

РИЖСКОЕ КРАСНОЗНАМЕННОЕ ВЫСШЕЕ
ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОЕ ВОЕННОЕ УЧИЛИЩЕ
имени К. Е. ВОРОШИЛОВА

В. А. ИЛЛАРИОНОВ

—
ФР $\frac{112}{235}$

**АЛИТИРОВАНИЕ СТАЛИ
И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ**

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

1957

РИЖСКОЕ КРАСНОЗНАМЕННОЕ ВЫСШЕЕ
ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОЕ ВОЕННОЕ УЧИЛИЩЕ
имени К. Е. ВОРОШИЛОВА

В. А. ИЛЛАРИОНОВ

ФР $\frac{112}{235}$

АЛИТИРОВАНИЕ СТАЛИ
И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рига — 1957

1
Государственная
БИБЛИОТЕКА
СССР
им. В. И. Ленина

4658-65

Алитирование стали и некоторые пути его интенсификации

Алитирование, основной целью которого является повышение жароупорности (окалиностойкости) стали, вследствие возрастающей потребности в дешевых жароупорных материалах и в связи с развитием реактивной и ракетной техники, приобретает все большее значение. В результате многочисленных исследований, которые велись как у нас, так и за границей на протяжении около пятидесяти лет, было предложено большое число способов алитирования.

Технический прогресс и совершенствование производства предъявляет к технологическим схемам новые требования, главным из которых является удобство перевода процесса на массовое высоко-механизированное производство. Задача совершенствования технологических процессов с целью их интенсификации с особой силой подчеркивается в решениях XX съезда КПСС.

Главными недостатками существующих способов алитирования являются сложность технологии и большая энергоемкость процесса.

Задачей нашего исследования является разработка технологии алитирования с целью интенсификации всего процесса. В связи с этим развивается новая теория химизма алитирования и других термохимических процессов насыщения стали металлами (процессов силицирования, хромирования и т. п.), а также исследуется влияние подслоя электролитического никеля на процесс алитирования и на жароупорность никельалитированной стали.

С целью сравнения и оценки различных видов алитирования их необходимо классифицировать в зависимости от характера переноса алюминия от среды — источника к поверхности стального изделия. Необходимо различать три группы методов:

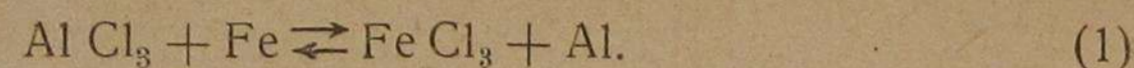
1) методы алитирования с химическим переносом алюминия (газовое алитирование, алитирование в порошкообразных смесях и т. п.);

2) алитирование посредством диффузионного переноса (жидкостное алитирование, алитирование после металлизации, плакирования, покрытия алюминиевыми пастами);

3) методы с гальваническим переносом алюминия (алитирование из водных растворов, органических растворов и расплавленных солей).

Ни один из методов последней группы практического применения не получил вследствие дороговизны и сложности по сравнению с методами первых двух групп. Среди промышленных методов алитирования значительная роль отводится методам с химическим переносом алюминия. Под химическим переносом следует подразумевать цепь процессов: образование летучего хлорида металла на поверхности ферроалюминия, переход хлорида металла к поверхности стального изделия и химическое взаимодействие с нею, сопровождающееся обогащением поверхности стали металлом (алюминием).

По современным представлениям основной реакцией алитирования является реакция между хлористым алюминием и железом:



Данная реакция, допускающая возможность восстановления алюминия из хлоридов железом, в направлении слева направо вследствие более высокой прочности связи атомов хлора с алюминием практически не может протекать.

В работе показано, что пары хлористого алюминия при высокой температуре, воздействуя на поверхность стали или железа, алитирования не вызывают как при атмосферном, так и при повышенном давлении.

