

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-I-39-44>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЛИТАХ НИКЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЗИОМЕТРА К-100

© Розалия Кабировна Салахова*, Андрей Борисович Тихообразов,
Татьяна Борисовна Смирнова

Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов — Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (УНТЦ ВИАМ — НИЦ «Курчатовский институт»), Россия, 432010, г. Ульяновск, а/я 3104; *e-mail: lab2viam@mail.ru

*Статья поступила 15 августа 2022 г. Поступила после доработки 7 октября 2022 г.
Принята к публикации 16 ноября 2022 г.*

В современной гальванотехнике используются электролиты, как правило, со специальными добавками в виде поверхностно-активных веществ (ПАВ). Особенно это актуально для электролитов никелирования, осаждение покрытий в которых часто сопровождается питтингообразованием, пористостью и невысокой прочностью сцепления с основой. В работе представлены результаты исследования поверхностных явлений в электролитах никелирования с помощью процессорного тензиометра K-100 KRUSS. Методом пластины Вильгельми определяли величину поверхностного натяжения стандартного электролита Уоттса и электролитов никелирования с ПАВ — блескообразующей (сахарин) и антипиттинговой (RADO-11) добавками. Поверхностные явления на границе раздела электролит — твердое тело (стальной образец) анализировали с использованием модели OWRK. На основе краевого угла смачивания образца в тестовых жидкостях (дистиллированная вода, *n*-гексан) оценивали свободную энергию поверхности твердого тела. Установлено, что антипиттинговая добавка RADO-11 эффективнее сахарина повышает смачиваемость стальных образцов и прочность сцепления на границе электролит — твердое тело. Полученные результаты могут быть использованы при никелировании пластмасс и полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: тензиометр K-100; электролит никелирования; поверхностное натяжение; краевой угол смачивания; свободная энергия поверхности.

STUDY OF SURFACE PHENOMENA IN NICKEL-PLATED ELECTROLYTES USING A K-100 TENSIO METER

© Rosalia K. Salakhova*, Andrey B. Tikhobrazov, Tatiana B. Smirnova

Ulyanovsk Scientific and Technological Center of the All-Russian Institute of Aviation Materials — National Research Center “Kurchatov Institute” (STTC VIAM — NRC “Kurchatov Institute”), PO Box 3104, Ulyanovsk, 432010, Russia;

*e-mail: lab2viam@mail.ru

Received August 15, 2022. Revised October 7, 2022. Accepted November 16, 2022.

Modern electroplating usually suggests using electrolytes with special additives in the form of surface-active substances (surfactants). This is especially important for nickel plating electrolytes because of pitting, porosity, and low adhesion strength often accompanying the deposition of coatings is those electrolytes. We present the results of studying surface phenomena in nickel plating electrolytes using a K-100 KRUSS processor tensiometer. The Wilhelmy plate method was used to determine the surface tension of the standard Watts electrolyte and nickel-plating electrolytes added with surfactants, i.e., brightening (saccharin) and anti-pitting (RADO-11) additives. Surface phenomena at the electrolyte-solid interface have been analyzed using the OWRK model. The free energy of the solid surface (steel sample) has been estimated using the contact angle of the sample in test liquids (distilled water, *n*-hexane). It is shown that the anti-pitting additive RADO-11 is more effective compared to saccharin in increasing the wettability of steel samples and the adhesion strength at the electrolyte-solid interface. The results obtained can be used for nickel plating of plastics and polymer composite materials.

Keywords: tensiometer K-100; nickel-plating electrolyte; surface tension; contact angle; free energy of the surface.

Введение

Переход к новым видам авиационных материалов требует системных исследований их тонкой структуры, морфологии поверхности и межфазных границ, а также механизмов поверхностных явлений [1, 2]. Анализ закономерностей протекания поверхностных явлений в различных дисперсных системах позволит найти эффективные способы управления сложными технологическими процессами. Отметим, что с поверхностными свойствами веществ связаны такие процессы, как смачивание, адсорбция, испарение, сублимация, конденсация, диффузия и др. [3, 4]. Исследования в области смачивания и капиллярных явлений имеют широкий спектр практических приложений, поскольку многие технологические процессы связаны с растеканием жидкости по твердой поверхности [5 – 9].

