

021.557.7
Б-745

БИБЛИОТЕЧКА



ГАЛЬВАНOTEХНИКА

Л.Я. БОГОРАД

ХРОМИ- РОВА- НИЕ

ББК 34.663

Б74

УДК 621.357:669.268.7

Рецензент Э. С. Брук

Богорад Л. Я.

Б74 Хромирование. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. — 97 с., ил. — (Б-чка гальванотехника/Под ред. П. М. Вячеславова; Вып. 4).

40 к.

В брошюре даны основы хромирования, изложены свойства электролитов и хромовых покрытий, режимы хромирования, особенности технологии, нанесения защитно-декоративных, защитных и износостойких покрытий. Описаны технологические процессы и типовые приспособления. Проведен анализ причин брака и даны методы его устранения и контроля.

Новое издание (4-е изд. 1977 г.) дополнено рекомендациями по технологии хромирования и свойствам хромовых покрытий.

Брошюра предназначена для рабочих, лаборантов, мастеров и технологов гальванических цехов.

Б 2704070000—172
038(01)—84 172—84

ББК 34.663

6П4.52

ИБ № 3708

Лев Яковлевич БОГОРАД

ХРОМИРОВАНИЕ

(Библиотечка гальванотехника, выпуск 4)

Редактор *Е. Г. Лукин*

Художественный редактор *С. С. Венедиктов*

Технический редактор *Т. М. Жилич*

Корректор *И. Г. Иванова*

Обложка художника *В. Э. Нефедовича*

Сдано в набор 05.05.83. Подписано в печать 29.12.83. М-42851. Формат 84×108/32. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,04. Уч.-изд. л. 7,84. Усл. кр.-отт. 5,25.

Тираж 25 000 экз. Заказ 625. Цена 40 коп

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машиностроение», 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052 г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

© Издательство «Машиностроение», 1977 г.

© Издательство «Машиностроение», 1984 г., с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электролитическое хромирование является эффективным способом повышения износостойкости трущихся деталей, защиты их от коррозии, а также способом защитно-декоративной отделки. Значительную экономию дает хромирование при восстановлении изношенных деталей. Процесс хромирования широко применяется в народном хозяйстве. Над его совершенствованием работает ряд научно-исследовательских организаций, институтов, вузов и машиностроительных предприятий. Появляются более эффективные электролиты и режимы хромирования, разрабатываются методы повышения механических свойств хромированных деталей, в результате чего расширяется область применения хромирования. Знание основ современной технологии хромирования способствует выполнению указаний нормативно-технической документации и творческому участию широких кругов практических работников в дальнейшем развитии хромирования.

По сравнению с предыдущим изданием в брошюре развиты вопросы влияния хромирования на прочность деталей, расширено использование эффективных электролитов и технологических процессов, введен новый раздел по методам повышения экономичности хромирования. Основные разделы переработаны с учетом прогрессивных достижений технологии хромирования. Приведенные технологические указания и конструкции подвесных приспособлений являются примерными, ориентирующими читателя в вопросах выбора условий хромирования и в принципах конструирования подвесных приспособлений.

1. Общие сведения

Электролитическое хромирование существенно отличается от других гальванических процессов. Выделение хрома производится из растворов хромовых кислот (смесь кислот $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и H_2CrO_4), а не из солей хрома. При этом в растворе обязательно должны присутствовать в небольшом количестве добавки активных анионов (SO_4^{2-} , SiF_6^{2-} , F^-), без которых хром не выделяется из хромовой кислоты. Электролиты, основанные на солях хрома, широко изучаются, но до сих пор не получили промышленного применения.

Важной особенностью хромирования является более легкое выделение водорода на катоде, чем хрома; водород начинает выделяться при более положительном потенциале, чем хром, и выход по току при хромировании намного (в три — пять раз) меньше, чем при осаждении других металлов. На выход хрома по току существенно влияют плотность тока и температура электролита.

Показатели процесса и качества покрытия при хромировании в значительно большей степени зависят от режима электролиза (плотности тока и температуры электролита), чем при других гальванических процессах.

Рассеивающая и кроющая способности хромовых электролитов в отличие от других процессов низки, что заставляет применять при хромировании особые приемы для повышения равномерности покрытия. Низкая кроющая способность связана с сравнительно высокой минимальной плотностью тока, при которой начинается выделение хрома.

В хромировочных ваннах применяются только нерастворимые аноды, что требует периодического пополнения убыли хромовой кислоты путем ее непосредственного введения в электролит в необходимых количествах.

Растворы хромовой кислоты токсичны, они увлекаются выделяющимися при электролизе газами. Это создает необходимость принятия мер предосторожности для оздоровления условий труда при работе на хромировочных ваннах.

2. Катодный процесс

Во время хромирования на катоде происходят следующие основные процессы:

осаждение хрома;

выделение водорода;

восстановление аниона хромовой кислоты, где хром шестивалентен, до соединений, в которых хром имеет меньшую валентность, в основном, трехвалентного хрома;

образование на поверхности катода тонкой пленки, состоящей из активного аниона и продуктов восстановления хромовой кислоты.

Большое влияние на эти процессы оказывает количество и род активных анионов, содержащихся в электролите. На рис. 1 приведена зависимость выхода по току от концентрации SO_4^{2-} для процессов выделения хрома и водорода и образования трехвалентного хрома в растворе хромового ангидрида с концентрацией 350 г/л при $i_k = 15 \text{ А/дм}^2$ и $t = 20^\circ\text{C}$.

Наибольший выход по току для хрома получается при концентрации SO_4^{2-} , равном 1 % от концентрации хромового ангидрида.

При дальнейшем увеличении концентрации SO_4^{2-} возрастает выход по току для трехвалентного хрома. Образующиеся соединения трехвалентного хрома расходуются как на образование катодной пленки, так и на повышение концентрации в электролите.

Основную картину катодного процесса можно получить из осциллографической записи изменения силы тока во времени при включении и выключении тока и из анализа катодной поляризационной кривой.

Осциллографирование показало, что в хромовокислых растворах с добавкой серной кислоты катодная плотность тока, имевшая в начальный момент после включения относительно большое значение, через короткий промежуток времени резко снижается (рис. 2, а). Такое сильное торможение электрохимического процесса является результатом образования на поверхности катода после включения тока пленки из продуктов катодного восстановления электролита. При выключении тока пленка растворяется и после повторного включения наблюдается снова скачок плотности тока и затем резкое ее снижение.

В хромовокислых растворах, не содержащих серной кислоты, значение начальной плотности тока выше, а снижение ее во времени значительно менее резко (рис. 2, б). Такое изменение плотности тока во времени, отраженное на осциллограммах рис. 2, обусловлено уплотнением катодной пленки под действием SO_4^{2-} и соответственно увеличением ее электрического сопротивления.

Влияние сопротивления пленки на выделение хрома показано на рис. 3, где приведены катодные поляризационные кривые: для раствора хромовой кислоты без добавки активного аниона (кривая 1) и для электролита с добавлением SO_4^{2-} (кривая 2). В первом случае катодный процесс состоит практически только из выделения водорода, которое начинается при потенциале $-(0,85 \div 0,90)$ В. Во втором случае поляризационная кривая на участке *ab* отражает восстановление Cr^{6+} до Cr^{3+} , на участке *bc* — образование катодной пленки и начало выделения водорода и на участке *cd* — осаждение хрома, выделение водорода и восстановление Cr^{6+} до Cr^{3+} , происходящие одновременно. По мере образования катодной пленки растет переходное сопротивление на поверхности катода, плотность тока из-за этого уменьшается (участок *bc*), хотя отрицательный потенциал возрастает. Наконец, при потенциале около $-1,1$ В начинается новый процесс — выделение хрома — и соответственно возрастает плотность тока. Таким образом, роль катодной пленки сводится к повышению поляризационного сопротивления катода и смещению благодаря этому его потенциала до значения, при котором наступает выделение хрома. На рис. 3 это видно из смещения кривой 2 относительно кривой 1 в сторону отрицательных потенциалов (участок *ef*)

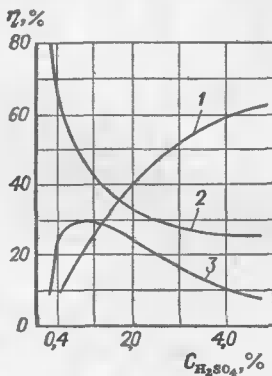


Рис. 1. Выход хрома по току для частных катодных процессов в зависимости от концентрации серной кислоты (% от хромового ангидрида): 1 — образование трехвалентного хрома; 2 — выделение водорода; 3 — выделение хрома

Плотность тока в точке *b* возрастает с увеличением содержания в электролите активного аниона. Плотность тока, при которой начинается выделение хрома, зависит от содержания и рода активного аниона и температуры электролита. Так, при 20 °С и содержании серной кислоты от 0,5 до 1,5 % от концентрации хромового ангидрида критическая плотность тока, ниже которой не происходит выделение хрома, составляет соответственно 1,2—3,0 А/дм². При кремнефтористоводородной кислоте возрастание ее концентрации от 2 до 8 % по отношению к концентрации хромового ангидрида приводит к возрастанию критической плотности тока с 1,25 до 4,5 А/дм².

В проточном электролите, по данным работы [34], при скорости протока 40 см/с и температурах 55—75 °С хром осаждается при

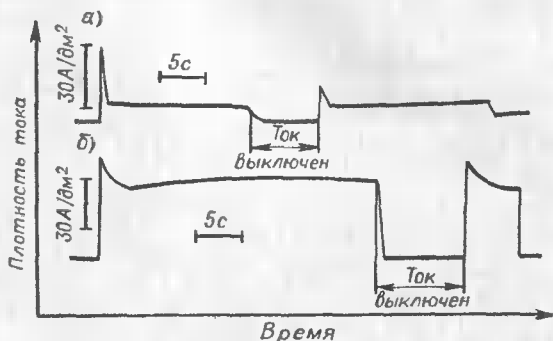


Рис. 2. Изменение катодной плотности тока во времени в различных электролитах при постоянном катодном потенциале, равном $-1,08$ В: а — 250 г/л хромового ангидрида и 2,5 г/л серной кислоты; б — 250 г/л хромового ангидрида

50 А/дм² и не осаждается при 25 А/дм². При скорости протока 130 см/с и таких же температурах хром осаждается при 75 А/дм² и не осаждается при 50 А/дм².

По существующим представлениям катодная пленка состоит из двух слоев: особо тонкого прилегающего к металлу окисного слоя, близкого по своей природе к пассивирующему слою, и внешнего сравнительно толстого слоя, состоящего из продуктов восстановления хроматов и активного аниона. Общая толщина катодной пленки может достигать 20—25 мкм. Ее состав и свойства, в частности pH, зависят от режима хромирования. По широко распространенному мнению от свойств пленки зависят структура и свойства покрытия. Этим определяется большое значение исследований природы катодной пленки, в частности выполненных М. А. Шлугером и его сотрудниками [42]. Механизм восстановления на катоде шестивалентных ионов хрома до металлического имеет два объяснения. Сторонники первого считают, что при электролизе хромовой кислоты имеет место ступенчатое восстановление по схеме $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+} \rightarrow \dots \rightarrow \text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Cr}$. Сторонники второго объяснения полагают, что на катоде происходит непосредственное восстановление шестивалентных ионов хрома до металлического. Высказываются мнения о возможности протекания обоих процессов.

Особенностью катодного процесса при хромировании является небольшой наклон катодной поляризационной кривой на участках рабочих плотностей тока. Такая небольшая поляризуемость катода обуславливает низкую рассеивающую способность хромовых электродов. Относительно большой расход тока на побочные катодные процессы (восстановление шестивалентного хрома до трехвалентного, выделение водорода) обуславливает характерный для хромирования низкий выход хрома по току. Факторы, облегчающие выделение водорода, способствуют снижению выхода хрома по току. К ним, например, относятся: повышение температуры электролита, наличие на поверхности основного металла включений с низким перенапряжением водорода (графит в чугуне и др.).

3. Анодный процесс

При хромировании применяются только нерастворимые аноды из свинца и его сплавов с сурьмой и оловом. Это обусловлено непригодностью хромовых анодов, так как выход по току при их растворении в семь — восемь раз больше, чем выход хрома по току на катоде. В результате этого концентрация хрома в электролите в процессе хромирования будет непрерывно возрастать, нарушая условия электролиза

Кроме того, окислительные процессы на растворимом аноде недостаточно интенсивны, чтобы перевести накапливающиеся в электролите ионы трехвалентного хрома в шестивалентные, превышение допустимой концентрации трехвалентного хрома приводит к нарушению работы электролита.

На нерастворимом свинцовом аноде при электролизе происходит выделение кислорода и активное окисление трехвалентного хрома до шестивалентного.

Часть кислорода, выделившегося в процессе электролиза, окисляет поверхность свинца с образованием темно-коричневой двуокиси свинца, хорошо проводящей электрический ток. Аноды, покрытые двуокисью свинца, практически нерастворимы при хромировании в электролите с добавкой SO_4^{2-} . Слой двуокиси свинца, увеличивая перенапряжение выделения кислорода, ускоряет окисление трехвалентного хрома в шестивалентный.

При неизменяющемся режиме электролиза концентрация окислившегося трехвалентного хрома будет возрастать пропорционально величине поверхности анодов. Поскольку от поверхности катода зависит скорость накопления трехвалентного хрома в электролите, то соотношение поверхностей анода и катода определяет его установившуюся концентрацию в электролите.

Иногда по конструктивным соображениям изготавливают аноды из оцинкованной стали (например, при хромировании отверстий, имеющих небольшой диаметр).

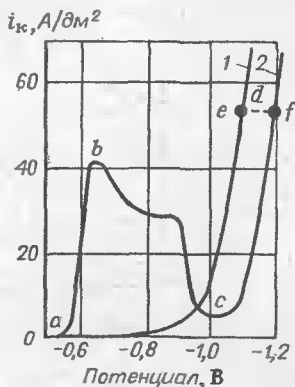


Рис. 3. Влияние добавки серной кислоты на ход катодных поляризационных кривых в электролитах: 1 — 250 г/л хромового ангидрида; 2 — 250 г/л хромового ангидрида и 5 г/л серной кислоты

4. Электролиты для хромирования

Разработке электролитов для хромирования посвящено большое количество исследований, направленных главным образом на подбор активных добавок в хромовую кислоту. Применяемые в настоящее время электролиты в зависимости от рода этих добавок можно разделить условно на следующие группы: сульфатные, содержащие SO_4^{2-} ; сульфатно-кремнефторидные, в которых активными добавками являются SO_4^{2-} и SiF_6^{2-} ; тетрахроматные, у которых часть хромовой

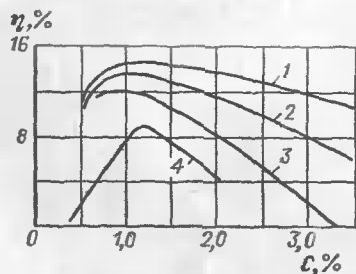


Рис. 4. Характер изменения выхода хрома по току в зависимости от концентрации серной кислоты (% от хромового ангидрида) при различном содержании хромового ангидрида, г/л: 1 — 75; 2 — 150; 3 — 250; 4 — 500

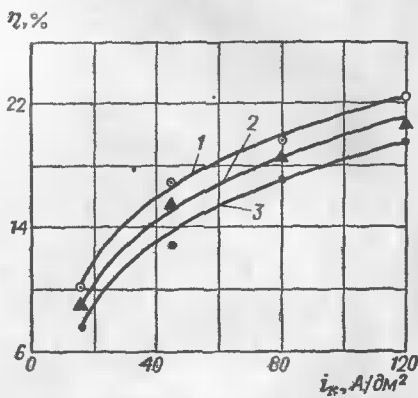


Рис. 5. Зависимость выхода хрома по току от катодной плотности тока при $t = 55^\circ\text{C}$ для сульфатных электролитов: 1 — малоконцентрированного, 150 г/л CrO_3 ; 2 — универсального, 250 г/л CrO_3 ; 3 — концентрированного, 350 г/л CrO_3

кислоты нейтрализуется с образованием в растворе тетрахромата, и электролиты с добавками специального назначения (получение сплавов хрома, окрашенные хромовые покрытия и др.).

Сульфатные электролиты. Концентрация хромового ангидрида в электролитах с добавкой серной кислоты может изменяться в широких пределах (от 100 до 500 г/л). Для получения покрытия хорошего качества необходимо, чтобы отношение концентраций $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$ в электролите поддерживалось постоянным на уровне около 100. Значительное понижение концентрации серной кислоты в электролите вызывает отложение серых недоброкачественных осадков хрома, повышение ее концентрации — отложение мелкозернистых блестящих осадков, в обоих случаях при сниженном выходе хрома по току.

Увеличение концентрации хромового ангидрида повышает электропроводность раствора. Изменение концентрации серной кислоты в указанных пределах практически не оказывает влияния на электропроводность раствора.