Так, при введении образцов из армко-железа в фарфоровую трубку, нагретую до 900—930°, по которой пропускались пары хлористого алюминия в течение 1—2 часов, наблюдается стравливание поверхности образцов без заметного осаждения алюминия. Точно так же алитирование не происходит, если хлористый алюминий нагревать в стальной ампуле. С этой целью порошок хлористого алюминия засыпался в отверстие стального образца, после чего отверстие закрывалось стальным болтом и заваривалось для герметичности с помощью электросварки в водяной ванне. Нагрев образцов производился медленно до 900—950° с выдержкой в печи от одного до трех часов.

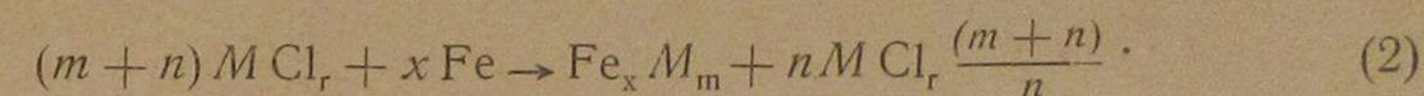
Известно также, что при хлорировании расплавленных алюминиевых сплавов, содержащих примеси железа, при температурах до 1100° железо из сплава не удаляется, т. е. хлориды железа в присутствии алюминия не образуются. Наоборот, как предлагается в некоторых патентах, хлористый алюминий может быть получен из глинозема путем нагрева его с хлористым железом и углем.

Отмеченные факты подтверждаются термодинамическим анализом, устанавливающим у хлористого алюминия более низкую величину свободной энергии образования, чем у хлоридов железа.

Ошибочность представлений о насыщении стали алюминием посредством реакции (1) может быть доказана также в процессе самого алитирования. Действительно, если предположить, что алитирование развивается в результате реакции (1), то процесс насыщения должен сопровождаться заменой одного атома железа одним атомом алюминия. Вследствие того, что атомный вес алюминия вдвое меньше железа, алитирование согласно реакции (1) должно

сопровождаться уменьшением веса образцов. Экспериментальным путем на примерах твердого и газового алитирования, при котором исключалась возможность переноса алюминия путем диффузии, нами показано, что вес образцов не уменьшается, а увеличивается. При этом происходит замещение атомов железа на атомы алюминия в отношении от $\text{Al}:\text{Fe} = 3$ до $\text{Al}:\text{Fe} = 50$.

На основании анализа химизма процессов термодиффузионного насыщения стали металлами предлагается новая трактовка их: поверхностное насыщение стали металлами осуществляется в результате реакций самовосстановления металлов из их летучих хлоридов низшей валентности; протеканию реакций на поверхности стали способствует взаимодействие соединения с железом. Реакция данного типа в общем виде может быть представлена следующим уравнением:

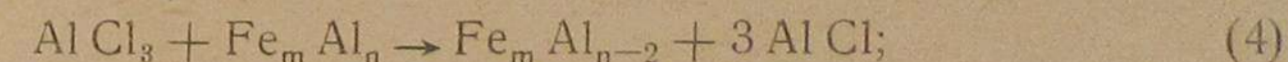
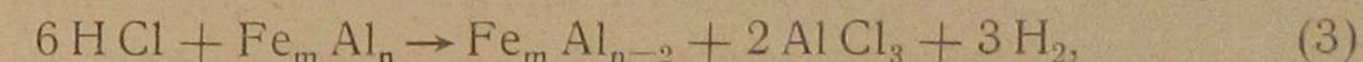


Здесь M — любой из насыщающих элементов, например, Al , Cr , Si и др.; m , n , r — целые числа.

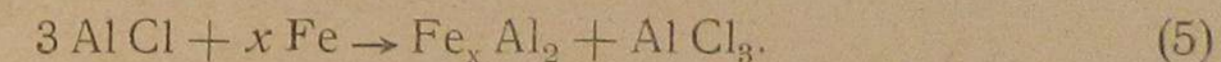
Нетрудно видеть, что по своей кинетике реакция (2) проще реакций, которыми объясняются в настоящее время процессы химического переноса металлов при алитировании, силицировании и хромировании, так как взаимодействие металла с железом не сопровождается замещением атомов железа и выделением их в газообразную среду.