В настоящее время существует множество приборов и методик исследования поверхностных явлений. Так, для определения поверхностного натяжения жидкостей часто используют методы максимального давления пузырьков и счета капель [10, 11]. К их недостаткам можно отнести необходимость введения поправочных коэффициентов ввиду испарения жидкости с поверхности капель при их длительном образовании, т.е. они характеризуются невысокой точностью.

Заметим, что принятые методики совершенствуются в основном за счет компьютерной обработки экспериментальных данных и математического моделирования физико-химических основ поверхностных явлений с использованием современного высокоточного оборудования [12, 13].

Электролиты никелирования наиболее востребованы в гальванотехнике [14 – 16]. Известно, что они очень чувствительны к посторонним примесям, а к проблемам самого никелевого покрытия можно отнести образование питтингов, возникновение которых связано с задержкой водородных пузырьков на поверхности осаждаемого никеля. Для устранения подобных дефектов в электролиты никелирования добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ) различного назначения [17 – 19]. Так, например, антипиттинговые добавки способствуют повышению смачиваемости покрываемой поверхности и таким образом предотвращают появление дефектов. В случае плохого смачивания пузырьки водорода, выделяющегося на катоде совместно с никелем, задерживаются на покрываемой поверхности и препятствуют осаждению металла с образованием черных точечных ямок — питтингов. Блескообразующие и выравнивающие добавки, которые также используют в электролитах никелирования, не только меняют внешний вид покрытий, но и повышают их микротвердость и

предел прочности. Однако при этом необходимо оптимизировать концентрацию вводимых ПАВ, так как многие добавки в зависимости от концентрации способны менять величину и характер (знак) возникающих в покрытиях внутренних напряжений [20, 21].

Цель работы — исследование поверхностного натяжения (ПН) электролитов никелирования с добавками ПАВ и влияния ПАВ на полярность электролитов, а также адсорбционно-физические и энергетические характеристики смачиваемого твердого тела.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали следующие электролиты никелирования: стандартный электролит Уоттса (ГОСТ 9.305–84, состав 1); электролит Уоттса с добавкой сахараина; электролит Уоттса с добавкой Chemeta RADO-11. По своему функциональному назначению сахарин относится к блескообразующим ПАВ [18], а Chemeta RADO-11 — к антипиттинговым смачивающим добавкам. Физико-химические свойства стандартного электролита Уоттса при 25 и 50 °С соответственно [15, 22]: плотность (г/см^3) — 1,143 и 1,137; динамическая вязкость ($\text{мПа} \cdot \text{с}$) — 148 и 115; удельная электропроводность (См/м) — 4,5 и 8.

Для изучения поверхностных явлений на границе раздела электролит — твердое тело использовали образец из стали 30ХГСА размером $25 \times 15 \times 3$ мм, прошедший операцию обезжиривания в бензине типа «Нефрас». Перед каждым измерением стальной образец промывали в дистиллированной воде, затем в этиловом спирте и сушили на воздухе до полного высыхания.

Поверхностные свойства жидких и твердых тел исследовали с помощью процессорного тензиометра K-100 KRUSS.

ПН электролитов никелирования без добавок и с добавками ПАВ определяли методом пластины Вильгельми (SFT Plate) с использованием программного обеспечения LabDesk 3.2. Стандартная пластина Вильгельми — платинированный образец известного размера, полностью смачиваемый жидкостью за счет высокой поверхностной энергии платины (краевой угол смачивания (КУС) — 0°). При погружении пластины в жидкость ПН электролитов рассчитывали по максимальной нагрузке на весовую систему прибора, при этом измеряли длину смачиваемой поверхности. Условия проведения испытаний методом SFT Plate: скорость погружения пластины — 10 мм/мин; глубина погружения — 2 мм; максимальное время измерения — 60 с; стандартное отклонение — не более 0,1 мН/м.

Полярную (кислотно-основную) и дисперсионную составляющие ПН электролитов никели-