Выход хрома по току при увеличении концентрации хромового ангидрида и постоянстве отношения между концентрациями хромо-

вого ангидрида и серной кислоты понижается. При увеличении концентрации сульфата в растворе выход по току сначала возрастает, а затем, достигнув максимума при отношении концентрации $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{CrO}_3$, близким к 1:100, начинает заметно снижаться. Типовой характер зависимости выхода хрома по току от содержания серной кислоты для электролитов с разными концентрациями хромового ангидрида показан на рис. 4.

Выход по току в зависимости от плотности тока для электролитов с разной концентрацией хромового ангидрида при оптимальной концентрации серной кислоты (в каждом из этих электролитов) показан на рис. 5 (по Г. С. Левицкому). Зависимость выхода хрома по току от концентрации хромового ангидрида при $i_k=50 \text{ А/дм}^2$

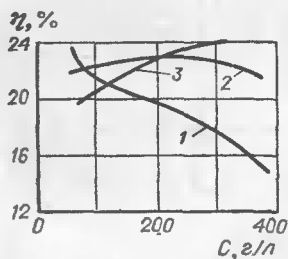


Рис. 6. Зависимость выхода хрома по току от концентрации хромового ангидрида при разных активных анионах:

1 — SO_4^{2-} ; 2 — F^- ; 3 — SiF_6^{2-}

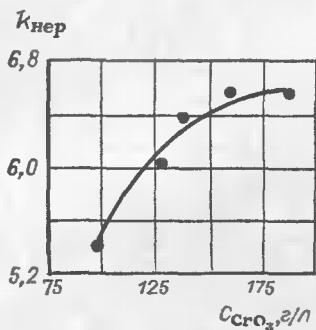


Рис. 7. Зависимость рассеивающей способности сульфатных электролитов от концентрации хромового ангидрида

$t=55^\circ\text{C}$ для разных активных анионов приведена на рис. 6 (содержание: H_2SO_4 — 1,2 %, H_2SiF_6 — 2,0 %; HF — 1,4 % от концентрации CrO_3). Кроющая способность электролита при увеличении концентрации хромового ангидрида улучшается и достигает максимума при 300—350 г/л

Рассеивающая способность электролита с увеличением концентрации хромовой кислоты и при сохранении постоянного отношения $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{CrO}_3$ уменьшается. Изменение рассеивающей способности электролита в зависимости от концентрации хромового ангидрида показано на рис. 7, где по вертикальной оси приведен коэффициент неравномерности слоя покрытий $k_{\text{нер}}$. Рассеивающая способность заметно возрастает в электролитах с пониженной концентрацией хромового ангидрида и это особенно проявляется при хромировании в электролитах деталей с развитым рельефом [36].

Существенной положительной особенностью сульфатных электролитов является их незначительная агрессивность по отношению к стали (при отсутствии ее анодной поляризации) и свинцу, что позволяет не опасаться травления стальных деталей на нехромируемых участках.

Внешний вид осадков хрома зависит от катодной плотности тока и температуры при электролизе. Изменяя режим электролиза, можно получить так называемые молочные, блестящие и матовые (серые) осадки хрома. Для декоративных покрытий важно, чтобы осадки хрома были блестящие, так как электроосажденный хром трудно поддается полированию. Получение осадков блестящего хрома возможно в определенном интервале плотностей тока и температуры. На рис. 8 изображены примерные границы режимов

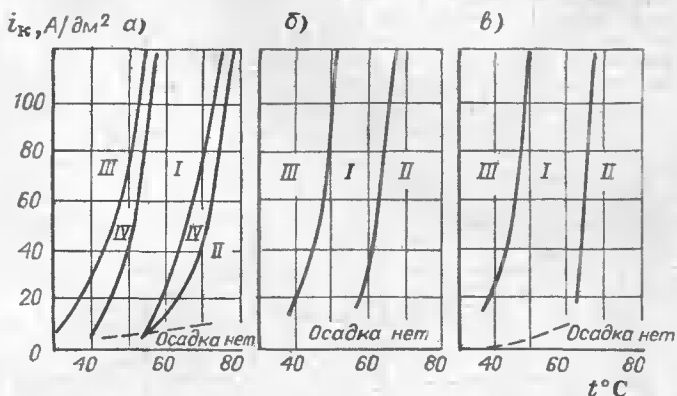


Рис. 8. Деление на зоны типичных осадков хрома в сульфатных электролитах при концентрации хромового ангидрида, г/л: а — 150; б — 250; в — 350;

Зоны: I — блестящий хром; II — молочный хром; III — матовый хром; IV — переходные мелкозернистые, серебристые осадки

электролиза, обеспечивающие получение матовых (или серых), блестящих и молочных осадков хрома в универсальных малоконцентрированных и концентрированных электролитах.

Осаждение на катоде серых матовых осадков происходит при низких температурах электролиза ($35^{\circ}C$ и ниже) и любой плотности тока. Покрытия, полученные при этих режимах электролиза в сульфатных ваннах, отличаются высокой хрупкостью и слабым сцеплением.

Блестящие осадки хрома получают при средних температурах электролита $45-65^{\circ}C$ в широком диапазоне плотностей тока. Осаждение блестящего хрома возможно и при более высоких температурах электролита из малоконцентрированных растворов при высоких плотностях тока. Например, при $70-75^{\circ}C$ плотность тока может достигать $150-200 A/dm^2$, что позволяет соответственно повысить скорость осаждения хрома и уменьшить продолжительность хромирования.

Блестящий хром имеет наиболее высокую твердость, хорошее сцепление с основным металлом и относительно небольшую хрупкость. Выход по току для блестящих осадков в сульфатных ваннах составляет $12-14\%$. При высоких плотностях тока для переходных и матовых осадков выход по току повышается до $18-20\%$.

Осадки молочно-хромового цвета получаются при высоких температурах электролита (выше 65°C) и при плотностях тока $25\text{--}30\text{ А/дм}^2$. Покрытия молочным хромом по сравнению с другими имеют невысокую твердость, значительную пластичность, меньшую пористость и благодаря этому более высокую защитную способность. Выбор концентрации электролита осуществляется в соответствии с характером покрытия и конфигурацией деталей. Наиболее часто в промышленности применяются следующие электролиты, отличающиеся концентрацией хромового ангидрида и содержащие серную кислоту в количестве 1 % от концентрации хромового ангидрида:

концентрированные электролиты — содержат $350\text{--}450\text{ г/л}$ хромового ангидрида; они обладают сравнительно низким выходом по току и плохой рассеивающей способностью. Вместе с тем концентрированные электролиты отличаются относительно хорошей кроющей способностью, что позволяет применять их при декоративном хромировании деталей сложной конфигурации. Благодаря низкому омическому сопротивлению возможно устанавливать значительные расстояния ($180\text{--}200\text{ мм}$) между электродами при ограниченном напряжении источника тока, а пониженные плотности тока позволяют покрывать одновременно большие катодные площади. Потери хромового ангидрида вследствие уноса электролита с деталями и газами, выделяющимися на электродах, в концентрированных электролитах больше, чем в разбавленных;

электролиты с низкой концентрацией хромовой кислоты (мало-концентрированные) — содержат $100\text{--}150\text{ г/л}$ хромового ангидрида. Впервые электролит такого типа был изучен и предложен Ю. Б. Федоровым в 1928 году и практически применен на ряде ленинградских заводов. Этот электролит содержит 120 г/л и $1,8\text{ г/л}$ серной кислоты. Режим хромирования: $i_k = 50 \div 120\text{ А/дм}^2$ и $t = 55 \div 60^{\circ}\text{C}$. При температуре электролита $65\text{--}70^{\circ}\text{C}$ покрытия с высокой твердостью и износостойкостью могут быть получены при плотности тока $150\text{--}170\text{ А/дм}^2$. Скорость наращивания хрома при этом — $150\text{--}170\text{ мкм/ч}$.

Противокоррозионное плотное покрытие получается при температуре электролита $65\text{--}70^{\circ}\text{C}$ и плотности тока $25\text{--}30\text{ А/дм}^2$; скорость наращивания хрома при этом составляет $13\text{--}15\text{ мкм/ч}$.

Отмечается возможность наращивания слоев толщиной $0,7\text{--}1,0\text{ мм}$ и допустимость снижения концентрации хромового ангидрида до 80 г/л .

Хромовые покрытия, полученные из мало-концентрированных электролитов, обладают высокой твердостью и износостойкостью, широким интервалом блестящих осадков, повышенной рассеивающей способностью. В мало-концентрированных электролитах меньше разрушается изоляция на деталях и подвесных приспособлениях и по сравнению с концентрированными электролитами в два-три раза меньше потери хромового ангидрида на унос в вентиляцию и с промывными водами.

Эти электролиты применяются для повышения износостойкости трущихся деталей и инструментов, восстановления изношенных или забракованных по размерам деталей, а также для защитного и защитно-декоративного хромирования. Широкое применение мало-концентрированных электролитов является одним из важных современных направлений развития хромирования. Недостатком мало-концентрированных электролитов считается необходимость в более частой корректировке электролита добавлением хромового ангидрида.

Однако обычно такая корректировка при налаженной работе цеха не вызывает затруднений и в большинстве случаев может производиться на основании контроля плотности электролита ареометром.

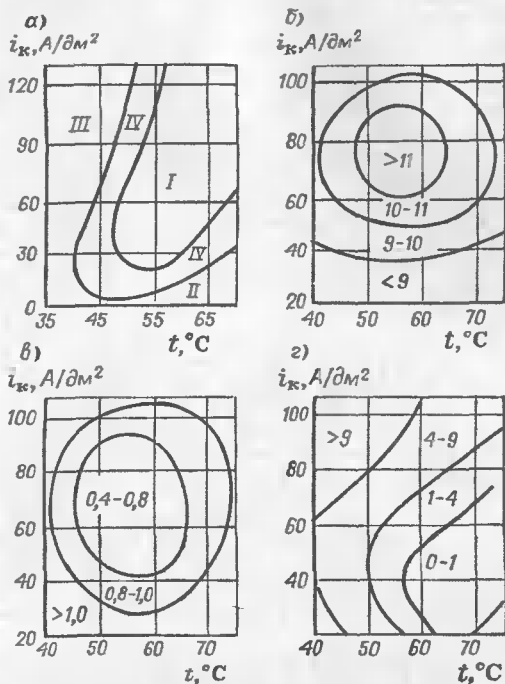


Рис. 9. Диаграммы режимов, определяющих виды и свойства хромовых осадков из малоconцентрированного электролита; а — виды осадков: I — блестящий; II — молочный; III — серый, матовый; IV — переходный; б — микротвердость, МПа; в — износостойкость, мг; г — пористость, пор/см²

Для стабилизации электролита по содержанию серной кислоты предложено вводить ее в виде соли трудно растворимого сернокислого стронция [1]. Избыток сернокислого стронция, находящийся в осадке, длительное время поддерживает требуемую концентрацию сернокислотного аниона в электролите. Состав электролита (г/л): хромовый ангидрид — 140—170; сернокислый стронций — 5—6. По данным работы [1], на рис. 9 приводятся сведения об интервале блестящих осадков, твердости, износостойкости и пористости покрытий, полученных из этого малоconцентрированного электролита. В табл. 1 приведены рекомендуемые режимы в зависимости от назначения покрытия.

Эти режимы могут быть применены и в обычном сульфатном малоconцентрированном электролите.

Электролиты с промежуточной концентрацией хромового ангидрида 250 г/л характеризуются средними значениями показателей работы по отношению к концентрированным и разбавленным электролитам. Концентрация серной кислоты в них также 1 % от концентрации хромового ангидрида, т. е. 2,5 г/л. Такие электролиты называют универсальными, или стандартными, и на них часто проводят различные исследования процесса хромирования. Важная характеристика электролита — зависимость выхода хрома по току от режима хромирования — показана для универсального электролита на рис. 10. С увеличением плотности тока выход по току возрастает, а при повышении температуры электролита он уменьшается. Режимы хромирования, приведенные на рис. 10, охватывают все виды хромовых покрытий: матовый, блестящий, молочный и переходные виды [41].

Возможность существенного повышения плотности тока при получении блестящих осадков достигается в так называемом сверхсульфатном электролите (М. А. Шлугер) увеличением концентрации серной кислоты. Этот электролит¹ имеет следующий состав, г/л: хромовый ангидрид — 240—270; серная кислота — 9—11; трехвалентный хром — 18—22. Катодная плотность тока — 50—300 А/дм², температура — 50—75 °С. Рекомендуется для толстослойного хромирования цилиндрических деталей.

Оптимальными режимами для этого электролита, по данным [29], являются: для износостойких покрытий: $i_k = 250 \div 300$ А/дм², $t = 70 \div 75$ °С; для защитных покрытий: $i_k = 50 \div 100$ А/дм², $t = 70$ °С. Выход хрома по току в этом электролите достигает 18—20 % при 180 А/дм² и 65 °С.

Сульфатно-кремнефторидные электролиты. Введение в сульфатный электролит аниона кремнефтористоводородной кислоты повышает выход по току, расширяет интервал блестящих осадков и улучшает рассеивающую способность при значительных плотностях тока и повышенных температурах.

Введение SO_4^{2-} и SiF_6^{2-} в виде труднорастворимых солей (серноокислого стронция и кремнефтористого калия) обеспечивает высокую стабильность электролита, если их содержание превышает предел растворимости. По этой причине электролиты такого состава называют саморегулирующимися. Влияние добавок серноокислого стронция и кремнефторида калия детально изучалось в работе [42] и далее приводятся показатели, полученные в этой работе. Оптимальный состав электролита установлен следующий, г/л: хромовый ангидрид — 250—300; серноокислый стронций — 5,5—6,5; кремнефтористый калий — 18—20.

Выход хрома по току увеличивается при повышении концентрации компонентов и достигает максимума при содержании серно-

Таблица 1. Рекомендуемые режимы в зависимости от назначения покрытия

Покрытие	Режим	
	$t, ^\circ\text{C}$	$i_k, \text{А/дм}^2$
Износостойкое	55—58	80—100
Твердое	45—50	100—120
Противокоррозионное	60—65	20—40
Декоративное	58—60	60—70

¹ А. с. 185165 (СССР).

кислого стронция около 4 г/л и кремнефтористого калия 14 г/л. Выход хрома по току в этом электролите будет максимальным при концентрации 250—300 г/л хромового ангидрида и составляет 18 % при хорошем качестве покрытия.

У сульфатно-кремнефторидного электролита своеобразная зависимость выхода по току от плотности тока. При температуре электролита 40°C выход по току увеличивается с 15 до 19,8 % с ростом плотности тока от 20 до 60 А/дм². При температуре 50°C выход хрома по току возрастает с 16 до 17,2 % при том же

росте плотности тока. При 60°C плотность тока не влияет на выход по току, при 40—70 А/дм² он равен 17,8 %.

Изменения температуры сульфатно-кремнефторидного электролита сравнительно мало влияют на выход по току при обычных рабочих плотностях тока (50—100 А/дм²) и рабочих температурах (55—70°C). Но при малых плотностях тока увеличение температуры резко снижает выход хрома по току (рис. 11).

В этом электролите при температуре 40°C и плотности тока 20—30 А/дм² получают серо-матовые покрытия; при 50°C и 20—30 А/дм² осадки хрома имеют молочный оттенок, а при 40—60 А/дм²

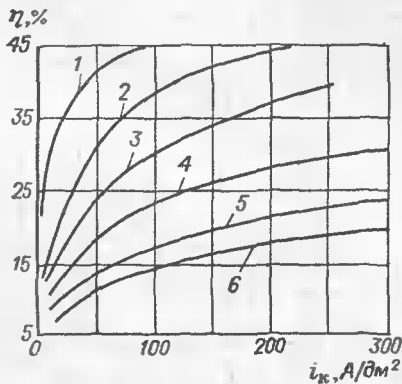


Рис. 10. Влияние катодной плотности тока на выход хрома по току при различной температуре, °C:

1 — 25; 2 — 35; 3 — 45; 4 — 55; 5 — 65; 6 — 75

образуются блестящие осадки. При 60°C и 40 А/дм² осадки получаются молочные, а при 50—70 А/дм² — блестящие, при 70°C блестящие осадки получают при плотности тока выше 50 А/дм², при 100 А/дм² также получают блестящие осадки. Общее представление об интервале блестящих осадков и скорости наращивания хрома в сульфатно-кремнефторидном электролите дается на рис. 12 (Семян В. М.).

Внутренние напряжения в хромовых покрытиях, осажденных из сульфатно-кремнефторидного электролита, и их микротвердость несколько ниже, чем покрытий из универсального электролита. Влияние покрытия на усталостную прочность стали и антифрикционные свойства не отличается от влияния покрытий из универсального электролита.

Преимуществом сульфатно-кремнефторидного электролита является малая зависимость выхода по току от колебаний режима электролиза и повышенный выход по току по сравнению с универсальным электролитом (примерно в 1,5 раза) для блестящих осадков. По данным М. А. Шлугера, для сульфатно-кремнефторидных электролитов рекомендуются аноды с 5—10 %-ным содержанием олова. Сульфатно-кремнефторидные электролиты имеют серьезный недостаток — сравнительно высокую химическую агрессивность.

