении от оправки;
- сложность отделения гальваноконструкции от оправки;
- скручивание, отслаивание или преждевременное отделение гальваноконструкции от оправки;
- коробление и образование пузырей на никелевом покрытии, которые обычно указывают на высокое сжимающее напряжение.

Внутреннее напряжение зависит от природы и состава электролита для никелирования (табл. 3). Полностью хлоридный электролит образует покрытия с самыми высокими внутренними напряжениями. Сульфаминовокислые электролиты никелирования без хлоридов дают покрытия с наименьшими внутренними напряжениями. Органические добавки можно использовать для контроля внутреннего напряжения электроосажденного никеля. Но поскольку эти добавки неизбежно вводят серу, то их следует применять с осторожностью и должным вниманием. Показано, что совместное осаждение с небольшим количеством марганца предотвращает охрупчивание серосодержащих никелевых покрытий и допускает нагрев больше этой температуры. Обсуждаемый ранее процесс производства концентрированного сульфамата никеля может осуществляться при высокой плотности тока для получения покрытий с очень низкими или нулевыми внутренними напряжениями. Эти методы показали свою эффективность при гальванопластике как никеля, так и никель-кобальтового сплава.

Таблица 3

Типичные значения внутреннего напряжения для электролитов никелирования [29]

Электролит	Внутреннее напряжение, МПа
Уоттса	110–210
Уоттса с перекисью водорода	275 и более
Чисто хлоридный	205–310
Фторборатный	100–175
Фторборатный с перекисью водорода	100–175
Сульфаматный без хлоридов	0–55
Сульфаматный с хлоридами	55–85
Чисто сульфатный	110–140

Внутреннее напряжение контролируется за счет выбора электролита и поддержания его чистоты, а также благодаря использованию органических добавок. Важен также контроль плотности тока и других рабочих переменных.

Шероховатость. Любые условия, приводящие к шероховатости декоративного покрытия, оказывают гораздо более серьезное влияние на операции гальванопластики. Образующиеся конкреции, самородки и дендриты становятся областями с более высокой плотностью тока. В результате они растут быстрее и обедняют близлежащие области.

Источником шероховатости также является переносимая по воздуху грязь. Хорошей практикой при процессе гальванопластики являются поддержание чистоты области нанесения покрытия с помощью вакуумной очистки и подача в помещение для нанесения покрытия отфильтрованного воздуха. Эти меры предосторожности особенно необходимы, когда в ванне для покрытия есть вытяжная система, которая пропускает воздух через ванну.

Электроформовочные прессы для изготовления компакт-дисков изготавливают в чистых помещениях с соблюдением строгих условий чистоты. Частицы анода также могут вызывать шероховатость и контролируются с помощью анодных мешков и диафрагм; более высокие скорости фильтрации и перемешивание катода могут быть полезными. Кристаллизация химикатов на анодных мешках, стенках резервуаров и надстройках, реализующаяся при низких температурах или из-за недостаточного перемешивания электролита, может вызвать проблемы с шероховатостью, когда эти частицы в него попадают. Кристаллизованные соли имеют тенденцию к медленному растворению и могут прилипнуть к катоду. Накопившиеся соли следует тщательно удалять или смывать, когда ванна не используется. Для приготовления электролита для нанесения покрытия и промывных операций следует использовать деионизированную воду во избежание образования частиц в результате осаждения компонентов жесткой воды.

Дендриты. Дендриты на краях и углах могут быть проблематичными и сводятся к минимуму за счет использования экранов или выбора электролита. Например, электролиты с высоким содержанием хлоридов в этом отношении лучше, чем электролит Уоттса. Некоторые рассмотренные ранее выравнивающие добавки подавляют тенденцию к образованию дендритов. Другой подход, применяемый во многих случаях, состоит в том, чтобы удлинить оправку за пределы фактически желаемых размеров, так что образование дендритов происходит на части гальванопластики, которую можно обработать. Если гальванопластика никеля прерывается для удаления дендритов и конкреций путем механической обработки, обработанная поверхность никеля должна быть активирована для обеспечения хорошей адгезии ранее осажденного никеля к никелю. Методы подготовки никелевых поверхностей к нанесению никеля стандартизированы (стандарт ASTM B 343).