В соответствии с уравнением (2) процесс алитирования может быть представлен следующими реакциями:

а) на поверхности зерен ферроалюминия $\text{Fe}_m \text{Al}_n$ происходит образование субхлорида алюминия AlCl :

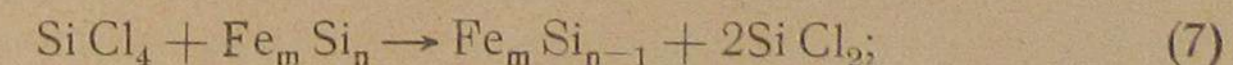
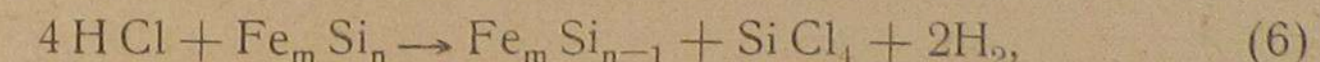


б) на поверхности алитируемой стали:

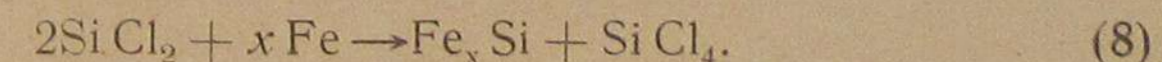


Аналогичным образом изображается процесс силицирования:

а) на поверхности зерен ферросилиция:

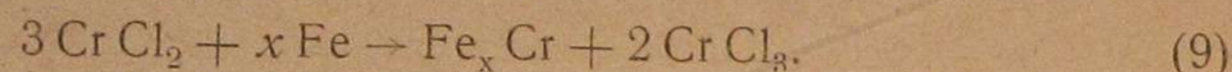


б) на поверхности стали:



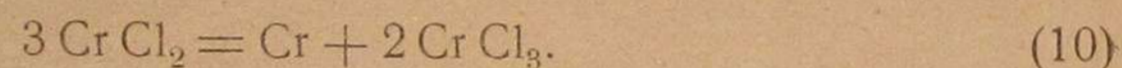
Приведенные реакции алитирования и силицирования, в отличие от существующей в настоящее время теории, удовлетворительно объясняют особенности этих процессов. Так, например, малая вероятность образования субхлорида алюминия $AlCl$ при температуре ниже 800° и субхлорида кремния $SiCl_2$ ниже 950° объясняет, почему насыщение стали протекает при очень высоких температурах. Недостаточно высокая концентрация $AlCl$ и $SiCl_2$ при рабочих температурах насыщения служит причиной большой продолжительности указанных процессов. Далее, данный механизм позволяет объяснить большие числа переноса металла (относительно количества стравленного железа), а также некоторые другие особенности.

Процесс газового хромирования согласно реакции (2) сводится к следующей реакции на поверхности стали:



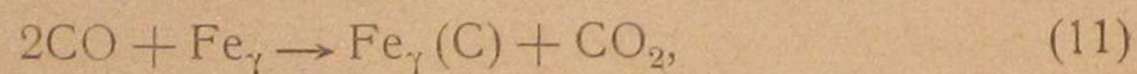
Реакция (9) в значительной степени совпадает с реакцией, высказанной ранее А. Н. Минкевичем и Л. М. Утевским.

В результате исследования диффузионного хромирования в расплавленных солях авторами была предложена для этого случая следующая реакция:



Можно предполагать, что предлагаемая нами теория химического переноса справедлива в отношении многих переходных металлов, большинство из которых является металлами переменной валентности.

Интересной особенностью данной теории является то, что она позволяет процессы насыщения металлами обобщить с теорией цементации. По современным представлениям процесс цементации стали осуществляется благодаря образованию окиси углерода CO — соединения низшей валентности и его взаимодействию с железом



где $Fe_\gamma(C)$ — аустенит.