В них травятся участки деталей, не подвергающиеся хромированию из-за недостаточной плотности тока на них или из-за недостаточной изоляции от электролита.

С этим недостатком необходимо особенно считаться при продолжительном нахождении деталей в ваннах в случае нанесения толстых слоев хрома. Участки деталей, которые в процессе хромирования могут подвергнуться растравливанию, должны быть особенно тщательно изолированы от электролита кислотостойким материалом (см. п. 14). Растравливание деталей, особенно

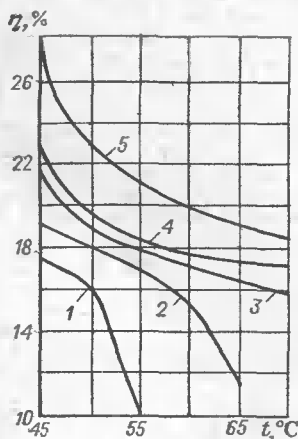


Рис. 11. Влияние температуры сульфатно-кремнефторидного электролита на выход хрома по току при катодных плотностях тока, А/дм²:
1 — 20; 2 — 30; 3 — 50; 4 — 60; 5 — 100

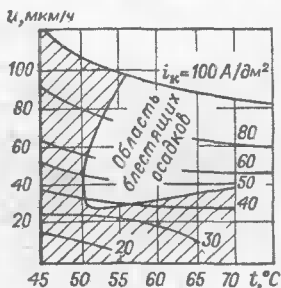


Рис. 12. Влияние режимов хромирования на область блестящих осадков и скорость наращивания u , мкм/ч, в сульфатно-кремнефторидном электролите

из цветных металлов, усиливается в присутствии хлоридов, которые могут быть занесены в электролит с промывной водой после травления в соляной кислоте, а также в результате использования хлорированной водопроводной воды.

Недостатком сульфатно-кремнефторидных электролитов является также сильная агрессивность их в отношении свинца. Поэтому свинец не может быть использован для обкладки ванн с такими электролитами, в данном случае применяют обычно ванны с обкладкой из винипласта. Аноды для этих электролитов делают из сплава свинца с 5—10 %-ным содержанием олова.

Для уменьшения агрессивности электролитов, содержащих кремнефториды, используют, в основном, два способа: уменьшение в электролите концентрации кремнефторида и введение в электролит алюминия. Проведенные с этой целью специальные исследования [7] показали возможность существенного снижения концентрации кремнефторида и установили положительное влияние кадмия на

работу электролита. Определен режим (табл. 2) и следующий оптимальный состав хромфторкадмиевого электролита, г/л:

Хромовый ангидрид	180—200
Серная кислота	0,8—1,1
Кремнефторид натрия	4,5—5,5
Бихромат натрия	25—35
Кадмий металлический	13—17

Травящее действие этого электролита в 2,5 раза меньше, чем сульфатно-кремнефторидного электролита (7 мкм/ч вместо 17 мкм/ч). Оно может быть снижено практически до нуля предварительным электрополированием деталей, а также предварительным хромированием с нанесением слоя хрома толщиной около 1 мкм на все поверхности детали, подлежащие изоляции.

Хромовые покрытия, полученные из этого электролита, имеют низкие внутренние напряжения, и соответственно предел усталости хромированной стали снижается меньше, чем при хромировании

Т а б л и ц а 2. Режим работы хромфторкадмиевого электролита

Покрытие	i_k , А/дм ²	t , °С	Катодный выход по току, %	Скорость осаждения хрома, мкм/мин, при плотности тока, А/дм ²	
				20	55
Блестящее	45—60	60±2	20—24	—	1,0
Молочное	20—25	70±2	10—12	0,2	—

в универсальном электролите. Рассеивающая способность этого электролита выше универсального.

Такой же путь снижения концентрации кремнефторидов использовал Днепропетровский химико-технологический институт, разработавший ряд комплексных активных добавок в хромовый электролит [31]. Эти добавки (ДХТИ-10, ДХТИ-11, ДХТИ-хром-11 и ДХТИ-50) делают электролит саморегулирующимся, расширяют рабочий интервал плотности тока и снижают агрессивность электролита. Добавки ДХТИ выпускаются Черкасским заводом химических реактивов имени XXV съезда КПСС. Электролиты с этими добавками получили применение на ряде заводов, особенно автомобильного производства с поточным технологическим процессом. Некоторые характеристики работы электролитов с добавками ДХТИ приведены в табл. 3.

Сравнительные определения рассеивающей способности, приведенные в работе [18], показали, что в зависимости от плотности тока коэффициент неравномерности покрытия для двух электролитов неодинаков (табл. 4).

Кроющая способность у электролитов с добавкой ДХТИ так же несколько выше, чем у сульфатных электролитов.

Была разработана добавка алюминия¹ в сульфатно-кремнефторидные электролиты

¹ А. с. 550463 (СССР)

П. М. Вячеславов и А. М. Плескач [10] предложили электролиты, содержащие 150 г/л хромового ангидрида с добавками цинка (25—28 г/л) или кадмия до 35 г/л, при температуре электролита 50°C, плотности тока 30 А/дм² и толщине покрытия более 10 мкм покрытие получается беспористым. Защитная способность покрытия толщиной 12 мкм выше, чем у многослойного покрытия медь—никель—хром такой же толщины. По данным указанных авторов,

Т а б л и ц а 3. Составы электролитов с добавками ДХТИ и режимы хромирования

Компоненты электролита	Концентрация, г/л	Вид покрытия	$i_{кр}, \text{А/дм}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	Выход по току при 30 А/дм ² , 45°C	Рассеивающая способность при 45°C	Кроющая способность при 45°C, мм	Стоимость 1 кг добавки, руб
Хромовый ангидрид Добавка ДХТИ-10	320—350 6—8	бл. тв	10—50	45—55	16,9	37	76	10,8
Хромовый ангидрид Добавка ДХТИ-11	250—200 5—6	бл тв	6—60	42—55	17,6	45	81	23,0
Хромовый ангидрид Добавка ДХТИ-хром-11	280—350 5—7	бл тв	5—80	40—55	19,1	51	87	8,4
Хромовый ангидрид Добавка ДХТИ-50	400—500 4—6	черн	3—60	20—38	16,1	40	80	8,7

Примечание Обозначение вида покрытия: бл — блестящее, тв — твердое, черн — черное.

Т а б л и ц а 4. Значения коэффициента неравномерности

Компоненты электролита	Концентрация, г/л	Коэффициент неравномерности при катодной плотности тока, А/дм ²		
		20	40	80
Хромовый ангидрид	150	5,7	6,3	8,0
Серная кислота	1,5			
Хромовый ангидрид	250	2,8	4,3	6,0
Добавка ДХТИ-11	5,7			

выход по току у электролитов с добавкой цинка составляет 17—34 %, а с добавкой кадмия 18—28 %.

Тетрахроматный электролит. Основной представитель этого типа электролитов [42] имеет следующий состав, г/л: хромовый ангидрид — 350—400, едкий натр — 50—60, серная кислота — 2,5—2,7 трехвалентный хром (в пересчете на хромовый ангидрид) — 10—15.

При введении едкого натра большая часть хромовой кислоты связывается с ним и образует тетрахромат натрия; оставшаяся в свободном состоянии кислота имеет концентрацию 80—100 г/л. Такой электролит не агрессивен и по некоторым данным может быть использован для хромирования изделий из латуни и цинкового сплава без промежуточного меднения и никелирования. Плотность тока при хромировании в указанном электролите 10—80 А/дм². Температура электролита 18—22°C и не должна превышать 24°C.

Поскольку в процессе электролиза выделяется значительное количество теплоты, то электролит необходимо охлаждать, что связано с известными трудностями. Ведение электролиза при низкой температуре электролита и высокой плотности тока способствует более высокому выходу хрома по току (до 30—35 %).

Тетрахроматные электролиты отличаются хорошей рассеивающей способностью. Осадки хрома имеют низкую твердость (примерно вдвое ниже, чем осадки из сульфатных электролитов), менее частую сетку трещин и меньшую пористость. Внешний вид осадков хрома матовый, но они сравнительно легко полируются.

Тетрахроматный электролит внедрен Ивановским производственным станкостроительным объединением имени 50-летия СССР для хромирования деталей из цинковых сплавов, изготовленных методом литья под давлением. Хромирование выполняют при $i_k = 15 \div 30$ А/дм², $t = 14 \div 23^\circ\text{C}$ и времени выдержки 25—30 мин. Ваина работает с охлаждением. Покрытие гляncуется войлочными кругами с пастой ГОИ.

Своеобразный холодный электролит типа тетрахроматного, главным образом для ремонтных работ, был разработан Кишиневским сельскохозяйственным институтом [28]. Этот электролит имеет следующий состав, г/л: хромовый ангидрид — 360—380, углекислый кальций — 54—62, сернистый кобальт — 18—20. Режим работы: $i_k = 75 \div 300$ А/дм², $t = 18 \div 23^\circ\text{C}$. Выход хрома по току при оптимальных условиях около 40 %. Микротвердость покрытия 8300—9500 МПа, толщина слоя до 0,7 мм.

При $i_k = 75 \div 300$ А/дм² покрытие имеет равномерную трещиноватость; при плотности тока менее 60 А/дм² трещины не обнаруживаются. Наибольшая износостойкость и наименьший коэффициент трения покрытия получаются в интервале плотностей тока 120—240 А/дм², и они близки показателям хрома, осажденного из универсального электролита.

Для достижения сцепления покрытия со сталью требуется предварительное анодное травление стальных деталей в смеси 1:1 50 %-ных растворов серной и фосфорной кислот при $i_a = 60 \div 90$ А/дм²; режим травления зависит от марки стали. Качество травления проверяется по прочности сцепления на пробной партии деталей, после чего осуществляется необходимая корректировка режимов предварительной обработки.

В работе [11] этот электролит был усовершенствован заменой сернистого кобальта на более доступный сернистый никель.

Его состав, г/л: хромовый ангидрид — 380—430; углекислый кальций — 60—80, серноокислый никель — 18—25. Режим работы: $i_k = 45 \div 70$ А/дм², $t = 25 \div 35^\circ\text{C}$. Электролит не требует охлаждения. Твердость покрытия 8250—10 000 МПа. Износостойкость покрытия и усталостная прочность стали после хромирования примерно такие же, как после хромирования в универсальном электролите. В подготовку поверхности перед хромированием включена обязательная операция гидропескоструйной обработки. После хромирования детали подвергают отпуску при температуре 350—380°C в течение 3 ч или при 160—180°C — 5 ч.

Достоинством тетрахромных холодных электролитов является высокий выход по току, а их недостатком — необходимость специальной подготовки для обеспечения сцепления покрытия с основой. Кроме того, для поддержания температуры электролита при больших нагрузках ванны требуется охлаждение электролита; декоративное хромирование требует дополнительной полировки покрытия.

Перспективные электролиты. Совершенствование электролитов осуществляется, в основном, в направлениях снижения концентрации хромового ангидрида, нанесение сплавов на основе хрома, расширение декоративных возможностей хрома, нанесение композиционных покрытий [9].

На основе изучения разбавленных электролитов был рекомендован электролит следующего состава, г/л [36]: хромовый ангидрид — 150; серная кислота — 1,5; двуххромовокислый аммоний — 170. Этот электролит отличается повышенной рассеивающей способностью (на 22—26 % выше, чем универсальный электролит), возможностью получения молочных осадков хрома при $i_k = 40$ А/дм² и $t = 65^\circ\text{C}$ вместо $i_k = 25$ А/дм² и $t = 70^\circ\text{C}$; выход по току несколько выше, чем в универсальном электролите, физико-химические свойства покрытий аналогичны покрытиям, полученным в малоконцентрированном электролите.

Получение покрытий из сплавов хрома имело целью улучшение свойств покрытий. Значительные работы в этом направлении проводятся в Московском вечернем металлургическом институте.

Электролит для нанесения сплава хрома с ванадием и молибденом¹ приведен в табл. 2. Этот электролит имеет выход хрома по току до 25 % и высокую рассеивающую способность. Микротвердость покрытия 10 000—11 000 МПа, износостойкость примерно в два раза выше, чем покрытия из универсальной ванны, внутренние напряжения покрытия пониженные [40]. В табл. 5 приводятся для сравнения свойства покрытий сплавами и хромом из универсального электролита при режиме хромирования: $i_k = 40 \div 70$ А/дм², $t = 50-70^\circ\text{C}$. По данным лабораторных исследований положительное влияние на сплав хрома с ванадием оказала добавка в электролит хлорамина Б [43]. Твердость сплава достигает 12 500 МПа; выход по току 20—30 %; защитная способность сплава слоем толщиной 20 мкм в два раза выше такого же слоя хрома при испытаниях в 3% растворе хлористого натрия и в 1,5 раза выше при испытании во влажной камере. Состав электролита, г/л: хромовый ангидрид — 250; серная кислота — 5; ванадиевая кислота — 15—20; хлорамин Б — 4. Режим: $i_k = 30 \div 70$ А/дм², $t = 50 \div 60^\circ\text{C}$. В покрытии содержится 0,4—0,6 % ванадия.

¹ А. с. 711181 (СССР).

**Т а б л и ц а 5. Механические свойства сплавов хрома
с ванадием и молибденом**

Компоненты электролита	Концентрация, г/л	Вид покрытия	Микротвердость, МПа	Износ, мг/3000 м	Внутреннее напряжение, МПа
Хромовый ангидрид Серная кислота	250 2,5	Хром	9 000—11 000	2,2—2,4	1250—1500
Хромовый ангидрид Серная кислота Ванадиевая кислота	250—300 3,5—4,0 10—28	Сплав ванадием (0,1 %)	7 000—9 000	1,2—1,5	800—1000
Хромовый ангидрид Серная кислота Ванадиевая кислота Молибденовая кислота	250—300 3,5—4,0 10—28 10 30	Сплав с ванадием (0,1%) и молибденом (0,1%)	10000—11000	0,9—1,0	900—1150

В исследованиях при разработке сплава хрома с титаном имелась в виду возможность уменьшения наводороживания основного металла, стали, за счет активного взаимодействия титана с водородом [13, 26]. Разработан электролит, содержащий, г/л: хромовый ангидрид — 250; серная кислота — 4,5—5,0; титан — 5 (в пересчете на металлический). В покрытии содержится 0,1 % титана. Выход по току — 18,5 %. Режим $i_k = 40 \div 120$ А/дм², $t = 45 \div 60^\circ\text{C}$. Твердость 8600—8900 МПа. В зависимости от состава электролита содержание титана в сплаве может изменяться от 0,05 до 0,5 %.

Существенной особенностью процесса нанесения сплава хрома с титаном является резкое возрастание катодной поляризуемости по сравнению с обычным хромированием. Так, сдвиг потенциала в отрицательную сторону при плотности тока 60 А/дм² составил 1,62 В, что на 0,5 В больше, чем при том же режиме нанесения хрома (см. п. 11). Такое смещение потенциала приводит к уменьшению наводороживания основного металла.

Представляют интерес электролиты с добавками галловой кислоты¹ и метиленового голубого². Авторы показывают положительное влияние этих добавок на режим хромирования и свойства покрытия. Исследованиями [16] показано, что введение в универсальный электролит 1—5 г/л метиленового голубого расширяет интервал блестящих осадков ($i_k = 100 \div 400$ А/дм² при 60—70°C), повышает твердость покрытия на 1000—2000 МПа и улучшает структуру покрытия.

¹ А. с. 306188 (СССР).

² А. с. 309979 (СССР).

Новым методом в совершенствовании электролитов является введение в электролит твердых неорганических частиц, которые, включаясь в покрытие, позволяют изменять его свойства, твердость, жаро- и износостойкость. В качестве добавки применяют карбиды, бориды, нитриды, окислы, сульфиды и другие соединения. Этот метод используют при покрытии никелем, медью, железом.

Применительно к хромовым покрытиям такие процессы еще не получили широкого распространения, но уже имеется ряд публикаций, указывающих на их эффективность. Испытания на износ показали, что введение в хромовое покрытие частиц $Al_2O_3 + SiC$ повышает износостойкость покрытия в 1,8 раза [9].

5. Хромирование при движении электролита

Ранее были рассмотрены методы улучшения техники хромирования, связанные с составом электролита и режимом хромирования. Сравнительно новым является метод снижения диффузионных ограничений, осуществляемый интенсивным перемешиванием прикатодного слоя электролита. Оно достигается движением всего объема электролита вдоль хромируемой поверхности (хромирование в проточном электролите) перпендикулярно хромируемой поверхности (анодно-струйное хромирование) и при наложении ультразвукового поля. Наибольшая интенсивность перемешивания создается ультразвуковым полем.