Иные методы управления процессом. По мере возможности следует использовать перемешивание любого вида (по отдельности или в комбинации), чтобы контролировать питтинг на участках с высокой плотностью тока. Однако воздушное или механическое перемешивание электролита может вызвать шероховатость, если только электролит не поддерживается в чистоте с помощью высокой скорости фильтрации. Вращение катода, когда это применимо, является эффективным средством перемешивания электролита. Кроме того, вращение катода может обеспечить равномерность толщины покрытия от точки к точке по окружности. (Неравенства по оси вращения приходится преодолевать другими средствами.) При вращении должны быть предусмотрены щетки или другие коммутирующие устройства для проведения тока к катоду. Необходимо следить за тем, чтобы эти устройства были сконструированы таким образом, чтобы в электролит для нанесения покрытия не попали смазка или частицы металла, возникающие в результате износа поверхностей подшипников [30–39].

Заключения

Методом гальванопластики можно формировать детали большого размера (вплоть до обшивки крыла самолета), получать частицы порошков (диаметром до 0,01 мм), а также изготавливать штампы для голограмм или видеодисков [40].

Изделия со сложными и точными внутренними поверхностями, а также изделия, которые невозможно изготовить каким-либо другим способом, могут быть легко получены при использовании гальванопластики.

Гальванопластика имеет и определенные ограничения. Однако часто можно обойти препятствия или по крайней мере свести их к минимуму. Основными ограничениями гальванопластики являются:

- высокие затраты на разработку [41, 42];
- длительное время осаждения;
- материальные ограничения. Из-за проблем, связанных с хрупкостью, окислением или внутренними напряжениями обычно используют только Cu, Ni, Fe, Cr, Pb, Ag и Au, а также их сплавы и композиты. Алюминий и тугоплавкие металлы подвергаются гальванопластике, но с трудом, из-за органических электролитов и расплавленных солей [43–45];
- разделение гальванопластической копии и оправки;
- неоднородность толщины, которую можно свести к минимуму за счет улучшения конструкции оправки, использования специальной отсадки или с помощью дополнительных анодов, вставленных в утопленные области «долины», а также благодаря манипулированию составом электролита и условиями нанесения покрытия (pH, температура, плотность тока, перемешивание и т. д.);
- наличие внутренних напряжений в нанесенном материале, которые можно контролировать в некоторых случаях с помощью уменьшающих напряжение добавок, систем электрохимической обратной связи или импульсного покрытия.

Значительное количество зарубежных публикаций, посвященных изучению гальванопластического метода изготовления изделий, свидетельствует о высокой значимости работ, проводимых в этой области.

Гальванопластика – это уникальный процесс изготовления металлических изделий, который незаменим при производстве многих деталей, используемых в абсолютно разных отраслях промышленности. Данный метод также достаточно универсален, чтобы успешно применяться для производства компонентов больших размеров для аэрокосмической и автомобильной промышленности, однако в то же время способен идеально воспроизводить поверхности с характеристиками субмикронного масштаба.

Для большого количества применений в гальванопластике никель является предпочтительным материалом. Никелевые покрытия могут обладать широким спектром механических свойств, которые можно регулировать варьированием условий осаждения, применением добавок для электролитов и легированием. Безусловно, никель и его сплавы и в дальнейшем будут доминировать в этой отрасли, однако многие его перспективные применения остаются неизученными.

Список источников

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. Т. 6 (260). С. 3–16.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б. Термостойкость электролитических хромовых покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.

4. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
5. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Арктическое материаловедение. Томск: Томск. гос. ун-т, 2018. Т. 3. 44 с.
6. Хмелева К.М., Козлов И.А., Никитин Я.Ю., Никифоров А.А. Современные тенденции защитных гальванических покрытий, работающих при повышенных температурах (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.
7. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Фарафонов Д.П., Смирнова Т.Б. Особенности электролитического осаждения абразивно-износостойких покрытий на основе никеля // *Труды ВИАМ*. 2022. № 2 (108). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.
8. Di Bari G.A. *Electroforming: Electroplating Engineering Handbook* / ed. L.J. Durney. 4th ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984. P. 474–490.
9. Huang C.H., Wu H.M., Hon Y.H. High-Strength Electroformed Nickel // *Plating and Surface Finishing*. 1990. Vol. 77. P. 56–59.
10. Safranek W.H. The Properties of Electrodeposited Metals and Alloys. A Handbook // *Journal of The Electrochemical Society*. 1975. Vol. 122 (8). P. 270C. DOI: 10.1149/1.2134416.
11. Wearmouth W.R., Belt K.C. Electroforming with Heat-Resistant Sulfur-Hardened Nickel // *Plating and Surface Finishing*. 1979. Vol. 10. P. 53–57.
12. Dini J.W., Johnson H.R., Brooks J.A. Zinc in Sulfamate Nickel Deposits – Influence on Weldability of Electroforms // *Metal Finishing*. 1979. Vol. 77. No. 2. P. 99–101.
13. Brooks J.A., Dini J.W., Johnson H.R. Effects of Impurities on the Weldability of Electroformed Nickel. US Sandia Laboratories, 1978. P. 36.
14. Dini J.W., Johnson H.R. Some Property Data for Nickel-Cobalt Electrodeposits // *Journal of Materials Science*. 1976. Vol. 11. No. 9. P. 1779–1780.
15. Wearmouth W.R., Belt K.C. Mechanical Properties and Electroforming Applications of Nickel-Cobalt Electrodeposits // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1974. Vol. 52. No. 3. P. 114–118.
16. Snaith D.W., Groves P.D. Some Further Studies of the Mechanism of Cermet Electrodeposition // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1977. Vol. 55. No. 3. P. 136–140.
17. Sykes J.M., Allner D.J. Mechanisms for the Formation of Electrodeposited Composite Coatings // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1974. Vol. 52. P. 28.
18. Malone G.A. Electrodeposition of Dispersion Strengthened Alloys // *Symposium on Electrodeposited Metals for Selected Applications*, Battelle Memorial Laboratories. 1991. Vol. 78. P. 58–62.
19. Harris S.J., Boden P.J. Electroforming with Composite Materials // *Electroplating Metal Finishing*. 1973. Vol. 26. No. 5. P. 9–13.
20. Bazzard R., Boden P.J. Codeposition of Chromium Particles in a Nickel Matrix // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1972. Vol. 50. No. 2. P. 63–69.
21. Harris S.J., Baker A.A., Hall A.F., Bache R.J. Electroforming Filament Winding Process – Method of Producing Metal Matrix Composites // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1971. Vol. 49. No. 5. P. 205–213.
22. Cooper G. Forming Processes for Metal Matrix Composites // *Composites*. 1970. Vol. 1. No. 3. P. 153–159.
23. Wallace W.A., Greco V.P. Electroforming High-Strength Continuous Fiber-Reinforced Composites // *Plating*. 1970. Vol. 57. No. 4. P. 342–348.
24. Dean A.V. Further Developments in the Use of Cast and Sprayed Backings on Electroformed Molds and Dies // *Metallurgia*. 1978. Vol. 45. No. 5. P. 243–248.
25. Wearmouth W.R. Application of New Developments in Electroforming Technology in the Toolmaking Industry // *Interfinish 76 – Proceedings of the Ninth World Conference on Metal Finishing*. Amsterdam, 1976. P. 1–21.