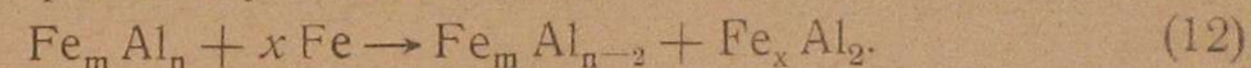
Несмотря на однотипность приведенных реакций (реакций 5, 8, 9, 11), высокая температура насыщения стали различными элементами может обуславливаться различными причинами. Так, необходимость высокой температуры цементации обуславливается высокой температурой образования аустенита; высокая температура хромирования — трудностью испарения $CrCl_2$ (температура кипения около 1200°), а высокая температура алитирования и силицирования — высокой температурой образования субхлоридов алюминия и кремния.

Таким образом, основные недостатки твердого и газового алитирования — высокая температура и большая продолжительность процесса — вытекают из особенностей химического переноса, связанного с образованием субхлорида алюминия.

Объяснение процессов алитирования с помощью реакций самовосстановления алюминия из его субхлоридов позволяет сделать некоторые рекомендации в отношении дальнейшего развития технологии главным образом в отношении ускорения процесса газового алитирования.

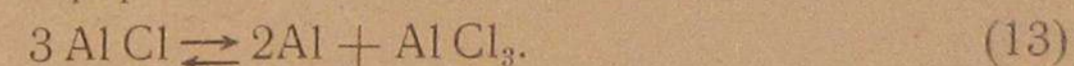
До сих пор газовое алитирование объяснялось реакцией (1). При этом особая роль отводилась алюминию *in statu nascendi*, образующемуся при переходе из газовой фазы в твердую. Такое дополнение не подтверждает справедливости реакции (1). Атомарный алюминий представляет собой пары алюминия, которые вследствие низкой упругости, не в состоянии обеспечить необходимой скорости насыщения. При этом образующийся атомарный алюминий не может приобретать особого активированного состояния, т. к. для этого отсутствуют необходимые возбудители (железо таким возбудителем для алюминия быть не может).

Основная реакция процесса алитирования может быть получена путем суммирования реакций (4) и (5):



Как видно, насыщение поверхности железа алюминием происходит вследствие разности концентрации алюминия в источнике ($Fe_m Al_n$) и в насыщаемом изделии, перенос же алюминия происходит за счет летучих субхлоридов.

Конечная реакция процесса (реакция (5)) может быть представлена в упрощенной форме:



Равновесие данной реакции в сильной степени зависит от температуры и давления. При понижении температуры, а также при повышении давления реакция (13) должна смещаться в сторону выделения алюминия. Это позволяет в условиях газового алитирования сознательно направлять процесс по пути ускорения выделения алюминия на алитируемом изделии. Для этого в реакционной камере необходимо создать две зоны, отличающиеся температурой или давлением, а именно: в зоне, в которой происходит образование субхлорида $AlCl$ (реакция (4)), должна поддерживаться более высокая температура или пониженное давление по сравнению с зоной, в которой находится алитируемое изделие.

Таким образом, объяснение алитирования посредством реакций самовосстановления представляет большой практический интерес. С другой стороны, общность объяснения с процессами хромирования, силицирования и цементации позволяет предполагать о возможности использования подобных реакций в процессах химического переноса при термодиффузионном насыщении и очистке ряда других металлов переменной валентности.

Другим направлением в совершенствовании процесса алитирования является разработка методов с иным, нехимическим, характером переноса алюминия к поверхности.

Недостатки алитирования с химическим переносом алюминия в меньшей степени присущи методам с диффузионным переносом, особенно жидкостному алитированию. Жидкостное алитирование по оценке многих исследователей считается наиболее экономически выгодным и простым.

Широкому внедрению жидкостного алитирования препятствует наличие ряда недостатков, как-то:

- 1) алитирование в расплаве не всегда обеспечивает равномерность диффузии алюминия на всех участках поверхности изделия;
- 2) на поверхности алитируемого изделия в некоторых случаях происходит растворение (разъедание) отдельных участков;
- 3) налипание сплава приводит к образованию наплывов и подтеков.

В задаче исследования ставится совершенствование жидкостного алитирования с целью преодоления его основных недостатков. Вследствие этого в работе производится изучение флюсов и методов флюсования в процессе жидкостного алитирования, выявление путей борьбы с налипанием сплава и исследование алитирования по никелевому подслою.