Влияние движения электролита на катодный процесс. Механизм диффузии разряжающихся ионов хрома к поверхности катода через катодную пленку недостаточно ясен, но можно полагать, что, как и при других гальванических процессах, диффузия ионов через прикатодный слой электролита при хромировании определяет концентрацию разряжающихся ионов на поверхности катода при данной плотности тока и тем самым существенно влияет на процесс образования осадка. Перемешивание электролита в прикатодном слое ускоряет диффузию ионов хрома, что позволяет получить некоторое увеличение выхода хрома по току. Как показано в работе [8], влияние перемешивания проявляется только при турбулентном движении электролита у поверхности катода. При одной и той же линейной скорости движения электролита турбулентность возникает тем легче, чем больше межэлектродное расстояние. Влияние перехода к турбулентному движению электролита при $i_k = 45 \text{ А/дм}^2$ и $t = 45^\circ\text{С}$ на скорость осаждения хрома хорошо видно из рис. 13. Аналогичная зависимость определена в работе [15].

В результате движения электролита существенно расширяется интервал блестящих осадков, увеличивается их равномерность и несколько повышается выход по току.

Зависимость выхода по току и скорости осаждения хрома от плотности тока при двух скоростях потока электролита приведена на рис. 14 [34]. Влияние протока на интервал блестящих осадков условно показано на рис. 15.

Перемешивание электролита. Пропускание через электролит сжатого воздуха с помощью перфорированных трубок, проложенных по дну ванны (барботаж), вызывает усиленное движение электролита и соответственно перемешивание прикатодного слоя. Следует, однако, иметь в виду, что эффективность барботажа должна

снижаться при небольших межэлектродных расстояниях, при хромировании с местными анодами и в изоляционных ячейках, где перемешивание затруднено. Барботаж рекомендуется для электролитов

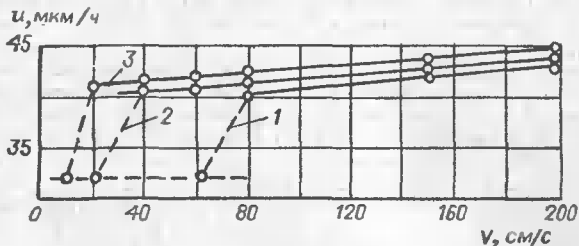


Рис. 13. Влияние скорости потока v , см/с, на скорость осаждения u , мкм/ч, хрома при межэлектродных расстояниях, мм:

1 — 2,5; 2 — 6; 3 — 10; ---- — область перехода к турбулентному движению

с диэлектрическими частицами и электролитов с добавкой SrSO_4 и имеет целью поддерживать осадок в взвешенном состоянии.

Хромирование в проточном электролите. Хромирование в проточном электролите осуществляется при помощи специальных уста-

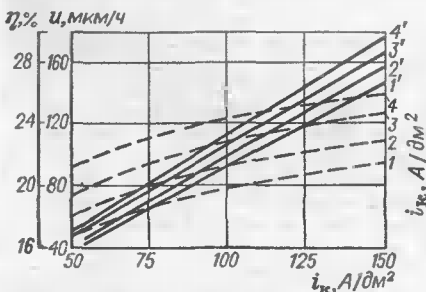


Рис. 14. Зависимость выхода хрома по току (----) и скорости наращивания хрома (—) от катодной плотности тока в проточном электролите:

1, 1' — $t=60^\circ\text{C}$; $v=50$ см/с; 2, 2' — $t=60^\circ\text{C}$, $v=100$ см/с; 3, 3' — $t=50^\circ\text{C}$, $v=50$ см/с; 4, 4' — $t=50^\circ\text{C}$, $v=100$ см/с

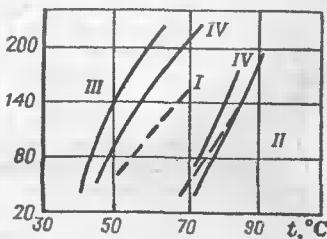


Рис. 15. Область блестящих осадков при проточном электролите ($v=120$ см/с, $d=3$ мм) ограничена сплошными линиями; в спокойном электролите ограничена пунктиром: I — блестящие; II — молочные; III — матовые; IV — переходные для проточного электролита

новок, обеспечивающих принудительную подачу электролита в пространство между поверхностями покрываемой детали и анода. Принудительная подача электролита обуславливает его непрерывную смену и равномерное газонасыщение в межэлектродном объеме.

Установки с принудительной циркуляцией электролита целесообразно применять в определенных случаях, например, при покрытии внутренней поверхности цилиндров большой длины и малого

диаметра, когда насыщенные электролита образующимися газами настолько велико, что нарушает нормальное осаждение хрома, или при хромировании внутренних сравнительно малых поверхностей массивных деталей, таких как тракторные или автомобильные блоки цилиндров двигателей и др.

В зависимости от размеров детали анодно-катодное расстояние изменяется в пределах 2,0—15 мм, а скорость протекания электролита соответственно уменьшается от 100 до 10 см/с. По данным [42], устойчивый выход хрома по току (около 20 %) может быть практически получен при различных плотностях тока и при различных анодно-катодных расстояниях (2, 6 и 10 мм) с соответствующими им скоростями подачи электролита (80—90, 40—50 и 20—30 см/с). При этих условиях соблюдается требование турбулентности потока.

Режимы скоростного хромирования, обеспечивающие при высокой производительности процесса получение высококачественных покрытий из проточного малоконцентрированного электролита, приведены в табл. 6.

Таблица 6. Режимы скоростного хромирования в проточном электролите (расстояние между анодом и катодом 2,5 мм) [42]

Скорость потока, см/с	Плотность тока, А/дм ²	Температура, °С	Скорость осаждения, мкм/ч	Выход по току, %
8—10	60	50	57—63	20—22
	80	55	75—80	20—21,5
	100	60	87—92	19,5—20
80—100	80	55	78—84	21—23
	120	60	110—120	20—21
	160	65	140—160	19—20

Примечание: Колебания плотности тока ± 5 А/дм², а температуры ± 3 °С.

В проточном электролите происходит некоторое сглаживание осадка, что позволяет значительно повысить плотность тока при получении блестящих покрытий. Так, по данным [34], при скорости потока 100—120 см/с блестящий осадок хрома получается в интервале 40—220 А/дм² при температуре 65°С. В стационарном универсальном электролите этот интервал при той же температуре составляет 40—130 А/дм².

Одной из причин неравномерного распределения хромового покрытия является неодинаковое насыщение электролита в межэлектродном объеме газовыми пузырьками. Они образуются при хромировании из кислорода, на выделение которого на аноде расходуется около 100 % тока, и водорода, на выделение которого на катоде затрачивается значительная часть тока. При ограниченном межэлектродном объеме (хромирование длинных цилиндров) и вертикальном расположении катода поднимающиеся вверх газовые пузырьки накапливаются в верхней части значительно больше, чем в нижней, что уменьшает живое сечение электролита в этом объеме, и, соответственно, возрастает его электрическое сопротивление.

В результате при хромировании вертикально расположенных цилиндров слой хрома в нижней части будет больше, чем в верхней, образуется конусность хромированной цилиндрической поверхности (рис. 16). Усиленный проток электролита через межэлектродное пространство делает газонасыщение электролита равномерным и

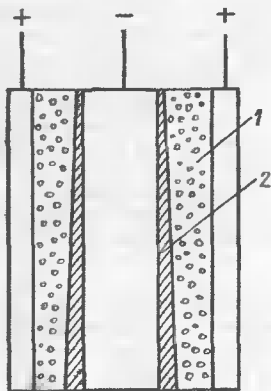


Рис. 16. Схема неравномерного заполнения межэлектродного пространства газовыми пузырями:
1 — газовые пузыри; 2 — слой хрома

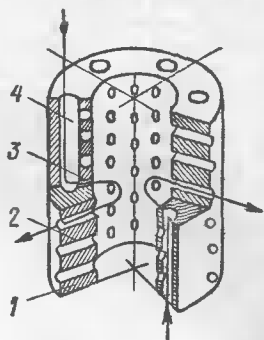


Рис. 17. Схема устройства анода для возвратно-струйного хромирования:
1 — корпус; 2 — выходные отверстия; 3 — входные отверстия; 4 — продольные каналы

устраняет возможность конусности из-за указанной причины (табл. 7) [15].

Для практического применения рекомендованы следующие режимы проточного хромирования (табл. 8).

Анодно-струйное хромирование. Более интенсивное перемешивание прикатодного слоя достигается при направлении струн электролита перпендикулярно хромируемой поверхности. Практически это осуществляется использованием анодов в качестве сопел, направляющих струи электролита на хромируемую поверхность. Аноды делают полыми с круглыми или щелевидными отверстиями, распределенными по всей рабочей поверхности. Электролит, подаваемый в полость анода насосом, направляется на поверхность детали через указанные отверстия в аноде. Вариа́нт анодно-струйного хромирования является способ¹, при котором электролит вытекает из рабочей зоны через сливные отверстия, равномерно распределенные на рабочей части анода. Это обуславливает одинаковое интенсивное воздействие потока электролита на всю хромируемую поверхность (рис. 17).

Детальным исследованием этого способа хромирования [21] установлены следующие условия получения износостойких покрытий из универсального электролита с высокой скоростью равномерного осаждения хрома ($100\text{--}110\text{ мкм/ч}$; $i_k = 100 \div 120\text{ А/дм}^2$; $t = 55 \div 60^\circ\text{C}$, выход по току $19\text{--}20\%$, скорость потока электро-

¹ А. с. 337441 (СССР).

лота 1,2—1,4 м/с; диаметр входных отверстий 2,4—2,6 мм, выходящих — 2,8—3,0 мм, межэлектродное расстояние 8—12 мм. Микротвердость покрытий 10 500—11 000 МПа. Способ получил название возвратно-струйного хромирования. Анодно-струйное и возвратно-струйное хромирование целесообразно применять при массовом хромировании однотипных деталей, имеющих, главным образом, цилиндрическую форму: цилиндров двигателей, поршневых колец, пальцев и других подобных деталей.

Хромирование в ультразвуковом поле. Ультразвуковое поле создает интенсивное перемешивание электролита в прикатодном слое, и его влияние на режим хромирования и характеристики процесса близки к влиянию особо интенсивного потока электролита. Наряду с перемешиванием при ультразвуковом поле в результате микроавтационных явлений возникает значительное механическое воздействие на поверхность деталей, с помощью которого удаляются загрязнения и разрушаются разного рода окисные пленки на поверхности деталей. Такое очищающее действие ультразвука позволяет использовать его для хромирования алюминиевых и титановых сплавов, которые из-за окисных пленок не могут быть непосредственно покрыты хромом.

Наложение ультразвукового поля в процессе хромирования позволяет значительно повысить плотности тока, при которых осаждаются блестящие осадки. Однако этот же эффект может быть достигнут проточным электролитом и реверсированием тока без такого значительного осложнения, каким является использование специального оборудования для возбуждения в электролите звукового поля. Основной особенностью действия ультразвукового поля, которое имеет перспективы практического применения, является интенсивное очищающее действие на покрываемый металл.

При хромировании титана для обеспечения хорошего сцепления покрытия с основой рекомендуются следующие режимы (М. А. Шлугер):

обработка ультразвуком в хромировочном электролите без тока при 50—60°C при интенсивности поля 4—5 Вт/см²;

осаждение хрома при 200—220 А/дм² и интенсивности поля 4—5 Вт/см² в течение 3—5 мин;

осаждение хрома до заданной толщины при плотности тока 120—200 А/дм² и интенсивности ультразвукового поля 2—3 Вт/см²

Таблица 7. Конусность хромированного цилиндра в зависимости от газонасыщения электролита и скорости потока

Скорость потока, см/с	Конусность цилиндра, мкм, при межэлектродных расстояниях, мм		
	3	6	12
2	21	15	10
20	16	11	7
40	11	8	5
60	9	7	4
80	8	6	4
100	7	6	4
150	7	6	4

6. Хромирование с применением нестационарного тока

Нестационарный ток для питания хромовых ванн в основном имеет два вида (рис. 18): импульсный и реверсивный (ток пере-

Таблица 8. Состав и режим электролитов для проточного хромирования [15, 34]

Компоненты электролита	Концентрация, г/л	Скорость потока, см/с	Межэлектродное расстояние, мм	i_k , А/дм ²	t° С
Хромовый ангидрид Серная кислота	230—260 3,5—4,5	80—100	15—30	80—100	35—60
Хромовый ангидрид Серная кислота	250—300 5—7	20—150	10—30	50—400	55—75

менного направления). При импульсном токе происходят периодические кратковременные перерывы тока и этот режим характеризуется продолжительностями импульса и паузы. При реверсивном токе катодная поляризация хромируемой детали периодически заменяется кратковременной анодной поляризацией. При этих видах

токов перерывы процесса наращивания хрома не дают возможности развиваться крупнокристаллической, шишковатой структуре покрытий, их поверхность получается гладкой.

Механизм влияния пульсации тока на процесс хромирования можно упрощенно представить следующим образом. Во время перерыва тока происходит постепенное разрушение катодной пленки, которая, как известно, оказывает существенное влияние на свойства хромовых покрытий. Можно предполагать, что при некоторой степени разрушения наступает такое ее состояние, при котором достигается оптимальное течение катодного

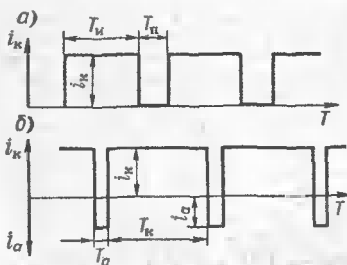


Рис. 18. Схема изменения тока при импульсном (а) и реверсивном (б) токах: $T_{и}$, $T_{п}$, T_a , T_k — периоды импульсов тока, паузы, анодной и катодной поляризации, соответственно

процесса, приводящее к расширению интервала гладких покрытий. Прекращение выделения водорода во время паузы обуславливает некоторое уменьшение наводороживания при импульсном токе.

В работе [27] показано, что хромирование высокопрочной стали 30ХГСА (49 HRC) с применением импульсного тока уменьшает наводороживание стали. Соответственно при испытаниях на разрывных образцах установлено, что при $i_k = 120$ А/дм², $t = 58 \div 60^\circ\text{C}$, оптимальном импульсе 2 мс и паузе 10 с относительное сужение разрывного образца составляло 19 %, а при постоянном токе оно было 12 %. (Нехромированные образцы 58 %.)

При хромировании постоянным током ($i_k = 60$ А/дм², $t = 58 \div 60^\circ\text{C}$) цементированной закаленной стали 12Х2Н4А

(56 HRC) в напряженном состоянии образец растрескивался из-за водородной хрупкости через 30 мин, а при хромировании импульсным током при оптимальном режиме ($T_n=2$ мин, $T_p=6 \div 10$ с) растрескивание не наступило через 180 мин.

Микротвердость покрытий при импульсном токе 8500—10 000 мПа. Возможно получение доброкачественных осадков при $i_k=120$ А/дм². Учитывая эти результаты при импульсном токе, в указанной работе рекомендуется следующий режим хромирования в универсальном электролите: $i_k=60 \div 120$ А/дм²; $t=60^\circ\text{C}$; $T_n=2$ мин, $T_p=8 \div 10$ с.

При реверсивном токе к изложенным явлениям перерыва процесса добавляется кратковременное анодное травление растущего хромового покрытия. В результате этого усиливается сглаживание покрытия, так как не только прекращается рост кристаллов хрома, но происходит растворение активных точек кристаллизации и выступающих над поверхностью начальных шишкообразований. Наряду с этим возможно уменьшение наводороживания покрытия за счет окисления при анодной поляризации водорода, максимальная концентрация которого сосредоточена в тонком поверхностном слое покрытия.

Известно, что анодная поляризация хромового покрытия вызывает его растрескивание, если в покрытии имеются растягивающие напряжения.

В результате растрескивания напряжения в покрытии уменьшаются или полностью ликвидируются. По этой причине пористый хром, получаемый за счет анодной обработки, не имеет растягивающих напряжений или они незначительны. Периодическая анодная поляризация растущего хромового покрытия предупреждает возможность развития в нем значительных внутренних напряжений. При анодной поляризации усиленно растворяется покрытие на участках, где оно имеет повышенную толщину из-за высокой плотности тока. Скорость этого растворения в несколько раз больше скорости наращивания хрома при катодном периоде и эта разница обуславливает выравнивающее действие реверсивного тока.

Накапливающиеся в прикатодном слое продукты анодного растворения хрома в известной степени способны уменьшить диффузионные ограничения при катодной поляризации, что позволяет повысить допустимую плотность тока.

В результате сложного комплексного воздействия анодной поляризации реверсирование тока при хромировании дает следующие преимущества перед хромированием на постоянном токе: получение гладких малонапряженных покрытий значительной толщины при высоких плотностях тока (до 100—120 А/дм²); достижение повышенной рассеивающей способности; повышение защитной способности покрытий; меньшее снижение усталостной прочности стали; шероховатость поверхности хрома после его осаждения с применением реверсированного тока значительно ниже, чем при хромировании на постоянном токе.

Фактические показатели, характеризующие влияние реверсирования тока, видны из следующих примеров.