26. Watson S.A. Recent Developments in Nickel Electroforming and Backing of Mold Cavities // *Het Ingenieursblad*. 1976. Vol. 45. No. 9. P. 279–287.
27. Dean A.V., Wearmouth W.R. New Backing Techniques for Electroformed Molds and Dies // *Electroplating & Metal Finishing*. 1975. Vol. 28. No. 12. P. 18–23.
28. Bertucio E.C. Electroforming with Collapsible Mandrels // *Metal Finishing*. 1966. Vol. 64. P. 61–66.
29. Marti J.L. The Effects of Some Variables upon Internal Stress of Nickel as Deposited from Sulfamate Electrolytes // *Plating*. 1966. Vol. 53. No. 1. P. 61–71.
30. Dini J.W., Johnson H.R., Saxton H.J. Influence of Sulfur Content on the Impact Strength of Electroformed Nickel // *Electrodeposition Surface Treatment*. 1974. Vol. 2. No. 3. P. 165–176.
31. Whitehurst M.L. Strength and Ductility of Electroformed Nickel // *Symposium on Electrodeposited Metals for Selected Applications*. Columbus, 1972. P. 53–64.
32. Notley J.M. Corner Weakness in Nickel Electroforms // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1972. Vol. 50. No. 1. P. 6–10.
33. MacInnis R.D., Gow K.V. Tensile Strength and Hardness of Electrodeposited Nickel-Iron Alloy Foil // *Plating*. 1971. Vol. 58. No. 2. P. 135–136.
34. Hammond R.A.F. Nickel Plating from Sulphamate Solutions. Part 3 – Structure and Properties of Deposits from Conventional Solutions // *Metal Finishing Journal*. 1970. Vol. 16. No. 188. P. 234–243.
35. Sample C.H., Knapp B.B. Physical and Mechanical Properties of Electroformed Nickel at Elevated and Subzero Temperatures // *Special Technical Publication*. 1962. No. 318. P. 32–43. DOI: 10.1520/STP46002S.
36. Zentner V., Brenner A., Jennings C.W. Physical Properties of Electrodeposited Metals. Part I – Nickel // *American Society for Testing and Materials*. 1952. Vol. 39. No. 8. P. 865–927.
37. McGeough J.A., Rasmussen H. Analysis of Electroforming with Direct Current // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1977. Vol. 19. No. 4. P. 163–166.
38. Dalby S., Nickelsen J., Alting L. Metal Distribution in Electroplating // *Electroplating Metal Finishing*. 1975. Vol. 28. No. 10. P. 18–23.
39. Watson S.A. The Throwing Power of Nickel and Other Plating Solutions // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 1960. Vol. 37. P. 28.
40. Edwards R. Electroforming for Holographic Reproduction // *Plating and Surface Finishing*. 1988. Vol. 75. No. 3. P. 30–31.
41. Legierse P.E.J. Electroformed Molds for Optical Readout Disks // *Plating and Surface Finishing*. 1984. Vol. 71. No. 12. P. 20–25.
42. Legierse P.E.J. New Developments for Mastering and Electroforming Optical Disks // *Plating and Surface Finishing*. 1990. Vol. 77. No. 1. P. 48–50.
43. Schmidt F.J., Hess I.J. Properties of Electroformed Aluminum // *Plating*. 1966. Vol. 55. No. 2. P. 229–234.
44. Senderoff S. Electrodeposition of Refractory Metals // *Metallurgical Review*. 1966. Vol. 11. P. 97–112.
45. Silman H. Electrodeposition from Molten Salts // *Finishing Industry*. 1980. Vol. 4. No. 4. P. 8–90.

References

1. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, vol. 6 (260), pp. 3–16.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Salakhova R.K., Tikhobrazov A.B. Thermal resistance of electrolytic chromium coatings. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-60-67.
4. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
5. Buznik V.M., Kablov E.N. *Arctic materials science*. Tomsk: Tomsk State University, 2018, vol. 3, 44 c.