Как средство совершенствования технологии алитирования нами предлагается флюсование процесса и применение инерционного сброса налипшего сплава.

Исследовались флюсование двумя способами:

- 1) созданием слоя расплавленного флюса над зеркалом ванны алитирования и
- 2) созданием на поверхности изделия корочки солей, наносимых из водных растворов путем подсушивания.

Как показало исследование, флюсование первым способом имеет больше преимущества. Этот метод не только способствует улучшению смачивания поверхности изделия сплавом, но и помогает разрешить другие задачи алитирования. Жидкий флюс, защищая сплав ванны алитирования от окисления, уменьшает потери сплава. Нагрев изделия во флюсе перед погружением в расплавленный алюминий способствует снижению температурных напряжений и уменьшению коробления. Вместе с этим предварительный нагрев изделия во флюсе уменьшает возможность кристаллизации сплава на поверхности изделия. Это обстоятельство облегчает предупреждение растворения (разъедания) поверхности в сплаве путем уменьшения перегрева сплава относительно точки ликвидуса. Исследование центробежного сброса налипшего сплава показало, что очистка поверхности от сплава в среде флюса проходит полнее, чем на воздухе. Наконец, необходимо иметь в виду, что наличие слоя расплавленных солей позволяет для поддержания необходимой температуры ванны применять электродный обогрев.

Исследования показали, что при жидкостном алитировании не могут использоваться составы ванн, применяемые для безокислительного нагрева стали, флюсы для черных металлов, содержащие буру или борную кислоту, а также флюсы, применяемые для пайки алюминиевых сплавов и содержащие хлористый цинк и хлористый кадмий.

В качестве флюсов при жидкостном алитировании пригодными являются лишь хлориды щелочных и щелочноземельных металлов. Экспериментальным путем нами выявлено, что нагрев стали ЭЯИТ и никеля в расплавленных смесях хлоридов натрия, калия и кальция способствует очистке поверхности от окислов и вызывает улучшение смачиваемости образцов алюминием. Это явление находит свое подтверждение в работах ряда исследователей, наблюдавших корродирующее действие расплавленных хлоридов на металлы.

В нашем эксперименте показано, что никелированная сталь, окисленная на воздухе до образования цветов побежалости, после 8—10 минутного нагрева в расплавленных хлоридах при температуре 800° осветляется и заметно теряет в весе. При жидкостном алитировании стали ЭЯИТ и никелированной стали 30 хорошо зарекомендовалась смесь равных количеств NaCl и KCl . В процессе работы ванны во флюсе накапливаются окислы, которые образуют с флюсом суспензию, способную отстаиваться.

Применение при алитировании флюсов вторым способом, путем подсушивания солей на поверхности изделия, по сравнению с описанным методом, является менее эффективным. Нами изучалось флюсующее действие солей NiCl_2 , NH_4Cl и FeCl_3 . Покрытие поверхности хлористым аммонием и особенно хлористым никелем способствует улучшению смачивания поверхности алюминием. Флюсование с помощью подсушенных солей может найти применение при обычном жидкостном алитировании, так как способствует образованию более равномерного диффузионного слоя.

Жидкостное алитирование с применением расплавленных флюсов с целью облегчения и ускорения постановки эксперимента в лабораторных условиях проводилось в кварцевых тиглах емкостью 2,5 литра, нагреваемых в электрической печи.

Опыт показал, что алюмотермическая реакция между алюминиевым расплавом и кварцем при температурах до 900° идет лишь в первый момент.

В производственных условиях для жидкостного алитирования с применением расплавленных хлоридов следует применять ванны из магнезита или из графита.

Для алитирования при температурах $815\text{—}820^\circ$ применялся алюминиевый сплав, содержащий 20—22% никеля. Введение в ванну никеля вместо железа в большей степени снижает разъедающее действие сплава на сталь, очевидно, вследствие более высокой растворимости никеля в алюминии. Применение расплавленных флюсов позволяет использовать их для очистки поверхности от налипшего сплава.