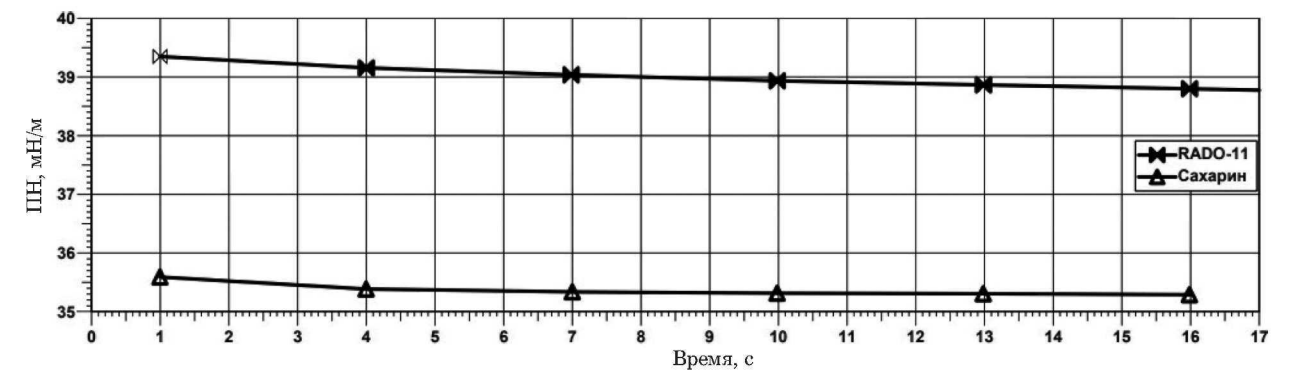


Рис. 1. Зависимость ПН электролитов никелирования с добавками ПАВ от времени
Fig. 1. Time dependence of the surface tension of nickel-plating electrolytes with surfactant additives

рования определяли с помощью программы Advance (метод Liquid polarity). Расчет основывался на модели, согласно которой КУС — результат взаимодействия полярной и дисперсной компонент жидкости и твердого тела. В программе использовали данные о контактном угле жидкости с чисто дисперсным твердым телом с известной свободной поверхностной энергией (СЭП) и данные о ПН жидкости. В качестве дисперсного твердого материала использовали тефлоновый провод (диаметр — 0,54 мм, СЭП чистого тефлона (PTFE) — 18,0 мДж/м² (значение из базы данных программы Advance KRUSS)). Динамический КУС тефлона определяли методом одиночного волокна, погружая тефлоновый провод в электролит с известным ПН.

КУС стального образца в тестовых жидкостях и электролитах никелирования измеряли динамическим методом пластины Вильгельми. Используя вместо стандартной пластины Вильгельми исследуемый образец с погружением в жидкость с известным ПН и рассчитав длину линии смачивания L , можно определить КУС любого образца прямоугольной формы. Условия измерений КУС стального образца: скорость погружения (скорость возврата) — 10 мм/мин; глубина погружения — 5 мм; L — 36 мм.

СЭП стального образца измеряли с применением модели OWRK, по которой СЭП состоит из дисперсионной и полярной частей. Причем первая отвечает за слабые межмолекулярные и меж-

атомные взаимодействия, вторая — за сильные взаимодействия и водородные связи [23].

Работу адгезии W_A электролитов никелирования к стальному образцу рассчитывали по экспериментальным значениям ПН электролитов σ_L и КУС (θ) образца по уравнению Дюпре – Юнга:

$$W_A = \sigma_L(1 + \cos \theta).$$

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены результаты определений ПН электролитов никелирования с добавками ПАВ (концентрации сахараина и RADO-11 — 1,5 г/л и 1 мл/л соответственно). Измерения проводили методом пластины Вильгельми при температуре 50 °С (рабочая температура никелирования в электролите Уоттса — 45 – 60 °С). Отметим, что величина ПН стандартного электролита никелирования без добавок составила 48,2 мН/м.

Видно, что в случае блескообразующей добавки сахараина ПН уменьшается быстрее, чем при RADO-11.

В табл. 1 приведены дисперсионная и полярная составляющие ПН электролитов, необходимые для оценки СЭП твердого тела по методу OWRK. Расчет составляющих базировался на данных КУС тефлонового провода в электролитах.

Анализ соотношений полярной и дисперсионной составляющих ПН стандартного электроли-

Таблица 1. Составляющие ПН электролитов
Table 1. Components of the surface tension of electrolytes

Электролит никелирования	КУС тефлон – электролит, град.	σ_L , мН/м	Составляющая, мН/м	
			Дисперсионная σ_L^D	Полярная σ_L^P
Стандартный	108,85 ± 3,36	48,16	14,76 ± 2,42	33,40 ± 2,42
Стандартный с сахарином	83,13 ± 7,6	35,3	21,7 ± 5,11	13,6 ± 5,11
Стандартный с RADO-11	51,09 ± 5,97	38,67	38,67	0

Таблица 2. СЭП образца из стали 30ХГСА**Table 2.** Free energy of a steel 30KhGSA sample surface