6. Khmeleva K.M., Kozlov I.A., Nikitin Ya.Yu., Nikiforov A.A. Modern trends of protective galvanic coatings working at high temperatures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 03, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.
7. Salakhova R.K., Tikhoobrazov A.B., Farafonov D.P., Smirnova T.B. Features of electrolytic deposition of abrasive-wear-resistant nickel-based coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 03, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.
8. Di Bari G.A. *Electroforming: Electroplating Engineering Handbook*. Ed. L.J. Durney. 4th ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984, pp. 474–490.
9. Huang C.H., Wu H.M., Hon Y.H. High-Strength Electroformed Nickel. *Plating and Surface Finishing*, 1990, vol. 77, pp. 56–59.
10. Safranek W.H. The Properties of Electrodeposited Metals and Alloys. A Handbook. *Journal of The Electrochemical Society*, 1975, vol. 122 (8), p. 270C. DOI: 10.1149/1.2134416.
11. Wearmouth W.R., Belt K.C. Electroforming with Heat-Resistant Sulfur-Hardened Nickel. *Plating and Surface Finishing*, 1979, vol. 10, pp. 53–57.
12. Dini J.W., Johnson H.R., Brooks J.A. Zinc in Sulfamate Nickel Deposits – Influence on Weldability of Electroforms. *Metal Finishing*, 1979, vol. 77, no. 2, pp. 99–101.
13. Brooks J.A., Dini J.W., Johnson H.R. *Effects of Impurities on the Weldability of Electroformed Nickel*. US Sandia Laboratories, 1978, p. 36.
14. Dini J.W., Johnson H.R. Some Property Data for Nickel-Cobalt Electrodeposits. *Journal of Materials Science*, 1976, vol. 11, no. 9, pp. 1779–1780.
15. Wearmouth W.R., Belt K.C. Mechanical Properties and Electroforming Applications of Nickel-Cobalt Electrodeposits. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1974, vol. 52, no. 3, pp. 114–118.
16. Snaith D.W., Groves P.D. Some Further Studies of the Mechanism of Cermet Electrodeposition. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1977, vol. 55, no. 3, pp. 136–140.
17. Sykes J.M., Allner D.J. Mechanisms for the Formation of Electrodeposited Composite Coatings. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1974, vol. 52, p. 28.
18. Malone G.A. Electrodeposition of Dispersion Strengthened Alloys. Symposium on Electrodeposited Metals for Selected Applications, Battelle Memorial Laboratories, 1991, vol. 78, pp. 58–62.
19. Harris S.J., Boden P.J. Electroforming with Composite Materials. *Electroplating Metal Finishing*, 1973, vol. 26, no. 5, pp. 9–13.
20. Bazzard R., Boden P.J. Codeposition of Chromium Particles in a Nickel Matrix. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1972, vol. 50, no. 2, pp. 63–69.
21. Harris S.J., Baker A.A., Hall A.F., Bache R.J. Electroforming Filament Winding Process – Method of Producing Metal Matrix Composites. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1971, vol. 49, no. 5, pp. 205–213.
22. Cooper G. Forming Processes for Metal Matrix Composites. *Composites*, 1970, vol. 1, no. 3, pp. 153–159.
23. Wallace W.A., Greco V.P. Electroforming High-Strength Continuous Fiber-Reinforced Composites. *Plating*, 1970, vol. 57, no. 4, pp. 342–348.
24. Dean A.V. Further Developments in the Use of Cast and Sprayed Backings on Electroformed Molds and Dies. *Metallurgia*, 1978, vol. 45, no. 5, pp. 243–248.
25. Wearmouth W.R. Application of New Developments in Electroforming Technology in the Toolmaking Industry. *Interfinish 76 – Proceedings of the Ninth World Conference on Metal Finishing*. Amsterdam, 1976, pp. 1–21.
26. Watson S.A. Recent Developments in Nickel Electroforming and Backing of Mold Cavities. *Het Ingenieursblad*, 1976, vol. 45, no. 9, pp. 279–287.
27. Dean A.V., Wearmouth W.R. New Backing Techniques for Electroformed Molds and Dies. *Electroplating & Metal Finishing*, 1975, vol. 28, no. 12, pp. 18–23.
28. Bertucio E.C. Electroforming with Collapsible Mandrels. *Metal Finishing*, 1966, vol. 64, pp. 61–66.
29. Marti J.L. The Effects of Some Variables upon Internal Stress of Nickel as Deposited from Sulfamate Electrolytes. *Plating*, 1966, vol. 53, no. 1, pp. 61–71.
30. Dini J.W., Johnson H.R., Saxton H.J. Influence of Sulfur Content on the Impact Strength of Electroformed Nickel. *Electrodeposition Surface Treatment*, 1974, vol. 2, no. 3, pp. 165–176.