При наращивании хрома толщиной 0,2 мм при $i_k=60$ А/дм² и $t=58 \div 60^\circ\text{C}$ шероховатость поверхности металла после хромирования снижается до $Ra=2,5 \div 1,25$ мкм из-за шишковатости хрома. При переходе на реверсивный ток с $T_k=8,5$ мин и $T_a=18$ с сохранилась исходная шероховатость $Ra=0,32 \div 0,16$ мкм.

При этом же режиме и толщине слоя 0,15 мм и составном катоде применение реверсивного тока существенно повысило равномерность распределения хрома. Так, разность между наибольшей и наименьшей толщиной слоя при постоянном токе составила 18 приведенных единиц, а при реверсивном токе эта разница была 7 единиц, т. е. равномерность покрытия увеличилась почти в 2,5 раза.

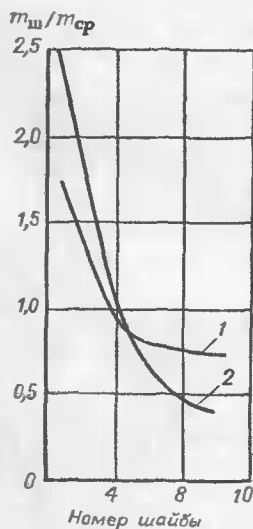


Рис. 19 Рассеивающая способность при хромировании с реверсированием тока (1) и без реверсирования (2):

$m_{ш}$ — масса хрома на шайбе; $m_{ср}$ — средняя масса хрома

Рассеивающая способность, определявшаяся в работе [42] по методу разборного катода, значительно улучшилась при реверсивном токе (рис. 19). Повышение рассеивающей способности при реверсивном токе установлено также в работе [5]. На разборном катоде общей длиной 185 мм при расстоянии концов катода от анодов, равном 25 мм, средняя толщина слоя 100 мкм. Толщина хрома на крайних секциях катода при хромировании на постоянном токе в 2,5 раза превышала среднюю толщину покрытия. В случае хромирования на реверсивном токе эта величина уменьшалась до 1,5, т. е. рассеивающая способность электролита при реверсе стала ориентировочно в 1,5 раза выше, чем при постоянном токе

Такое выраженное при реверсе сглаживающее действие и повышение равномерности покрытия позволяет эффективно использовать реверс для размерного хромирования и для повышения экономичности процесса за счет уменьшения неравномерности покрытия. Этот метод получил производственное применение для беспритирочного хромирования поршневых колец.

Изменение защитной способности хромовых покрытий под влиянием реверса изучено недостаточно глубоко, но уже проведенные испытания [42] показывают,

что при погружении в 3 % раствор хлористого натрия стальные образцы, покрытые слоем хрома 30 мкм при $i_k = 60 \text{ А/дм}^2$ и $t = 60^\circ\text{C}$, не подверглись коррозии в течение всего срока испытаний (250 ч), а хромированные при этом же режиме постоянным током начали корродировать через 7–10 ч.

Вибрационные испытания турбинных лопаток из стали 2Х13 показали, что их усталостная прочность снижается после хромирования на постоянном токе на 18 %, а при реверсивном токе — на 9 %.

Усталостная прочность стали, хромированной постоянным током, снижается на 27,8 %, а при хромировании реверсивным током это снижение составляет только 3,8 %.

Для высокопрочных сталей, как указано в работе [42], реверсирование тока не оказало влияния на снижение усталостной прочности после хромирования.

На микротвердость и износостойкость хромо-вых покрытий реверсирование при оптимальных режимах не оказывает существенного влияния.

При подходе к выбору оптимального режима реверсирования в работе [42] предложено стремиться по возможности к сокращению длительности катодного периода, чтобы реверсирование тока происходило возможно чаще. Очевидно, что при этом эффект от реверсирования должен возрастать. И действительно проведенные исследования в ряде случаев подтвердили справедливость такого положения. Но в других работах, когда экспериментальным путем определяли оптимальную продолжительность катодного периода для конкретных деталей, были определены режимы, отличающиеся сравнительно большой длительностью катодного периода. Так, в работе [5] для получения равномерного гладкого покрытия на поршневых кольцах была установлена продолжительность катодного периода в 15 мин и анодного 40—60 с. Практическое освоение на одном из заводов [17] привело к уточнению этого режима: $T_k = 20 \div 22$ мин, $T_a = 20 \div 30$ с.

Для крупногабаритных деталей, хромируемых на этом заводе слоем 0,3—0,4 мм, установлен режим: $T_k = 25 \div 26$ мин, $T_a = 20 \div 30$ с.

Примером экспериментального определения режима реверса в зависимости от конкретных требований является работа [24], установившая эти режимы для малоконцентрированной сульфатной ванны с добавкой сернокислого стронция (табл. 9).

Т а б л и ц а 9. Режимы хромирования и реверсирования тока [24]

Назначение	Рекомендуемые параметры				t, °C
	T _к	T _а	i _к	i _а	
	с		А/дм ²		
Высокая производительность (140—155 мкм/ч)	210	3—4	180—200	40—50	58—60
Получение осадков высокой микротвердости (12 300—12 500 МПа)	210	3—4	150—180	150—180	58—60
Получение защитно-декоративных бестрещинных покрытий	210—300	7—10	60—100	20—25	60—65

Можно полагать, что как для каждого электролита обычного хромирования нет единого режима, так и для реверсирования тока не может быть одного универсального режима на все случаи, встречающиеся в производстве. Поэтому показатели реверсирования и режим хромирования должны выбираться с учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации хромируемой детали. При этом может быть использован опыт хромирования подобных деталей, результаты исследования реверсирования (например, [42]) или специально проведенной экспериментальной работы.

Хромовые покрытия отличаются низкой смачиваемостью, что препятствует сохранению масляной смазки. Для устранения этого недостатка применяют пористое хромирование.

Пористый хром представляет собой хромовые покрытия, на поверхности которых специально создается большое количество отдельных пор или сетка трещин, достаточно широких для проникновения в них масла. Такая сетка трещин способствует значительному улучшению смачиваемости поверхности хрома маслом. Пористо-хромовые покрытия, как правило, применяются в качестве износостойких покрытий для деталей, работающих на трение в тяжелых условиях эксплуатации при недостаточной смазке. Антифрикционные свойства пористых покрытий видны из рис. 20 (Г. С. Левицкий).

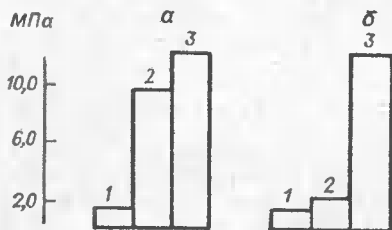


Рис. 20. Пределно допустимая нагрузка на сталь и на хромированные стальные валы при хорошей (а) и плохой (б) смазках:

1 — сталь; 2 — гладкий хром; 3 — пористый хром

Сущность получения пористого хрома заключается в электролитическом (анодном) травлении слоя блестящего хрома, имеющего сетку тончайших трещин. Растворение хрома протекает в основном по граням трещин, вследствие чего они расширяются. Такие расширенные трещины в отличие от первичных трещин на хrome принято называть каналами пористого хрома. Кроме того, при наличии в покрытии растягивающих напряжений анодное травление вызывает образование в нем новых трещин, уменьшая эти на-

пряжения. Каналы пористого хрома обладают капиллярными свойствами, что обеспечивает смачивание поверхности хрома маслом. Благодаря хорошей смазке снижается истирание не только поверхности, покрытой пористым хромом, но и сопряженно работающей поверхности.

Среди разновидностей пористого хрома, получаемого электрохимическим путем, можно указать на так называемый точечный пористый хром. Этот тип пористого хрома имеет большое число углублений в виде мельчайших пор или раковин, в которых хорошо удерживается смазка.

Покрытие пористым хромом, как правило, состоит из двух слоев: нижнего плотного и верхнего пористого. Пористый слой хрома составляет примерно 1/3 от общей толщины хрома. После износа пористого слоя работа детали на трение продолжается вполне удовлетворительно. По-видимому, пористая часть хрома не только аккумулирует смазку, но также способствует приработке трущихся поверхностей. Для получения хорошо прирабатывающейся поверхности пористого хрома рекомендуется степень пористости поддерживать в пределах 25—45 % при ширине каналов не менее 6—7 мкм.

Рекомендуется наносить плотный слой хрома при высокой плотности тока $i_k = 80 \div 200 \text{ А/дм}^2$, $t = 65 \div 75^\circ\text{C}$, а пористую часть при режиме, обеспечивающем необходимую пористость, например

$i_k = 35 \div 50$ А/дм²; $t = 50 \div 60^\circ\text{C}$. Количество электричества на единицу поверхности при анодном травлении составляет 350—450 А·мин/дм². Покрытия должны быть возможно более равномерными по толщине [42].

Пористый хром можно также получить химическим способом путем травления хромового покрытия в кислоте или механическим способом путем нанесения перед хромированием на поверхности изделия углублений — пор или канавок.

Детали, покрытые пористым хромом, обладают высокой износостойкостью. При равномерном распределении нагрузки на трущейся хромированной поверхности пористое хромовое покрытие может выдерживать при трении давление до 10 МПа. Поверхность, сопряженная с поверхностью детали, покрытой пористым хромом, изнашивается меньше, чем при трении по стали (например, износ баббита при трении о пористый хром под давлением 2000—10 000 кПа в два — четыре раза меньше, чем по стали).

В настоящее время покрытие пористым хромом используется для поршневых колец, цилиндров и некоторых других деталей двигателей внутреннего сгорания.

Чтобы хорошо удерживать смазку и противостоять истиранию, каналы пористого хрома должны обладать необходимой глубиной и шириной, а покрытие — оптимальной степенью пористости. Под степенью пористости понимается отношение площади, занятой каналами, ко всей площади покрытия и обычно измеряется числом площадок между трещинами на 1 см² поверхности. Густота сетки, ширина и глубина каналов пористого хрома зависят от условий хромирования: отношения $\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ в электролите, катодной плотности тока и температуры электролита, а главным образом от количества электричества, израсходованного на процесс анодного травления.

При пористом хромировании деталей отношение $\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ рекомендуется поддерживать в пределах 105—110, что обеспечивает получение оптимальной сетки пористости. Максимальные отклонения отношения не должны выходить за пределы 120—95. При уменьшении отношения $\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ сетка каналов пористого хрома становится гуще, а сами каналы несколько шире.

Уменьшение катодной плотности тока при хромировании вызывает образование густой сетки каналов пористого хрома. Наряду с этим ширина и глубина каналов становятся меньше. Оптимальная катодная плотность тока при пористом хромировании лежит в пределах 40—60 А/дм². Наиболее сильное влияние на степень пористости покрытия оказывает температура электролита при хромировании.

С увеличением температуры электролита ширина каналов пористого хрома возрастает, степень пористости, наоборот, понижается, а сетка каналов становится более редкой. Влияние режима хромирования на трещинообразование показано на рис. 21.

Покрытия пористым хромом, полученные при низких температурах хромирования и отличающиеся густой сеткой тонких и неглубоких каналов, имеют настолько малые площадки, что при работе на трение происходит расшатывание и выкрашивание частиц хрома.

Скорость формирования сетки каналов пористого хрома при анодной обработке покрытий зависит от количества расходуемого на процесс анодного травления электричества. Благодаря этому на деталях, хромированных при одних и тех же условиях электролиза,

проходит через объем электролита над деталью и под ней (рис. 22, а). В нижней и верхней частях катода ток, кроме того, усиливается за счет влияния большой поверхности анода относительно хромируемой детали. Можно существенно улучшить распределение тока, если верхний край детали расположить непосредственно под уровнем электролита (устраняется отвлечение тока через верхний объем электролита), а нижний край анода поднять выше нижнего края детали (увеличится сопротивление току, отводимому в нижний объем

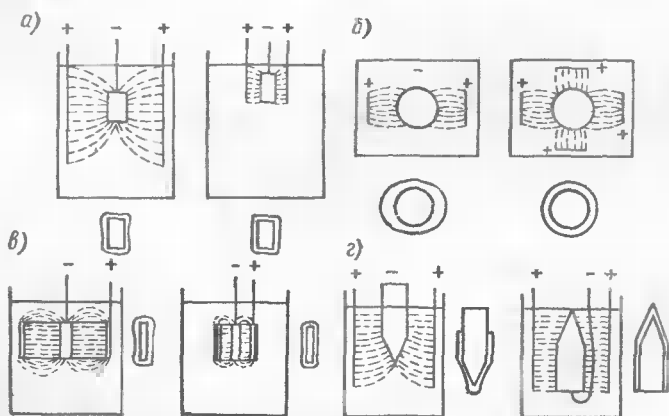


Рис. 22. Распределение хромового покрытия на деталях в зависимости от их расположения в ванне: а — различная глубина погружения детали относительно анода и уровня электролита; б — размещение плоских анодов относительно цилиндрической детали; в — различное межэлектродное расстояние при цилиндрическом аноде; г — положение детали относительно уровня электролита

электролита) При хромировании поверхностей простой формы (цилиндр, плоскость) для достижения наиболее равномерного покрытия следует анод расположить параллельно хромируемой поверхности при минимальном межэлектродном расстоянии. Упрощенным вариантом этого требования является расположение плоских анодов со всех сторон хромируемой цилиндрической детали (рис. 22, б)

Влияние межэлектродного расстояния проявляется особенно сильно при его изменениях в пределах величин, соизмеримых с размерами электродов (рис. 22, в), и имеет значение для характерных при изиосостойком хромировании деталей с простым рельефом (цилиндрических и плоских). Для деталей с развитым рельефом, характерным для защитно-декоративного покрытия, с увеличением межэлектродного расстояния улучшается распределение покрытия по рельефной поверхности в соответствии с кроющей способностью электролита.

Возможность практически полного исключения концентрации тока даже на остриях путем расположения их непосредственно под уровнем электролита иллюстрируется на рис. 22, г.

На распределение тока в электролите большое влияние могут оказать стенки ванны, выложенной свинцом (рис. 23). Это влияние проявляется в часто встречающихся случаях, когда через стенки

и дно ванны проходит ток от анодов, расположенных вдоль стенок, к деталям. Дно ванны в данном случае является анодом, создающим также дополнительный ток на нижние поверхности детали. Таким непредусмотренным анодом может быть также любой участок внутренней обкладки ванны, расположенный далеко от основных анодов, если эти аноды находятся близко от обкладки в других местах ванны. Влияние стенок ванны можно устранить путем выкладки в нее материалом с высоким электрическим сопротивлением (винипластом, стеклом и др.). В ваннах, выложенных свинцом, можно существенно уменьшить их влияние, располагая аноды и детали возможно дальше от стенок и дна.

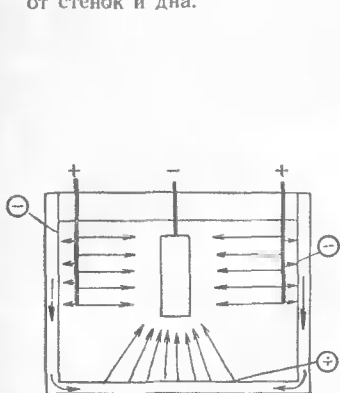


Рис. 23. Влияние стенок и дна ванны на распределение тока в ванне

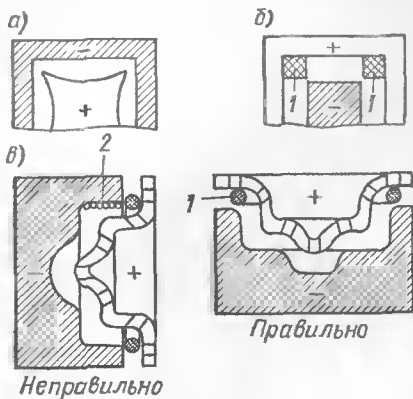


Рис. 24. Схемы монтажа некоторых профилированных деталей и анодов; 1 — экран; 2 — газовые пузырьки

На рис. 24 представлены некоторые характерные схемы монтажа при хромировании внутренней и наружной поверхностей деталей. Для равномерного осаждения хрома на внутренних гранях и в углах детали анод должен иметь оттянутые углы (рис. 24, а). При хромировании наружной поверхности для предупреждения образования грубых «пригорелых» осадков хрома на углах детали аноду следует придать форму хромируемой детали (рис. 24, б), а напротив ее углов установить непроводящие ток экраны, например из органического стекла. На рис. 24, в деталь расположена неправильно, так как скапливающиеся на нижней поверхности газовые пузырьки нарушают хромирование этой поверхности.

При хромировании деталей, отличающихся сложной формой (пресс-формы, штампы и т. п.), как правило, применяют фигурные аноды (рис. 24, в), воспроизводящие очертания хромируемой поверхности. Отверстия в аноде предусматривают для облегчения удаления газов из электролита, заключенного между электродами, и для более равномерного влияния обратной поверхности анода на распределение тока по хромируемой поверхности.