КУС, град.		СЭП, мН/м
Дистиллированная вода	n-Гексан (патекающий/оттекающий)	
90,76 ± 4,09	22,45 ± 0,75/25,15 ± 0,5	23,51 ± 1,77 (дисперсная часть — 17,87 ± 0,09, полярная часть — 5,65 ± 1,68)

Таблица 3. Адгезия образца из стали 30ХГСА в никелевых электролитах**Table 3.** Adhesion of a steel 30KhGSA sample in nickel electrolytes

Электролит никелирования	КУС, град.	Адгезия, мН/м
Стандартный	82,37 ± 4,16	54,56
Стандартный с сахарином	55,79 ± 2,68	55,14
Стандартный с RADO-11	46,22 ± 1,54	65,43

та показывает, что электролит Уоттса — полярная жидкость (полярность — 69 %). Добавление сахараина уменьшает полярную составляющую, а антипиттинговая добавка RADO-11 превращает электролит никелирования в полностью неполярную дисперсионную жидкость. Можно заключить, что в электролитах с ПАВ образцы с гидрофобными свойствами будут смачиваться значительно лучше, чем в стандартном электролите без добавок. Другими словами, подготовку поверхности образцов перед никелированием в электролитах, содержащих сахарин и RADO-11, можно упростить. В случае никелирования полимерных композиционных материалов и пластмасс — дисперсных твердых тел — целесообразно использовать неполярный электролит никелирования с RADO-11.

Результаты определения СЭП стального образца по значениям КУС в тестовых жидкостях представлены в табл. 2. Использовали один из наиболее доступных методов определения СЭП твердого тела — по смачиваемости [24].

Отметим, что отличие между двумя углами (патекающим и оттекающим) можно использовать для оценки шероховатости поверхности металлических образцов. При этом чем больше разница, тем больше величина шероховатости. Рост шероховатости приводит к увеличению площади поверхности раздела фаз по сравнению с гладкой поверхностью. С шероховатостью поверхности твердых тел связан эффект гистерезиса смачивания (отклонение измеряемых статических краевых углов от равновесных значений) [25 – 27].

Механическая обработка поверхности практически не влияет на изменение СЭП материала, которая зависит исключительно от природы металла. Колебания СЭП незначительны и связа-

ны в основном с неоднородностью поверхности [28, 29].

По соотношению полярной и дисперсной частей СЭП стального образца можно прогнозировать смачиваемость поверхности в полярных и неполярных (дисперсионных) жидкостях. Согласно двухкомпонентной модели, смачивание и адгезия максимальны, если согласуются не только СЭП твердого тела и ПН жидкости, но и соответствующие полярные и дисперсные доли веществ [24].

Смачивание твердого тела в жидкости невозможно без адгезионного взаимодействия жидкости к этому телу, т.е. адгезия и смачивание — две стороны одного и того же явления. Адгезия обуславливает сцепление между твердым телом и жидкостью, смачивание — явление, возникающее в результате контактного взаимодействия. Прочность сцепления количественно характеризуется работой адгезии W_A , соответствующей работе, затрачиваемой на разрыв межфазного соединения единицы площади поверхности.

В табл. 3 представлены рассчитанные по уравнению Дюпре – Юнга (1) значения адгезии исследуемых электролитов никелирования к стальному образцу. Заметим, что уравнение (1) справедливо для случаев с однородной и чистой твердой поверхностью [27].

Расчеты проводили по экспериментальным значениям ПН электролитов никелирования и КУС стального образца. Получили, что величина адгезионного взаимодействия прямо пропорциональна ПН и обратно пропорциональна КУС. Поэтому лишь значительное снижение КУС образца в электролите с добавкой RADO-11 в сравнении со стандартным электролитом (примерно в 1,8 раза) обеспечивает заметное повышение адгезионного взаимодействия стального образца с никелевым электролитом.

Исходя из полученных данных по дисперсионной и полярной составляющим СЭП твердого образца (см. табл. 2), поверхность стального образца можно считать гидрофобной. Известно, что в этом случае из водных растворов ПАВ адсорбируются и на твердой поверхности, и на границе раствор – воздух [27].

Анализ данных по адгезии позволяет предположить, что антипиттинговая добавка RADO-11 более эффективно адсорбируется на поверхности

образца, чем сахарин (см. табл. 3). Это в конечном итоге приводит к повышению гидрофилизации поверхности и, соответственно, увеличению работы адгезии W_A . Поверхностные характеристики электролитов никелирования приведены на рис. 2.