31. Whitehurst M.L. Strength and Ductility of Electroformed Nickel. *Symposium on Electrodeposited Metals for Selected Applications*. Columbus, 1972, pp. 53–64.
32. Notley J.M. Corner Weakness in Nickel Electroforms. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1972, vol. 50, no. 1, pp. 6–10.
33. MacInnis R.D., Gow K.V. Tensile Strength and Hardness of Electrodeposited Nickel-Iron Alloy Foil. *Plating*, 1971, vol. 58, no. 2, pp. 135–136.
34. Hammond R.A.F. Nickel Plating from Sulphamate Solutions. Part 3 – Structure and Properties of Deposits from Conventional Solutions. *Metal Finishing Journal*, 1970, vol. 16, no. 188, pp. 234–243.
35. Sample C.H., Knapp B.B. Physical and Mechanical Properties of Electroformed Nickel at Elevated and Subzero Temperatures. *Special Technical Publication*, 1962, no. 318, pp. 32–43. DOI: 10.1520/STP46002S.
36. Zentner V., Brenner A., Jennings C.W. Physical Properties of Electrodeposited Metals. Part I – Nickel. *American Society for Testing and Materials*, 1952, vol. 39, no. 8, pp. 865–927.
37. McGeough J.A., Rasmussen H. Analysis of Electroforming with Direct Current. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1977, vol. 19, no. 4, pp. 163–166.
38. Dalby S., Nickelsen J., Alting L. Metal Distribution in Electroplating. *Electroplating Metal Finishing*, 1975, vol. 28, no. 10, pp. 18–23.
39. Watson S.A. The Throwing Power of Nickel and Other Plating Solutions. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1960, vol. 37, pp. 28.
40. Edwards R. Electroforming for Holographic Reproduction. *Plating and Surface Finishing*, 1988, vol. 75, no. 3, pp. 30–31.
41. Legierse P.E.J. Electroformed Molds for Optical Readout Disks. *Plating and Surface Finishing*, 1984, vol. 71, no. 12, pp. 20–25.
42. Legierse P.E.J. New Developments for Mastering and Electroforming Optical Disks. *Plating and Surface Finishing*, 1990, vol. 77, no. 1, pp. 48–50.
43. Schmidt F.J., Hess I.J. Properties of Electroformed Aluminum. *Plating*, 1966, vol. 55, no. 2, pp. 229–234.
44. Senderoff S. Electrodeposition of Refractory Metals. *Metallurgical Review*, 1966, vol. 11, pp. 97–112.
45. Silman H. Electrodeposition from Molten Salts. *Finishing Industry*, 1980, vol. 4, no. 4, pp. 8–90.

Информация об авторах

Толмачев Ян Вячеславович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кравченко Дмитрий Владимирович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козлов Илья Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Герасимов Михаил Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н., ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН», dir@phych.ac.ru

Никифоров Андрей Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Jan V. Tolmachev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry V. Kravchenko, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya A. Kozlov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail V. Gerasimov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), Federal State Budgetary Institution of Science A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, dir@phych.ac.ru

Andrey A. Nikiforov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.06.2022.
The article was submitted 08.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 15.06.2022.