При хромировании внутренней поверхности цилиндра анод помещают внутри соосно с хромируемой поверхностью. Однако в данном случае необходимо иметь в виду, что при слишком малом анодно-катодном расстоянии, при высоких плотностях тока и небольшом

объеме электролита, заключенного между электродами, происходит сильное насыщение газами его верхних слоев (см. рис. 16). Вследствие этого толщина осажденного хрома в верхней части цилиндра получается меньше, чем в нижней. Для предупреждения неравномерного осаждения хрома по высоте длинных цилиндров хромирование следует производить в проточном электролите.

Особое значение для снижения краевого эффекта имеет применение защитных катодов и изолирующих экранов. На рис. 25

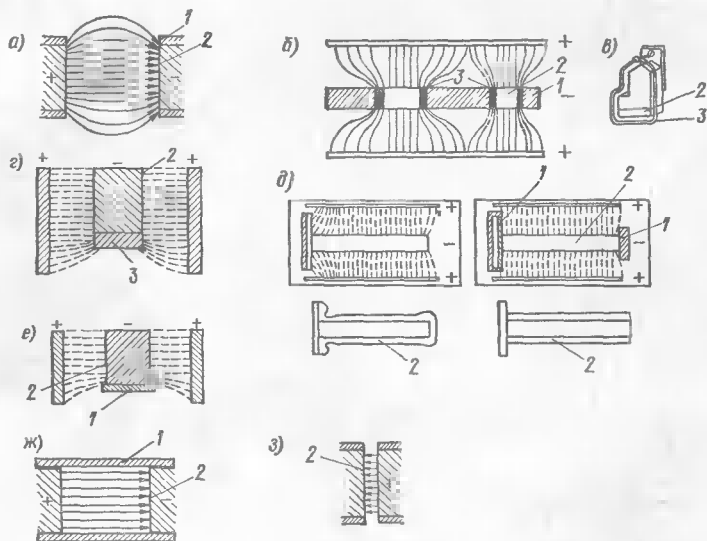


Рис. 25. Краевой эффект и приемы его уменьшения: *а* — схема краевого эффекта; *б* — защитные катоды при местном хромировании вала; *в* — проволоочный защитный катод у края фасонной детали; *г* — защитный катод у нижнего края цилиндра (верхний край под уровнем электролита); *д* — схема экранирования вала от влияния фланца и краевого эффекта; *е* — экранирование нижней части вала (верхняя находится под уровнем электролита); *ж* — изоляция межэлектродного объема от остального электролита; *з* — снижение краевого эффекта при уменьшении межэлектродного расстояния:

1 — изоляция; 2 — хромируемая поверхность; 3 — защитный катод

приведены некоторые приемы их использования, а также схема устранения краевого эффекта путем изоляции межэлектродного объема от остального электролита и его уменьшение за счет сокращения межэлектродного расстояния.

Защитные катоды. Действенным методом устранения краевого эффекта является применение защитных катодов около участков с повышенной концентрацией тока. Защитный катод — это проводник, соединенный электрически с хромируемой деталью и обычно укрепленный на детали таким образом, чтобы отвлечь от краев хромируемой поверхности на себя избыточный ток. Степень отвлекающего действия защитного катода регулируется его расстоянием от хромируемой поверхности, формой и размерами. Чаще всего защитному

катоду придавать форму хромируемой поверхности и располагают его на детали так, чтобы он был продолжением этой поверхности (см. рис. 25, б — г).

При местном хромировании цилиндрических деталей нехромируемые участки, смежные с хромируемыми, покрывают свинцовой или алюминиевой фольгой, которая является защитным катодом, устраняющим утолщение хрома на краях хромируемой поверхности (см. рис. 25, б). При необходимости усиления действия защитного катода следует отогнуть его край на 2—5 мм.

С помощью защитных катодов можно добиться высокой равномерности хромового покрытия даже при неблагоприятном расположении детали в ванне. Однако этот метод имеет существенный недостаток, так как при нем дополнительно расходуется ток и хромовый ангидрид на покрытие защитного катода.

Защитные экраны. При регулировании распределения тока на хромируемой поверхности с помощью экранов из электроизоляционных материалов не расходуется дополнительно ток и хромовый ангидрид. Такой экран представляет собой перегородку на пути тока, увеличивающую местное сопротивление для его прохождения и тем самым ослабляющую плотность тока на данном участке. Но кроме устранения избытка тока экран может способствовать равномерному распределению тока на детали, у которой хромируемые участки влияют друг на друга. Покрытие изоляцией (экраном) одного участка устраняет его влияние на другой. Например, при хромировании вала с фланцем торцевая поверхность фланца, обращенная к валу, отвлекает от него ток, что приводит к неравномерному покрытию вала около фланца. Это влияние полностью устраняется, если фланец покрыт изоляцией (экраном), как это показано на рис. 25, д.

У изолирующих экранов область применения шире, чем у защитных катодов, и применение их не снижает технико-экономических показателей хромирования, как при защитных катодах.

II. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ

9. Физико-химические свойства и структура

Хром является элементом шестой группы периодической системы Д. И. Менделеева. Его порядковый номер 24, атомная масса 52,01.

Электролитический хром отличается по своим свойствам от хрома, полученного металлургическим путем. Его особенностью является зависимость свойств от режима осаждения (табл. 10).

Т а б л и ц а 10. Плотность электролитического хрома

Хром	Режим осаждения		Плотность хрома, г/см ³
	i_k , А/дм ²	t , °С	
Отожженный при 1200°С	—	—	7,2
Мочальный	20	65	7,1
Блестящий	35	55	7,0
Матовый	40	45	6,9

Электрохимический эквивалент (для Cr^{6+}), г/А·ч	0,324
Стандартный электродный потенциал (для реакции $\text{Cr}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Cr}$), В	—0,744
Стационарный потенциал, В:	
в 3 %-ном растворе NaCl	+0,23
» 3 %-ном » $\text{NaCl} + 0,1 \text{ H}_2\text{O}_2$	+0,6
Удельное электрическое сопротивление хрома, мкОм·см:	
молочного	30
матового	60
после отжига при 1200°C	10
Отражательная способность хрома, %:	
блестящего	60—65
черного	1—10

Структура электролитического хрома характеризуется наличием двух видов кристаллической решетки: кубической объемно-центрированной и плотноупакованной гексагональной. Удельная доля каждого вида в покрытии зависит от режима хромирования. При высоких плотностях тока и повышенной температуре электролита образуется преимущественная кубическая структура, при низких плотностях тока и комнатной температуре электролита образуется, в основном, гексагональная структура.

Последняя устойчива при температурах ниже 25 °C. Выше она постепенно переходит в устойчивую кубическую форму, уменьшаясь в объеме приблизительно на 16 %.

Усадка хрома, сопровождающаяся изменением линейных размеров, зависит от режима хромирования. Такая усадка свидетельствует о наличии в хромовом покрытии значительных растягивающих напряжений. Среднее значение внутренних напряжений, отнесенное к толщине слоя, уменьшается по мере увеличения толщины покрытия. Хромовые покрытия с кубической структурой имеют слоистое строение, и при достаточно больших растягивающих напряжениях происходит растрескивание каждого слоя. Режим, при котором в покрытии образуются трещины, впервые установил Ю. Б. Федоров. Растрескивание хромовых покрытий зависит не только от растягивающих напряжений. Так, хотя напряжение в покрытии, осаждаемом из сульфатного электролита, значительно выше, чем осаждаемого из сульфатнокремнефторидного, однако у первого растрескивание начинается только при слое 15 мкм, а у второго при достижении слоя 4—5 мкм [2].

Условия электролиза также влияют на растрескивание хромового покрытия. Хром с гексагональной структурой не имеет сетки трещин, в нем отсутствует слоистость. Он характерен для тетрахроматных электролитов, работающих при комнатной температуре. Плотность хрома, имеющего гексагональную структуру, равна 6,08 г/см³, а имеющего кубическую структуру — 7,1 г/см³.

В зависимости от режима хромирования образуются четыре основных вида хромовых покрытий: блестящий, матовый, молочный и серый хром. Серый осадок хрома является специфическим для тетрахроматных ванн, работающих при комнатной температуре, и образуется при всех плотностях тока, рекомендуемых для этого электролита. Он имеет однородную гладкую поверхность серого цвета

10. Механические свойства хромовых покрытий

Твердость. Твердость хрома, в основном, зависит от температуры электролита и плотности тока. Характер этой зависимости приведен на рис. 26 [41].

Различные виды хромовых покрытий имеют следующие значения твердости, МПа: блестящий и серебристо-матовый — 7500—11 000; молочный — 5400—6000; серый — 3500—4000; отожженный хром — 3500—4000. Наиболее твердые хромовые покрытия значительно превышают по твердости закаленные (5000 МПа) и азотированные (7500 МПа) стали. Нагрев хромового покрытия уменьшает его твердость, причем до 250—300°C это снижение незначительно (рис. 27, а).

Прочность. Прочность покрытий характеризуется такими их показателями, как модуль упругости, предел прочности, сцепление с основой. Значения этих показателей для основных видов хромовых покрытий, установленные Н. Н. Давиденковым и Ф. Ф. Витманом по разрабатанной ими методике, приведены в табл. 11. Следует отметить, что хотя с увеличением толщины слоя прочность хромовых покрытий уменьшается, однако в практике хромирования это обычно не учитывается. При современ-

ных нормах нагрузки на трущиеся поверхности детали, покрытые для восстановления размеров слоями хрома большой толщины, работают надежно, если были соблюдены режимы подготовки и хромирования и применено шлифование покрытия.

Необходимо иметь в виду, что сопротивление хрома сосредоточенным большим нагрузкам в значительной мере определяется прочностью основного металла. На мягком основании, которое неспособно выдержать местные высокие давления, хромовое покрытие продавливается вместе с основным металлом. При достаточно прочном основном металле хромовое покрытие способно выдерживать значительные усилия, нормальные к его поверхности. Контактная прочность хромового покрытия на закаленной стали (воздействие на небольшом участке поверхности) при качательном движении составляет 1400 МПа. Прочность хромовых покрытий при касательных усилиях, сосредоточенных на небольших участках, сравнительно мала. Этим в большинстве случаев объясняются разрушения хромовых покрытий на трущихся поверхностях, если поверхность хрома неровная (наличие шишковатости, отклонения от правильной геометрической формы) или между трущимися поверхностями попадают

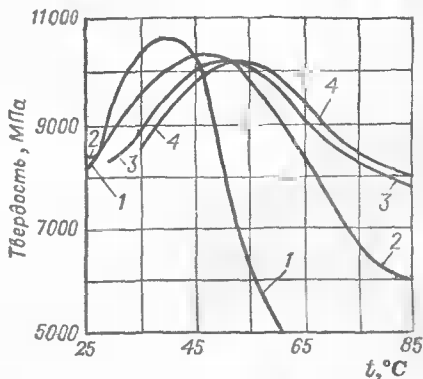


Рис. 26. Зависимость твердости осадков хрома от катодной плотности тока и температуры электролита при хромировании в универсальном электролите:

1 — $i_k = 10$ А/дм²; 2 — $i_k = 20$ А/дм²;
3 — $i_k = 50$ А/дм²; 4 — $i_k = 100$ А/дм²

твердые частицы, вызывающие задиры. Прочность сцепления хромового покрытия с основным металлом (сталью, чугуном) выше прочности слоя хрома, поэтому оказались неудачны все попытки оторвать хромовые покрытия от основного металла по границе раздела. При достаточно высоких усилиях

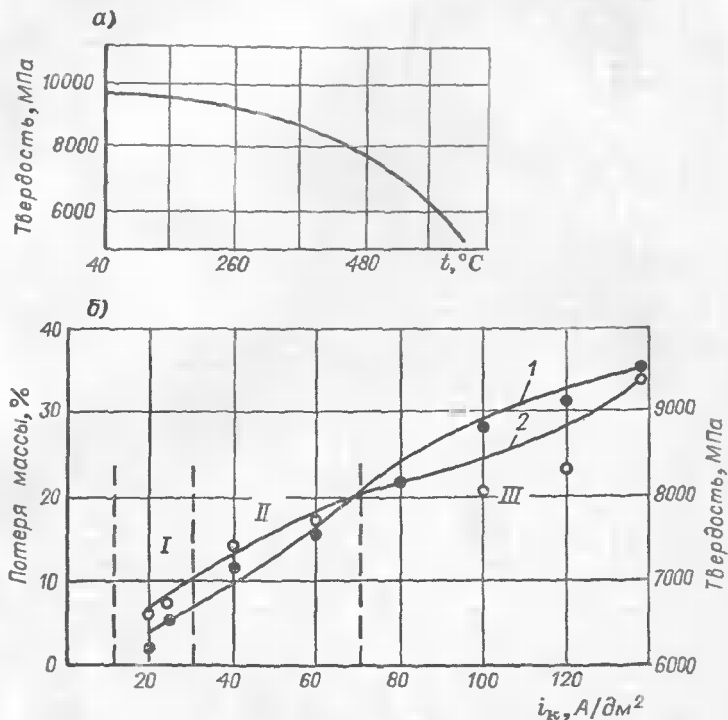


Рис. 27. Твердость и хрупкость хромовых покрытий: а — изменение твердости хромового покрытия в зависимости от температуры термообработки при выдержке 1 ч; б — влияние плотности тока на твердость (1) и хрупкость (2) покрытия (хрупкость по потере массы после деформации): I — молочный; II — блестящий; III — переходный

всегда происходит разрушение покрытия. Исследования, проведенные И. Я. Богорадом, показали, что после разрыва хромированного образца при прочном сцеплении покрытия происходит осыпание хрома в виде мелких частичек, а на микрофотографии поперечного шлифа шейки образца виден оставшийся тонкий слой хрома, прилегающий к основе.

Такое прочное сцепление обусловлено выполнением наиболее важной операции подготовки детали — анодного активирования в хромовом электролите. При растяжении стального образца, хромированного без анодного активирования, хром полностью отслаивается на границе с основным металлом. При шлифовании такое покрытие отслаивается.

При использовании электролитов, работающих при низких температурах, для улучшения сцепления покрытия с основой деталь предварительно электрохимически травят в смеси серной и фосфорной кислот или применяют гидродескоструйную обработку.

Пластичность. Пластичность электролитического хрома существенно зависит от режима хромирования. Хрупкие осадки хрома (блестящие и матовые) характерны для низких температур электролита и высоких плотностей тока. Более пластичные покрытия

Т а б л и ц а 11. Механические свойства электролитического хромового покрытия

Осадок	Режим		Толщина слоя, мм	Модуль нормаль- ной упру- гости $E \cdot 10^5$	Прочность	
	$i_k, \text{А/дм}^2$	$t, ^\circ\text{C}$			хромового покрытия на разрыв	хромово- слоя при нагружении перерезы- вающим усилием
Молочный	20	65	0,1	—	505	322
			0,3	—	276	268
			0,5	2,1	163	191
Блестя- щий	35	55	0,1	—	625	364
			0,3	—	398	184
			0,5	1,8	308	117
Матовый	40	45	0,1	—	600	423
			0,3	—	366	204
			0,5	1,7	257	117

Примечание. Прочность сцепления с основным металлом (сталью) при отрыве больше прочности сцепления на разрыв, а прочность сцепления хромового покрытия с основным металлом (сталью) при сдвиге равна 300 МПа при толщине слоя в 1 мм.

получаются при высоких температурах и низких плотностях тока (молочные осадки). Блестящие, матовые и молочные осадки хрома выдерживают без разрушения упругие деформации основного металла, стали. Но уже при небольшой пластической деформации блестящие и матовые осадки растрескиваются. Молочные осадки в этих условиях не разрушаются.

Пластичность хрома определяется обычно по массе разрушенного покрытия после осевой деформации хромированных цилиндрических образцов (диаметр 10 мм, длина 15 мм). Деформация производится на 1/3 длины образца. Разрушение покрытия характеризуется отношением потери массы покрытия после деформации в процентах к первоначальной массе хрома (чем больше эта потеря массы, тем покрытие более хрупко). Этот метод применим только в тех случаях, когда есть уверенность в надежном сцеплении

покрытия с основой. Влияние режима хромирования на хрупкость хромового покрытия приведено на рис. 27, б. При нагреве хромовых покрытий их хрупкость уменьшается и при 600°C делается одинаковой для разных видов покрытий.

Антифрикционные свойства. Большая твердость и особая гладкость хромовых покрытий обуславливают их хорошие антифрикционные свойства: низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Сравнительные данные о коэффициенте трения хромовых покрытий и других металлов, полученные В. И. Архаровым с сотрудниками, приведены в табл. 12. Коэффициент трения определялся по схеме, имитирующей работу вала в подшипнике. Коэффициент

Т а б л и ц а 12. Коэффициент трения хрома по чугуну, бронзе и баббиту

Образец	Коэффициент трения		
	Чугун	Бронза	Баббит
Вал, хромированный в малоконцентрированном электролите при $i_k = 40 \text{ А/дм}^2$ и $t = 50^\circ\text{C}$	0,06	0,05	0,08
Закаленная сталь	0,22	0,11	0,19

трения хрома по чугуну, бронзе и баббиту в два-три раза ниже, чем у закаленной стали. В условиях ограниченной подачи смазки коэффициент трения пористого хрома по чугуну в 1,6 раза меньше, чем для гладкого хрома.