Заключение

Проведенные исследования с использованием процессорного тензиометра К-100 по определению поверхностных свойств электролитов никелирования (ПН, его составляющие) и энергетических характеристик образца из стали 30ХГСА (СЭП, адгезия) показали, что антипиттинговая добавка RADO-11 эффективнее сахараина повышает смачиваемость стальных образцов и прочность сцепления на границе электролит — твердое тело. Введение в электролит никелирования добавки RADO-11 превращает его в полностью неполярную дисперсионную жидкость и позволяет рекомендовать электролит к использованию для никелирования пластмасс и полимерных композиционных материалов.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. К 80-летию ВИАМА / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 5. С. 79 – 82.
2. Орлов М. Р. Стратегические направления развития испытательного центра ФГУП ВИАМ / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 387 – 393.
3. Беляев А. П., Кучук В. И. Физическая и коллоидная химия. — М.: Геотар-Медиа, 2014. — 752 с.
4. Гельфман М. И., Ковалевич О. В., Юстратов В. П. Коллоидная химия. — СПб.: Лань, 2010. — 336 с.
5. Шимко Е. А., Соломатин К. В., Кирколул Е. Р., Лескова С. С. Методы экспериментального определения поверхностного натяжения / Известия Алтайского государственного университета. 2016. № 1(89). С. 88 – 91.
6. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34). С. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
7. Каблов Е. Н. России нужны материалы нового поколения / Редкие земли. 2014. № 3. С. 8 – 13.
8. Удод К. А., Трофименко Н. Н., Романенко Д. Н., Севальнев Г. С. Перспективы развития конструкционных сталей, легированных алюминием / Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 9 – 13. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13
9. 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. Ст. 8. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110
10. Салахова Р. К., Тихообразов А. Б., Смирнова Т. Б. Об эффективности применения пенообразователя CHROM

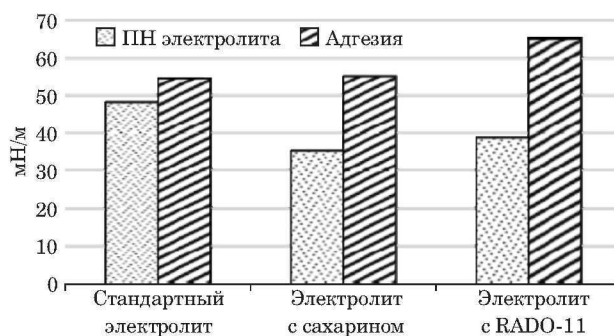


Рис. 2. Поверхностные характеристики электролитов никелирования

Fig. 2. Surface characteristics of nickel-plating electrolytes

- Р-1 при электролитическом хромировании / Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 6(162). С. 264 – 268.
11. Бородин С. А. Исследование процесса растекания капли жидкости, наносимой на поверхность подложки / Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 66 – 68.
 12. Бараников А. А., Постнов В. И., Вешкин Е. А., Старостина И. В. Связь энергетических характеристик поверхности стеклопластика марки ВПС-53К с прочностью клеевого соединения на его основе / Труды ВИАМ. 2020. № 10. Ст. 5. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50
 13. Бараников А. А., Сатдинов Р. А., Вешкин Е. А., Куршев Е. В. Влияние плазмы атмосферного давления на прочность клеевого соединения на основе углепластика / Труды ВИАМ. 2021. № 12. Ст. 6. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54
 14. Салахова Р. К., Тихообразов А. Б., Смирнова Т. Б., Кирилин С. Г. Никелирование угле- и стеклопластика с целью повышения эрозионной стойкости конструкций из ПКМ / Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 5(197). С. 221 – 227.
 15. Соловьева Н. Д., Фролова И. И., Легкая Д. А. Физико-химические свойства малокомпонентного электролита никелирования / Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16. № 2. С. 201 – 205.
 16. Фролова И. И., Соловьева Н. Д., Рыбалкина И. П., Попова Н. Е. Использование нестационарных режимов электроосаждения никелевых покрытий / Перспективные материалы. 2015. № 7. С. 58 – 63.
 17. Бебих Г. Ф., Муравьева Л. В., Долгих А. И. Поверхностно-активные вещества на основе производных карбамида / Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. № 5. С. 21 – 26.
 18. Асадов З. Г., Ахмедова Г. А., Агазаде А. Д. и др. Поверхностно-активные вещества ионно-жидкостной природы / Журнал общей химии. 2012. Т. 82. № 12. С. 1960 – 1972.
 19. Балакай В. И. Особенности электроосаждения никеля из хлоридного электролита в присутствии различных блескообразующих добавок / Известия вузов. Технические науки. 2002. № 1. С. 100 – 103.
 20. Ананьева Е. Ю., Рогожин В. В., Михаленко М. Г. и др. Гальваническое осаждение блестящих покрытий никель-бор / Современные наукоемкие технологии. 2017. № 7. С. 18 – 22.
 21. Левинзон А. М. Электролитическое осаждение металлов подгруппы железа. — Л.: Машиностроение. 1983. — 96 с.
 22. Салахова Р. К., Семеньев В. В., Тихообразов А. Б. Исследование удельной электропроводности электролитов хромирования и никелирования / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 3. С. 70 – 78.
 23. Данилов В. Е., Королев Е. В., Айзенштадт А. М., Строкова В. В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оун-