В работе исследовались различные методы удаления налипшего сплава:

1) применение твердой засыпки зеркала алюминиевого сплава. В качестве засыпки использовались молотый графит, а также окись магния;

2) удаление жидкого сплава под действием сильного факела пламени газовой горелки;

3) инерционный (центробежный) сброс на воздухе;

4) инерционный сброс в среде жидкого флюса.

Первые два из перечисленных методов не вызывают удовлетворительной очистки поверхности от сплава. Хороший сброс может быть достигнут под действием центробежных сил. Алитирование с использованием центробежного сброса проводилось на плоских круглых стальных образцах диаметром 55 мм с отверстием в центре диаметром 10 мм для крепления их. Образцы подвешивались на конце валика, который мог вращаться с задаваемой скоростью от электромоторчика постоянного тока.

Исследования показали, что полнота сброса сплава под действием центробежных сил сильно зависит от скорости вращения образца и среды, в которой осуществляется центробежный сброс. Центробежный сброс резко изменяется в пределах 50—120 оборотов в минуту. В среде флюса полный сброс налипшего сплава осуществляется при скорости вращения выше 110 об/мин. Сброс сплава на воздухе, даже при более высокой скорости вращения, не вызывает полной очистки поверхности от налипшего сплава. Применение очень высоких центробежных ускорений на воздухе ($n > 200$ об/мин) приводит к некоторому ухудшению сброса вследствие кристаллизации сплава.

Можно считать, что полный сброс налипшего сплава в среде флюса обеспечивается при ускорении $a \geq 140$ см/сек² (рассчитано при $r = 1$ см и $n = 110$ об/мин).

Предлагаемая технологическая схема жидкостного алитирования с использованием в качестве флюса расплавленных хлоридов и с применением инерционного сброса налипшего сплава в среде флюса значительно расширяет возможности внедрения алитирования в условиях современного массового производства, требующего высокой механизации всех процессов.

С точки зрения дальнейшего совершенствования технологии и повышения жароупорности алитированных изделий большой интерес представляет изучение роли никелевых покрытий. Особенностью системы Al — Ni является образование устойчивого металлического соединения, β -фазы (NiAl), температура плавления которого превышает температуру чистого никеля почти на 190°. Другой особенностью этих сплавов является образование окисла NiAl₂O₄, имеющего структуру шпинели. Особенностью окисла NiAl₂O₄ является высокая атомная плотность. Параметр решетки данной шпинели ($a = 8,04$ Å) меньше, чем параметр таких шпинелей, как FeCr₂O₄ ($a = 8,36$ Å) и NiCr₂O₄ ($a = 8,30$ Å). Это

позволяет предполагать, что образование на поверхности слоя NiAl₂O₄ должно сопровождаться повышением жароупорности.

С помощью металлографического и рентгеноструктурного анализа установлено, что диффузионный слой между алюминием и никелем при 700 и 830° включает три слоя, соответствующие ϵ -(NiAl₃), δ -(Ni₂Al₃) и β -(NiAl) фазам; при температуре 900° ϵ -фаза в слое отсутствует. Все фазы резко отличаются своей травимостью. Главную часть по толщине диффузионного слоя составляет δ -фаза.

Так как для создания жароупорных покрытий практический интерес представляет лишь δ - и β -фазы, то скорость роста диффузионного слоя определялась по скорости образования ($\delta + \beta$) слоя. Толщина ($\delta + \beta$) слоя при температуре 900° за 70 мин достигает 0,2 мм и за 3 часа — 0,3 мм.

Коэффициент диффузии алюминия в никеле, рассчитанный по изотерме роста ($\delta + \beta$) слоя при температуре 900°, превосходит коэффициент диффузии алюминия в гамма-железе (взятый по литературным данным) более чем в 30 раз.

Путем сравнения микротвердости было установлено, что β - и δ -фазы, по сравнению с ϵ -фазой, в меньшей степени склонны к хрупкому разрушению.