Низкий коэффициент трения и высокая твердость хрома позволяют с успехом применять его для исключения задиров при трении вязких, склонных к схватыванию материалов (нержавеющих сталей, титановых сплавов и др.). Этими же свойствами определяется высокая износостойкость хромового покрытия, которая зависит от режима хромирования и условий работы трущихся пар (прирабатываемости, обеспеченности смазкой, давления и относительной скорости). При правильно выбранных условиях хромирования и эксплуатации хромированных деталей износостойкость стальных деталей после хромирования возрастает в три — пять раз.

В ряде работ приводятся различные значения температуры электролита и плотности тока, обеспечивающие оптимальную износостойкость хрома. Такое различие, по-видимому, связано с разными механизмами износа хрома при разных методах испытаний на износостойкость. Поэтому значения, полученные при каждом методе испытаний, должны рассматриваться как сравнительные, относящиеся только к данному методу. Эти значения большей частью нельзя непосредственно переносить на трущиеся пары с иными условиями трения.

При массовом хромировании однотипных деталей целесообразно уточнить режим их хромирования, обеспечивающий наибольшую износостойкость. Такое уточнение следует произвести путем эксплуатационных испытаний деталей, хромированных при разных режимах.

Износостойкость хромового покрытия связана с его твердостью сложной зависимостью, характеризующейся наличием максимума

(рис. 28). Максимальному значению износостойкости в данном случае отвечает твердость покрытия примерно 10 000 МПа. Показатель износостойкости $k_{изн}$ снижается как при меньших, так и при больших значениях твердости.

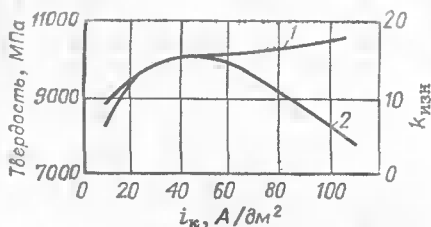


Рис. 28. Зависимость твердости (1) и износостойкости (2) хромовых покрытий от катодной плотности тока

Такая зависимость может быть объяснена тем, что при возрастании твердости хрома увеличивается прочность его зерен, но до максимума износостойкости она остается ниже прочности сцепления зерен между собой. Поэтому при износе происходит только истирание зерен без их выкрашивания. После достижения максимума

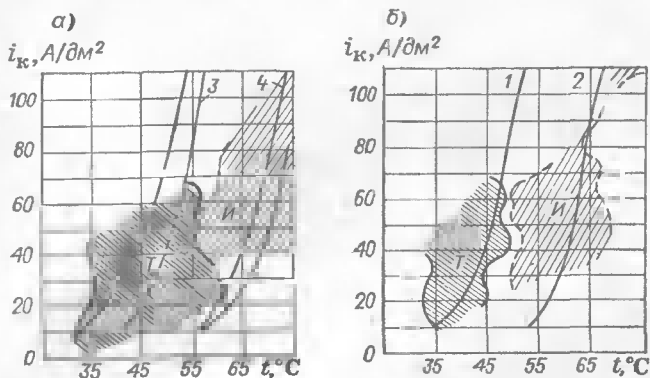


Рис. 29. Области хромовых покрытий высокой твердости (Т) и износостойкости (И): а — 150 г/л хромового ангидрида; б — 250 г/л хромового ангидрида (серная кислота — 1% к хромовому ангидриду)

1—4 — границы зоны блестящих покрытий

прочность зерен хромового слоя начинает превышать прочность их сцепления между собой и возникает выкрашивание отдельных зерен, обуславливающее повышение износа хрома. При таком механизме влияния твердости следует ожидать, что на оптимальную твердость должны оказывать влияние условия трения.

На рис. 29 приведены области режимов осаждения хрома высокой твердости и повышенной износостойкости. Эти данные указывают на некоторое преимущество малоконцентрированного

электролита по сравнению с универсальным в части размера зон высокой твердости и износостойкости.

Износостойкость хромовых покрытий в значительной степени зависит от их прирабатываемости. При недостаточно хороших условиях для приработки (местной шишковатости покрытия, неравномерной нагрузке на его поверхность и др.) возможны схватывания и задиры трущихся поверхностей. Для улучшения прирабатываемости, кроме устранения указанных недостатков, рекомендуют сопряженную с хромом деталь оксидировать или фосфатировать, а деталь, покрытую пористым хромом, электролитически покрывать тощим слоем олова.

Высокая износостойкость хромовых покрытий полностью реализуется при трении по стали и чугуну. Имеются данные, что в паре с алюминиевыми сплавами и алюминиевыми бронзами при недостатке смазки хромовые покрытия изнашиваются значительно больше, чем по стали и чугуну.

11. Влияние хромирования на механические свойства основного металла

В зависимости от рода нагрузки, вызывающей разрушение металла, различают механические характеристики, определяемые при растяжении образца до его разрыва (пределы прочности и текучести, относительные удлинение и сужение поперечного сечения) и его выносливость (время до разрушения) при циклически меняющейся нагрузке (предел усталости). Возможны два вида нагрузок, от которых зависит время до разрушения: нагрузки, при которых циклические деформации металла не выходят за пределы упругой деформации, и нагрузки, при максимальных значениях которых возможна обычно небольшая пластическая деформация образца. В первом случае образец разрушается после воздействия миллионов циклов нагрузки (многоцикловая усталость), во втором случае разрушение происходит после нескольких тысяч циклов (малоцикловая усталость).

Особенно важными для надежности современных машин являются показатели прочности при циклически меняющейся нагрузке. Наиболее значительное влияние хромирование оказывает именно на эти показатели.

Хромирование может оказывать воздействие на механические свойства основного металла по следующим причинам:

хромовое покрытие отличается исключительно высокой прочностью сцепления с основным металлом, поэтому хромированную деталь необходимо рассматривать как систему, свойства поверхности которой определяются свойствами хромового покрытия;

в хромовых покрытиях имеются значительные напряжения растяжения, распространяющиеся по поверхности хромированной детали;

твердые хромовые покрытия не выдерживают пластической деформации основного металла, растрескиваются и эти трещины являются концентраторами напряжения для основного металла;

в процессе электроосаждения хрома выделяется относительно большое количество водорода, который, проникая в основной металл, вызывает его охрупчивание.

Прочность и пластичность хромированной стали. Предел прочности стали, определяемый при статическом растяжении, практически не изменяется после хромирования. Основное изменение претерпе-

вают показатели пластичности: относительное удлинение и, особенно, относительное сужение поперечного сечения. Так, например, хромирование стали 30ХГСН2А (45—49 HRC) блестящим хромом при $i_k = 50 \text{ А/дм}^2$ и $t = 50^\circ\text{С}$ с толщиной слоя 0,1 мм дало следующие результаты: предел прочности без покрытия — 1836 МПа, хромированная — 1837 МПа; относительное удлинение без покрытия — 7,0 %, хромированная — 6,8 %; относительное сужение без покрытия — 50,6 %, хромированная — 32,3 %.

Усталостная многоцикловая прочность хромированной стали. Хромирование снижает усталостную прочность различных марок сталей, но особенно значительно это снижение у конструкционных сталей повышенной прочности (табл. 13 и рис. 30). В то время как у нехромированных сталей предел усталостной прочности примерно пропорционален пределу прочности стали, после хромирования эта зависимость исчезает и предел усталостной прочности хромированных сталей независимо от их прочности (в данном случае выше 600 МПа) имеет примерно постоянное значение, составляющее 280—370 МПа [22].

При наличии на деталях каких-либо концентраторов напряжения снижение усталостной прочности после хромирования может быть еще большим.

Т а б л и ц а 13. Влияние хромирования на усталостную прочность образцов из сталей разной прочности (хром нанесен при 50 А/дм^2 , слой 0,1 мм)

Марка стали	Предел прочности σ_b , МПа	Предел усталостной прочности образцов σ_{-1} , МПа	
		нехромированных	хромированных
20ХН3А (56—57 HRC)	2000—2050	870	320
30ХГСН2А (45—49 HRC)	1600—1800	780	360
30ХГСН2А (34—38 HRC)	1100—1300	640	320
30ХГСА (45—49 HRC)	1100—1300	560	350
65Г (41—43 HRC)	1400—1460	630	340
40ХМНА (34—35 HRC)	1050—1100	540	280

Влияние толщины хромового покрытия на снижение предела усталостной прочности недостаточно определено. Имеются сведения, что с увеличением толщины хрома снижается усталостная прочность [22] и в то же время по другим данным ее влияние незначительно [21].

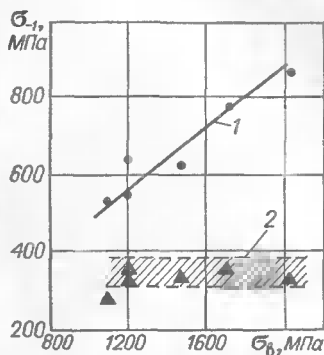


Рис. 30. Влияние прочности стали на предел усталости при катодной плотности тока 50 А/дм^2 температуре электролита 50°С и толщине слоя — 0,1 мм:
1 — нехромированная сталь,
2 — хромированная сталь

Повышение температуры электролита способствует уменьшению предела усталостной прочности стали. Так, для стали 30ХГСА хромированной при $i_k = 50 \text{ А/дм}^2$, предел усталостной прочности образцов, хромированных при 70°C , оказался в два раза ниже, чем хромированных при 30 и 50°C .

Выдержка хромированных образцов при $200\text{—}230^\circ\text{C}$ в течение 2 2,5 ч приводит к снижению предела усталостной прочности стали. Это видно из примера стали 30ХГСН2А (45—49 HRC. Ее предел усталостной прочности при испытаниях на изгиб с вращением составляет для нехромированной стали — 780 МПа, после хромирования — 380 МПа, после отпуска хромированных образцов при $200\text{—}220^\circ\text{C}$ 2,5 ч он равен 240 МПа. При двукратном отпуске, до и после хромирования, предел усталости повышался до 380 МПа. Отпуск при $500\text{—}600^\circ\text{C}$ (допустимый для менее прочных сталей) полностью восстанавливает предел усталостной прочности стали [6, 22]

Влияние скорости потока при возвратно-струйном хромировании на усталостную прочность стали марки 45 иллюстрируется следующими данными [21]

Скорость потока, м/с	0	0,4	0,8	1,2	1,8	2,4
Снижение предела усталости, %	22,8	15,5	8,8	5,3	6,1	5,3

Хромирование производилось в универсальном электролите при $i_k = 120 \text{ А/дм}^2$, $t = 60^\circ\text{C}$, слой хрома 0,1 мм и межэлектродное расстояние 10 мм

Своеобразное влияние на снижение усталостной прочности после возвратно-струйного хромирования оказала температура электролита. В пределах $50\text{—}60^\circ\text{C}$ она мало повлияла на предел усталостной прочности, его снижение составляло 2,5—5,3 %. Но при 65 и 70°C предел усталостной прочности значительно снизился (на 42,2 и 49,2 % соответственно)

Плотность тока в пределах $40\text{—}120 \text{ А/дм}^2$ практически мало влияла на снижение усталостной прочности (1,8—3,5 %).

Пористый хром, полученный из малокоцентрированной ванны ($t = 55^\circ\text{C}$, $i_k = 50 \text{ А/дм}^2$, толщина слоя 75 мкм, $i_a = 40 \text{ А/дм}^2$, $T_a = 7$ мин), практически не повлиял на предел усталостной прочности стали 35, предел прочности которой 586 МПа. Это, очевидно, связано с тем, что при анодной обработке покрытия, выполняемой для получения пористости, существенно уменьшаются растягивающие напряжения в покрытии. Кроме того, имеет значение увеличение количества трещин в покрытии, что снижает значение каждой из трещин как концентратора напряжений

При реверсивном токе на сталях низкой прочности хромирование значительно меньше снижает предел усталостной прочности по сравнению с хромированием на постоянном токе. Для высокопрочных сталей реверсирование тока заметно не влияет на предел усталостной прочности после хромирования. При хромировании в проточном электролите предел усталостной прочности предварительно упрочненной высокопрочной стали 30ХГСНА такой же, как при хромировании без потока

Влияние пластического поверхностного упрочнения стали перед хромированием видно из табл. 14 для распространенных высокопрочных сталей марок 30ХГСНА и 40ХГСНЗВА (С. И. Кимкина и Н. В. Анисимова). Образцы хромировались в универсальном

Таблица 14. Влияние хромирования и предварительного упрочнения на усталостную прочность сталей 30ХГСНА ($\sigma_{0.2}=1300$ МПа) и 40ХГСНЗВА ($\sigma_{0.2}=1400$ МПа)

Вид обработки стали	Предел выносливости сталей			
	30ХГСНА		40ХГСНЗВА	
	МПа	%	МПа	%
Шлифование	600	100	760	100
Шлифование + хромирование	310	52	350	46
Виброупрочнение	780	130	920	121
Виброупрочнение + хромирование	700	116	810	107
Обдувка корундовым песком + хромирование	670	112	710	93

электролите при $i_k=60 \cdot \text{А/дм}^2$, $t=55^\circ\text{С}$, толщина слоя 50—70 мкм. Перед и после хромирования образцы термически обрабатывались при температуре 200°С в течение 3 ч [34]

Эти данные убедительно показывают, что практически полное устранение отрицательного влияния хромирования на многоцикловую усталостную прочность сталей, в том числе высокопрочных, можно достичь упрочнением поверхности деталей перед хромированием методами поверхностной пластической деформации (обкаткой роликами, алмазным выглаживанием, гидропескоструйной обработкой, виброупрочнением и др.), она создает в поверхностном слое основы значительные сжимающие напряжения, которые затрудняют образование в хrome отдельных глубоких трещин под влиянием растягивающих напряжений. Предполагается, что именно такие трещины являются высокими концентраторами растягивающих напряжений, приводящих к снижению предела усталостной прочности стали после хромирования.

Малоцикловая усталостная прочность. Хромирование снижает также предел усталостной прочности сталей при малоцикловой нагрузке. Влияние прочности стали на снижение ее малоцикловой прочности после хромирования видно из данных табл. 15.

Таблица 15. Влияние хромирования на малоцикловую прочность стали [34]

Марка стали	Предел прочности, МПа	Среднее число циклов до разрушения		Процент от нехромированной стали, %
		Нехромированные	Хромированные слоем 50—70 мкм	
ВНС-2	1300	20 820	12 000	58,0
ВНС-5	1600	19 370	8 730	45,0
30ХГСНА	1750	37 000	6 950	18,5
40ХГСНЗВА	1850	100 000	7 205	7,2
ВКС210	2150	38 830	6 500	16,7

Таким образом, чем выше прочность стали, тем в большей степени хромирование уменьшает ее малоцикловую усталостную прочность. Толщина хромового покрытия и плотность тока не оказывают статистически значимого влияния на предел малоцикловой усталости. С понижением температуры электролита долговечность образцов возрастает [34].

В отличие от многоцикловой усталости отпуск хромированных образцов при 200°C в течение 2,5 ч после их шлифования повышает

Таблица 16. Влияние отпуска на усталостную прочность хромированных образцов из стали 30ХГСН2А [22]

Вид испытания	Предел усталостной прочности при изгибе с вращением	Малоцикловая усталость на 10^4 циклов
	МПа	
Покрытие без отпуска	380	500
Без покрытия	780	2080
Отпуск: после покрытия	240	1500
до и после покрытия	380	1600
трехкратный	390	2200

малоцикловую усталость сталей, а трехкратный отпуск (перед и после хромирования, после шлифования хрома) обеспечивает полное восстановление малоцикловой прочности стали 30ХГСН2А (45—49 HRC) независимо от режима хромирования (табл. 16).

Возможной причиной снижения многоцикловой усталостной прочности после отпуска стали при 200°C является резкое уменьшение объема покрытий (приблизительно на 16 %) в связи с полным переходом при этой температуре гексагонального хрома в кубический. В результате такого изменения объема при этой температуре образуются крупные трещины в покрытии, которые действуют как концентраторы напряжения.

При малоцикловых испытаниях нагрев до 200°C не снижает малоцикловую усталостную прочность стали. Это можно объяснить тем, что при относительно больших деформациях при малоцикловой усталости трещины в покрытии образуются уже при первых циклах нагрузки и нагрев до 200°C не увеличивает их количество. В то же время удаление из хромированного образца около 80 % водорода при таком нагреве несколько улучшает пластические свойства стали, что оказывает положительное влияние на малоцикловую прочность.

Поверхностное упрочнение высокопрочных сталей перед хромированием (накаткой роликами, алмазным выглаживанием) в значительной степени восстанавливают малоцикловую усталостную прочность стали до значений нехромированных образцов (рис. 31) [22].