- са – Вендта – Рабеля – Кьельбле / Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66.
24. **Зинина И. Н., Пиманов М. В.** Влияние поверхностной энергии металлических образцов на прочность клеевых соединений / Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 2(12). С. 127 – 130.
 25. **Волков В. И., Лескова С. С., Кирколуп Е. Р.** Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания / Известия Алтайского государственного университета. 2006. № 1(39). С. 106 – 110.
 26. **Сумм Б. Д.** Гистерезис смачивания / Соросовский образовательный журнал. 1999. № 7. С. 98 – 102.
 27. **Назаров В. В.** Коллоидная химия. — М.: ДеЛи плюс, 2015. — 250 с.
 28. **Медведев А. В., Разумеев К. Э.** Исследование влияния шероховатости стальных образцов на смачиваемость замасливающей эмульсией / Технология текстильной промышленности. 2018. № 1(373). С. 191 – 197.
 29. **Товбин Ю. К., Зайцева Е. С., Гвоздева Е. Е.** Влияние адсорбции на энергетические характеристики шероховатого твердого тела / Химическая физика. 2019. Т. 38. № 6. С. 42 – 52.
- ## REFERENCES
1. **Kablov E. N.** To the 80th anniversary of VIAM / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 5. P. 79 – 82 [in Russian].
 2. **Orlov M. R.** Strategic directions for the development of the FSUE VIAM test center / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N S. P. 387 – 393 [in Russian].
 3. **Belyaev A. P., Kuchuk V. I.** Physical and colloidal chemistry. — Moscow: Geotar-Media, 2014. — 752 p. [in Russian].
 4. **Gelfman M. I., Kovalevich O. V., Yustratov V. P.** Colloidal chemistry. — St. Petersburg: Lan', 2010. — 336 p. [in Russian].
 5. **Shimko E. A., Solomatin K. V., Kirkolup E. R., Leskova S. S.** Methods for experimental determination of surface tension / Izv. Altai. Gos. Univ. 2016. N 1(89). P. 88 – 91 [in Russian].
 6. **Kablov E. N.** Innovative developments of FSUE “VIAM” of the State Scientific Center of the Russian Federation for the implementation of the “Strategic Directions for the Development of Materials and Technologies for Their Processing for the Period until 2030” / Aviats. Mater. Tekhnol. 2015. N 1(34). P. 3 – 33 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
 7. **Kablov E. N.** Russia needs new generation materials / Redkie zemli. 2014. N 3. P. 8 – 13 [in Russian].
 8. **Udod K. A., Trofimenko N. N., Romanenko D. N., Sevalnev G. S.** Prospects for the development of structural steels alloyed with aluminum / Aviats. Mater. Tekhnol. 2019. N 3. P. 9 – 13 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13
 9. **Salakhova R. K., Tikhobrazov A. B., Farafonov D. P., Smirnova T. B.** Features of Electrolytic Deposition of Abrasive-Wear-Resistant Coatings Based on Nickel / Tr. VIAM. 2022. N 2. Art. 8 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110
 10. **Salakhova R. K., Tikhobrazov A. B., Smirnova T. B.** On the effectiveness of using CHROM P-1 foaming agent in electrolytic chromium plating / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2018. Vol. 14. N 6(162). P. 264 – 268 [in Russian].
 11. **Borodin S. A.** Investigation of the process of spreading of a liquid drop deposited on the surface of a substrate / Komp'yut. Opt. 2005. N 28. P. 66 – 68 [in Russian].