Для исследования окисления δ -фазы и строения ее окислов из диффузионного слоя с помощью алмаза собирался порошок δ -фазы

Порошок δ -фазы подвергался окислению при температурах 900, 1000 и 1100°. Рентгеноструктурный анализ проводился через различное время отжига. На первой стадии окисления образуется шпинель NiAl₂O₄, у которой при температуре 900° намечается распад с образованием окиси никеля и корунда. При температуре 1100° вполне заметный распад отмечается через первые 2 часа отжига, структура шпинели в порошке полностью не исчезает даже после отжига в течение 24 часов. Таким образом, окисление δ -фазы сопровождается структурными превращениями, приводящими к распаду защищающего окисла NiAl₂O₄.

С целью исследования влияния никеля на жароупорность алитированной стали алитирование производилось после покрытия образцов гальваническим никелем. Жидкостное алитирование стали по никелевому подслою (жидкостное никельалитирование) предъявляет к гальваническому никелю повышенные требования. Обычные никелевые покрытия (декоративное и антикоррозионное) при нагреве в расплавленных солях разрушаются и поэтому применяться не могут. За счет применения определенного режима никелирования и последующего отжига покрытия было достигнуто создание на стали 30 и стали ЭЯ1Т никелевых покрытий толщиной до 50—60 мк, не отслаивающихся в условиях солевого нагрева до 850°. На основании сравнения жидкостного алитирования с жидкостным никельалитированием можно заключить, что второй процесс по своей техноло-

тии отличается, главным образом, необходимостью никелирования поверхности перед ее алитированием.

Общая схема технологии жидкостного алитирования включает следующие операции.

1. Подготовка поверхности изделия для никелирования

Перед никелированием изделие должно подвергаться глубокому бесшламовому травлению (глубина травления должна составлять не менее 3 мк).

Хорошо зарекомендовало себя химическое травление в следующих растворах:

для углеродистой стали — 10% раствор серной кислоты с добавлением окислителей (азотная кислота или пергидроль);

для стали ЭЯИТ — смесь концентрированных кислот HNO_3 и HCl в соотношении 1 : 1.

2. Никелирование

Никелирование необходимо проводить непосредственно после травления и промывки в воде. В качестве электролита следует применять раствор 300 г/л сернокислого никеля, 30 г/л хлористого никеля и 30 г/л борной кислоты. Никелирование необходимо вести при температуре 55—65° и катодной плотности тока 3—4 а/дм². Продолжительность никелирования по указанному режиму составляет для тонких покрытий (до 10 мк) — 10—15 мин и для толстых покрытий (более 30 мк) не менее 45 мин.

3. Отжиг никелевого покрытия

Толстые никелевые покрытия не обладают достаточной прочностью сцепления со сталью и поэтому нуждаются в отжиге при температуре 400—420° в течение 0,5—1 часа в зависимости от толщины никеля. После отжига на поверхности никеля образуется окисная пленка с характерной синей окраской.

4. Жидкостное алитирование

В соответствии с разработанной технологией ванна для алитирования должна содержать два слоя: нижний слой — алюминиевый сплав, содержащий 20—22% никеля; верхний слой — флюс, представляющий расплавленную смесь хлоридов натрия и калия, взятых в соотношении 1 : 1. Температура ванны при данном составе сплава должна быть равна 815—820° (примерно на 5° выше температуры начала кристаллизации). Алитирование проводится в следующей последовательности.

1. Нагрев изделия в слое флюса в течение 10 минут. Изделие должно быть подвешено на валике приспособления, позволяющего осуществлять центробежный сброс налипшего сплава.

2. Погружение изделия в сплав. Погружение следует сопровождать кратковременным включением механического привода с целью снятия окислов, которые налипают во флюсе.

Кроме того, включение привода способствует смачиванию алюминием поверхности в местах подвески изделия. Вращение в сплаве не должно быть продолжительным, чтобы не вызывать растворения поверхностного слоя.

3. Выдержка в алитирующем сплаве производится в зависимости от требуемой глубины диффузионного слоя. Для стали 30, покрытой слоем никеля 30—50 мк, время выдержки в наших условиях составляло до 20 мин и для стали ЭЯИТ без никеля — от 10 до 30 мин.