 12. **Barannikov A. A., Postnov V. I., Veshkin E. A., Starostina I. V.** Relationship between the energy characteristics of the surface of fiberglass grade VPS-53K and the strength of the adhesive bond based on it / Tr. VIAM. 2020. N 10. Art. 5 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50
 13. **Barannikov A. A., Satdinov R. A., Veshkin E. A., Kurshhev E. V.** Influence of Atmospheric Pressure Plasma on the Strength of an Adhesive Joint Based on CFRP / Tr. VIAM. 2021. N 12. Art. 6 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-47-54
 14. **Salakhova R. K., Tikhobrazov A. B., Smirnova T. B., Kirilin S. G.** Nickel plating of carbon and fiberglass in order to increase the erosion resistance of PCM structures / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2021. Vol. 17. N 5(197). P. 221 – 227 [in Russian].
 15. **Soloveva N. D., Frolova I. I., Legkaya D. A.** Physical and chemical properties of a low-component nickel plating electrolyte / Kondens. Sredy Mezhfaz. Gran. 2014. Vol. 16. N 2. P. 201 – 205 [in Russian].
 16. **Frolova I. I., Soloveva N. D., Rybalkina I. P., Popova N. E.** The use of non-stationary modes of electrodeposition of nickel coatings / Perspekt. Mater. 2015. N 7. P. 58 – 63 [in Russian].
 17. **Bebikh G. F., Muravyova L. V., Dolgikh A. I.** Surfactants based on carbamide derivatives / Vse Mater. Entsikl. Sprav. 2011. N 5. P. 21 – 26 [in Russian].
 18. **Asadov Z. G., Akhmedova G. A., Agazade A. D., et al.** Surfactants of ion-liquid nature / Zh. Obshch. Khimii. 2012. Vol. 82. N 12. P. 1960 – 1972 [in Russian].
 19. **Balakai V. I.** Peculiarities of Nickel Electrodeposition from Chloride Electrolyte in the Presence of Various Brightening Additives / Izv. Vuzov. Tekhn. Nauki. 2002. N 1. P. 100 – 103 [in Russian].
 20. **Ananyeva E. Yu., Rogozhin V. V., Mikhaleenko M. G., et al.** Galvanic deposition of shiny nickel-boron coatings / Sovr. Naukoem. Tekhnol. 2017. N 7. P. 18 – 22 [in Russian].
 21. **Levinzon A. M.** Electrolytic deposition of iron subgroup metals. — Leningrad: Mashinostroenie, 1983. — 96 p. [in Russian].
 22. **Salakhova R. K., Semenychev V. V., Tikhobrazov A. B.** Investigation of the specific electrical conductivity of chromium and nickel plating electrolytes / Vestn. Samar. Gos. Aërokosm. Univ. 2014. N 3. P. 70 – 78 [in Russian].
 23. **Danilov V. E., Korolev E. V., Aizenshtadt A. M., Strokov V. V.** Features of calculating the surface free energy based on the Owens – Wendt – Rabel – Kjellble model of interfacial interaction / Stroit. Mater. 2019. N 11. P. 66 [in Russian].
 24. **Zinina I. N., Pimanov M. V.** Influence of the surface energy of metal samples on the strength of adhesive joints / Izv. MGTU “MAIMI”. 2011. N 2(12). P. 127 – 130 [in Russian].
 25. **Volkov V. I., Leskova S. S., Kirkolup E. R.** Experimental study of wetting hysteresis / Izv. Altai. Gos. Univ. 2006. N 1(39). P. 106 – 110 [in Russian].
 26. **Summ B. D.** Wetting hysteresis / Soros. Obraz. Zh. 1999. N 7. P. 98 – 102 [in Russian].
 27. **Nazarov V. V.** Colloidal chemistry. — Moscow: DeLi plyus, 2015. 250 p. [in Russian].
 28. **Medvedev A. V., Razumeev K. E.** Investigation of the influence of the roughness of steel samples on the wettability of the lubricating emulsion / Tekhnol. Tekstil. Prom. 2018. N 1(373). P. 191 – 197 [in Russian].
 29. **Tovbin Yu. K., Zajceva E. S., Gvozdeva E. E.** Effect of adsorption on the energy characteristics of a rough solid / Khim. Fizika. 2019. Vol. 38. N 6. P. 42 – 52 [in Russian].