4. Сброс налипшего сплава в слое флюса под действием инерционных (центробежных) сил в течение 0,5—1 мин.

5. Охлаждение на воздухе и очистка поверхности от солей с последующей промывкой в воде и сушкой.

Испытание алитированных и никельалитированных образцов на жароупорность проводилось при температурах от 900 до 1100°. В качестве защищаемой стали служила сталь 30 и сталь ЭЯИТ. Образцы нагревались и взвешивались в фарфоровых чашках, закрывающихся крышками. Сравнение жароупорности производилось по изотермам окисления, которые строились по определению привеса образцов в течение 100-часового испытания.

Скорость окисления стали, никельалитированной в течение 1 минуты по толстому слою никеля (30—40 мк), при испытании при 950° значительно превышает допустимую скорость окисления, равную $1 \frac{2}{\text{м}^2 \text{час}}$.

Алитирование никелированной стали с толщиной никеля 40 мк с выдержкой в сплаве при температуре 820° в течение от 5 до 10 мин обеспечивает после 100 часов испытания на жароупорность при температуре 950° привес $0,25 \frac{2}{\text{м}^2 \text{час}}$ и при 1000° — $1,15 \frac{2}{\text{м}^2 \text{час}}$. Если

сброс налипшего сплава производить не полностью, оставляя тонкий слой, то жароупорность стали не увеличивается, а понижается за счет быстрого окисления налипшего сплава.

Жароупорность никельалитированной стали выше, чем жароупорность стали, алитированной без никеля. Так, например, для алитированной стали 30 скорость окисления при температуре 950° за 50 часов составляет $1,28 \frac{2}{\text{м}^2 \text{час}}$, тогда как у никельалитированной

стали она равна всего $0,3 \frac{2}{\text{м}^2 \text{час}}$. Эти данные подтверждают вывод

В. И. Архарова о том, что высокая жароупорность стали обуславливается образованием «оксидной фазы типа шпинели с возможно меньшим параметром».

Окисление никельалитированных образцов, на поверхности которых создан слой δ -фазы, сопровождается выпотеванием белого порошка. С помощью рентгеноструктурного анализа было установлено, что его структура отвечает корунду $\alpha - \text{Al}_2 \text{O}_3$.

Испытание на жароупорность стали ЭЯИТ, алитированной по никелевым покрытиям толщиной 30—50 мк, показали, что повторяемость одних и тех же результатов при температурах 1000—1100° плохая. В начале испытания образцы имеют высокую жароупорность, но через 30—40 часов резко ее снижают. Снижение жароупорности происходит вследствие разрушения покрытий, которое начинается на некоторых участках и быстро распространяется по поверхности. Исследования показали, что причиной этого является ухудшение окалиностойкости в результате глубокого травления поверхности стали ЭЯИТ.

Жидкостное алитирование стали ЭЯИТ, не покрытой никелем, способствует значительному повышению ее жароупорности. Алитирование при температуре 820° с выдержкой в сплаве всего 10—20 минут обеспечивает повышение жароупорности (по сравнению с неалитированной сталью ЭЯИТ при 1000°) за 100-часовое испытание при 1000° в четыре раза и при 1050° — в два раза. Исследование, проведенное в лабораторных условиях, позволяет заключить, что технология жидкостного алитирования может быть значительно усовершенствована.

Материалы диссертации опубликованы в 4 статьях:

1. Исследование диффузионного слоя между алюминием и никелем. Научно-технический сборник, РКВИАВУ, Вып. 23, 1955.
2. О реакциях диффузионного насыщения стали металлами. «Металловедение и обработка металлов», № 3, 1957.
3. Жароупорность стали, алитированной по никелевому слою. Труды РКВИАВУ, вып. 34, 1957.
4. О реакциях алитирования. Труды РКВИАВУ, Вып. 34, 1957.

Технический редактор О. В. Андреева.

Корректор Л. М. Сторожевых.

Подписано к печати 17. 10. 57 г.

Г-511894

Объем 1 п. л.

Зак. 473.

Типография РКВИАВУ им. К. Е. Ворошилова