В технологический процесс твердого хромирования высокопрочных сталей включаются оба вида обработки: предварительное поверхностное упрочнение стали и трехкратный отпуск. Эти операции можно применять и для деталей из сталей средней прочности, если изменение их свойств после хромирования (например, понижение предела усталости) может снизить надежность эксплуатации деталей.

Большая практика хромирования деталей, особенно в ремонтном производстве, показала, что детали из распространенных поделочных сталей, для которых основной нагрузкой является трение, можно хромировать по упрощенной технологии, приведенной в гл. III.

Наводороживание стали при хромировании. Выделяющийся при хромировании водород частично растворяется в стали. В результате этого возможно появление водородной хрупкости основного металла. Особенно чувствительны к наводороживанию стали с пределом прочности 800—1000 МПа и выше.

Насыщение водородом основного металла зависит от большого числа факторов: марки стали, степени ее загрязненности неметаллическими включениями, наличия и значений внутренних напряжений и наклепа, структуры, шероховатости поверхности и других.

Так, например, при хромировании через сталь марки У8 (диафрагма толщиной 0,3 мм) водорода проходит в три раза больше, чем через сталь марки 30ХГСНА. Увеличение содержания в низколегированной стали фосфора с 0,002 до 0,039 повышает содержание водорода в стали в два раза. Поглощение водорода разными структурными составляющими углеродистой стали изменяется в широких пределах и составляет, см³/100 г: мартенсит — 6,9; троостит — 15,9; сорбит — 46,5.

Особенно следует обратить внимание на большое влияние напряженного состояния стали на ее наводороживание. Низкоотпущенная сталь марки 30ХГСНА с мартенситно-трооститной структурой способна в 10—100 раз увеличить поглощение водорода под влиянием внешней деформации. Упругопластическая деформация такой стали повышает содержание водорода в ней в три раза. Предварительный отпуск стали перед хромированием уменьшает содержание водорода в покрытии с 10,1 до 6,75 см³/100 г [22].

Такое разнообразие влияния элементов основного металла, неравномерность распределения водорода в покрытии и в основе, особенности разных методик определения содержания водорода усложняют анализ многочисленных опубликованных данных о наводороживании стали при хромировании и определение закономерностей этого процесса.

Нет установившегося мнения о роли наводороживания во влиянии хромирования на механические свойства основного металла.

Основными показателями наводороживания являются общее содержание водорода в хромированной стали, определяемое методом вакуумной экстракции, и водородопроницаемость металла, опре-

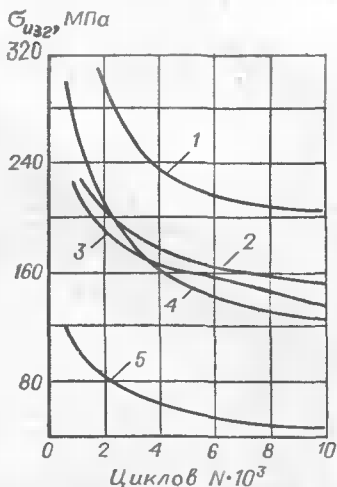


Рис. 31. Влияние методов поверхностного упрочнения перед хромированием на малоцикловую усталость образцов из стали 30ХГСН2А (45—49 HRC):

1 — нехромированные накатанные роликом; 2 — нехромированные шлифованные; 3 — хромированные накатанные роликами; 4 — хромированные накатанные шариками; 5 — хромированные шлифованные

деляемая по прониканию водорода через тонкую мембрану. Водородопроницаемость оценивается по плотности тока [35], затрачиваемого на окисление водорода, проникшего через мембрану. Далее приводятся некоторые фактические данные о характере влияния

основных факторов хромирования на эти показатели.

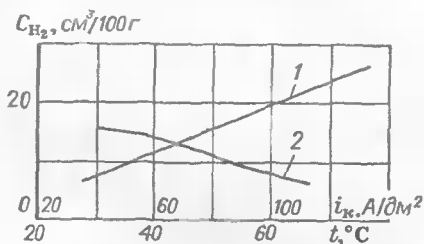


Рис. 32. Влияние катодной плотности тока (1) и температуры электролита (2) на количество поглощенного водорода

температуры приводит к его уменьшению. Имеются указания, что повышение температуры электролита, уменьшая общее содержание водорода в хромированной стали, способствует повышению его концентрации в основном металле [33].

Возможно, что по этой причине повышение температуры способствует повышению снижению усталостной прочности стали после хромирования.

В проточном электролите, содержащем 250 г/л хромового ангидрида и 5 г/л серной кислоты, увеличение плотности тока способствует росту содержания водорода в хромированном образце, а при увеличении температуры содержание водорода уменьшается, особенно при высоких температурах (рис. 32).

При хромировании в проточном электролите наблюдается некоторое уменьшение наводороживания по сравнению с хромированием в стационарном электролите. Так, например, по опре-

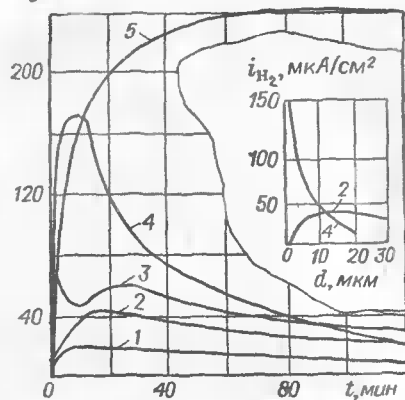


Рис. 33. Водородопроницаемость сталей У8-А (2, 4, 5) и 30ХГСА (1, 3) (i_{H_2} — показатель водородопроницаемости) 1, 2 — $i_k = 60$ мкА/см², $t = 55^\circ\text{C}$; 3, 4 — $i_k = 30$ мкА/см², $t = 70^\circ\text{C}$; 5 — $i_k = 5$ мкА/см², $t = 65^\circ\text{C}$

делению [15], при $i_k = 50$ А/дм², $t = 55^\circ\text{C}$ и скорости потока 200 см/с содержание водорода в хромированной стали уменьшается с 27 см³/100 г в стационарном электролите до 12 см³/100 г в проточном. При этом отмечается, что наибольшее снижение наводороживания наступает при 100 см/с.

На наводороживание при хромировании в проток оказывает влияние параметр шероховатости хромируемой поверхности (ГОСТ 2789—73): при гидропескоструйной обработке содержание водорода составляет $8,1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; при $Ra=40 \div 20$ — $9,4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ при $Ra=1,25 \div 0,63$ (шлифование) — $11,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; при $Ra=0,16 \div 0,08$ — $12,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

Известную характеристику водородопроницаемости в зависимости от режима хромирования и марки стали в универсальном электролите дает рис. 33 [35].

Максимум водородопроницаемости на сталн У8-А при блестящем осадке (кривая 2) в два раза больше, чем у стали 30ХГСНА (кривая 1), а при молочном осадке (кривая 4) больше в три раза. Усиленная водородопроницаемость при молочном осадке объясняется как увеличением коэффициента диффузии водорода при повышении температуры, так и особенностями структуры хрома, осажденного при повышенных температурах. Повышение плотности тока мало влияет на водородопроницаемость.

Особо следует отметить большую скорость водородопроницаемости в случае, когда выделение хрома не происходит (кривая 5), а выделяется только водород, т. е. отсутствует свойственное

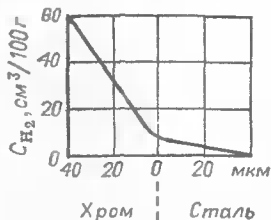


Рис. 34. Распределение поглощенного водорода в покрытии и в основном металле

Таблица 17. Влияние термической обработки на наводороживание хромированных образцов из стали марки 30ХГСНА

Вид обработки образцов	Объем выделившегося водорода, $\text{см}^3/100 \text{ г}$		Количество водорода, удаленного при 200°C , %
	При нагреве до 500°C	При нагреве до 200°C	
Шлифование, хромирование	10,1	8,0	80
Шлифование, отпуск, хромирование	6,73	4,6	69
Шлифование, отпуск, хромирование, отпуск	4,2	1,35	32
Шлифование, отпуск, хромирование, отпуск, шлифование, отпуск	2,01	0,85	42

Примечание. Образцы без покрытия содержат $0,85 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ водорода.

хромовому покрытию барьерное действие. Такое выделение водорода без хрома наблюдается при низких плотностях тока (см участок *bc* на рис. 2).

Выделенный при хромировании водород распределяется по сечению хромированной стали неравномерно. На примере стали 45 его

распределение показано на рис. 34 [15]. При нагреве хромированных деталей водород в значительной степени удаляется. Как видно из табл. 17, при 200°C и выдержке 3—4 ч удаляется около 80 % водорода, содержащегося в хромированной детали [22]. Имеются указания, что наибольшая эффективность термообработки достигается в случае, если она производится сразу после хромирования. При комнатной температуре хромированный образец также постепенно освобождается от водорода, но этот процесс идет медленно и полное удаление водорода не достигается. Представление о естественном старении хромированной стали 45 можно получить из следующих данных [15]:

Время старения, ч . . .	0,5	2,0	6,0	24	300
Содержание водорода после старения,					
см ³ /100 г	12,38	12,30	10,45	9,85	7,90

В настоящее время намечаются новые направления снижения наводороживания стали при хромировании: применение барьерных слоев и покрытие сплавами хрома.

Т а б л и ц а 18. Влияние содержания титана в хромовом покрытии на наводороживание [13]

Марки стали	Содержание Ti в покры- тии, %	Концентрация H ₂ , см ³ /100 г		i _к , А/дм ²
		в стали	в покрытии	
У8А	—	3,9	588	50
У8А	0,3	1,47	595	50
30ХГСНА	—	0,19	580	60
30ХГСНА	0,05	0,032	602	60
П р и м е ч а н и е. Температура электролита 55°C.				

Выраженными барьерными свойствами обладает хромовое покрытие, особенно блестящее. Это послужило основой для предложения использовать в качестве барьерного подслоя покрытие толщиной около 30 мкм, обезводороживанное термообработкой. Более подробно исследован никель в качестве барьерного слоя. Показано, что уже слой никеля толщиной 3 мкм уменьшает максимальный поток водорода через мембрану из железа Армко в пять раз [35]. Высокими барьерными свойствами обладает медь. В исследовательской работе Т. М. Овчинниковой было показано, что подслоя меди толщиной 9 мкм полностью предохраняет основной металл (сталь) от наводороживания при хромировании (слой 60 мкм). С этим подслоем механические свойства основного металла после хромирования не изменились.

Перспективным направлением по борьбе с наводороживанием является применение сплава хрома с титаном (табл. 18). Покрытие сплавом хрома с титаном по антифрикционным свойствам подобно хрому, но отличается от хрома резким уменьшением наводороживания стали.

О наводороживании покрытия и основного металла при нанесении сплава хрома с титаном дают представление результаты работ [13, 26].

При нанесении сплава хрома с титаном концентрации водорода в стали У8А уменьшается по сравнению с хромированием в 2,6 раза, а в стали марки 30ХГСНА — в 6 раз.

Уже первые исследования влияния этого покрытия на высокопрочные стали марок 30ХГСНА, ВЛ-1 и ВНС-5, проведенные в работе [23], дали обнадеживающие результаты. Образцы хромировались в электролитах с разным содержанием титана слоем сплава 0,1 мм при $i_k = 60 \text{ А/дм}^2$ и $t = 55^\circ\text{С}$. Образцы сталей имели твердость 46—47 НРС. В результате испытаний установлено, что пластичность (сужение поперечного сечения в шейке разорванного образца) у сталей 30ХГСНА и ВЛ-1 не изменилась после хромирования сплавом, в то же время, как при покрытии хромом относительное сужение уменьшилось с 52,9 до 7,6 %. У более чувствительной к наводороживанию стали ВНС-5 изменение относительного сужения при покрытии сплавом составляло от 64,6 до 21,5 %, а при хромировании — от 53,4 до 13,9 %. Испытания на усталостную прочность и малоцикловую усталость также показали преимущества покрытия сплавом хрома с титаном по сравнению с покрытием хромом.

Следует также отметить, что покрытие из сплава хрома и 0,5—0,7 % молибдена содержит в 1,5—2,0 раза меньше водорода, чем хромовое покрытие. При этом количество водорода в обоих покрытиях увеличивается с ростом плотности тока, оставаясь при этом в основном металле неизменным [43].

12. Химическая стойкость и защитная способность хромовых покрытий

Химическая стойкость. По значению своего стандартного потенциала ($-0,7 \text{ В}$) электролитический хром должен относиться к сравнительно активным электроотрицательным металлам. Однако фактически хромовое покрытие обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, нейтральных и щелочных растворах, органических кислотах, азотной кислоте, сероводороде и ряде агрессивных сред.

Это объясняется тем, что под действием кислорода или окислительных сред хром легко пассивируется и приобретает свойства благородных металлов. Образующаяся на поверхности хрома очень тонкая прозрачная окисная пленка отличается высокой плотностью и способностью быстро восстанавливаться после каких-либо повреждений.

Хром нестойк в растворах соляной кислоты из-за разрушения в ней окисной пленки, а также в узких зазорах под действием электролитов, которые в этих условиях могут нарушить пассивное состояние хрома.

Для эксплуатации в жестких атмосферных условиях не допускается контакт хрома с магнием, цинком, кадмием и сталью без специальной защиты от контактной коррозии.

Химическая стойкость хрома связана с режимом хромирования. Так, при действии 5 %-ной соляной кислоты, нагретой до 35°С , хром, осажденный при 90°С , растворяется в 100 раз быстрее осажденного при 50°С .

При нагреве цвета побежалости на хrome начинают появляться только при температуре около 400°С . При более высоких температурах окисная пленка на хrome утолщается, сохраняя свою плотность и высокую защитную способность. Это позволяет с успехом применить

хромирование для защиты стали от окисления при нагреве до 950—1000°C.

Защитная способность. Она определяется пористостью хромового покрытия и тем, что по отношению к защищаемому металлу стали и никелю он является катодом. Пористость хромового покрытия зависит от его структуры. Наибольшая она у блестящих покрытий и практически при слоях более 30 мкм, отсутствует у молочных осадков, обладающих в связи с этим хорошей защитной способностью. Значительное влияние на пористость оказывает шероховатость основного металла (рис. 35).

Разность потенциалов пары хром — сталь довольно велика (например, около 0,5 В в 3 %-ном растворе хлористого натрия) и, следовательно, основной металл под

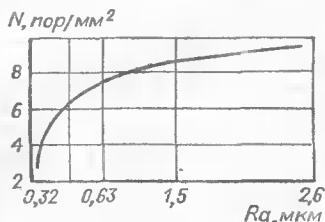


Рис. 35. Влияние шероховатости основного металла на пористость хромового покрытия [22]

порами в покрытии должен подвергаться интенсивной язвенной коррозии. Для защиты от коррозии трущихся поверхностей применяют двухслойное покрытие: молочный хром толщиной не менее 20 мкм и блестящий износостойкий хром необходимой толщины [20]. Существенное увеличение защитной способности хромовых покрытий достигается путем их пропитки уплотняющими составами.

Для защитно-декоративной отделки деталей обычно применяют покрытие, состоящее из наружного

слоя хрома толщины около 1 мкм и подслоя никеля или никеля и меди, толщина которого зависит от агрессивности условий эксплуатации. Для уменьшения коррозии никеля в порах хрома все более широко применяют микротрещиноватое хромовое покрытие, отличающееся очень большим числом мелких пор. При таком покрытии существенно возрастает поверхность анода в паре хром — никель и соответственно уменьшается анодная плотность тока и, следовательно, скорость коррозии в каждой поре. Таким образом, как это не парадоксально, резкое увеличение пористости в слое хрома толщиной менее 1 мкм существенно увеличивает его защитную способность. Некоторые эффективные приемы повышения защитной способности хромовых покрытий приведены в гл. IV.

13. Обозначение покрытий

Согласно ГОСТ 9.073—77 в обозначении покрытий указываются вид покрытия (пористое — «пор», молочное — «мол», твердое — «тв») и его минимальная толщина. Кроме того, при необходимости указывается дополнительная обработка покрытия (гидрофобизирующей жидкостью — «гфж», пропиткой — «прп»), толщина покрытия в микрометрах указывается в соответствии с выбором покрытия для данных условий эксплуатации деталей или по условиям их ремонта, при этом учитывается ряд толщин, приведенный в ГОСТ 9.073—77. Обозначение «Хтв60» означает твердое износостойкое хромовое покрытие толщиной 60 мкм; «Хпор 100» — хромовое износостойкое пористое покрытие толщиной 100 мкм; «Хмол 60» — хромовое молочное покрытие толщиной 60 мкм; «Хмол 24 — Хтв 60» — двухслойное комбиниро-

ванное защитное износостойкое покрытие молочным хромом толщиной 24 мкм и твердым хромом толщиной 60 мкм; «M15Ht21.X6» — хромовое покрытие толщиной, равное или менее 1 мкм, блестящее по подслою меди толщиной 15 мкм и трехслойного никеля общей толщиной 21 мкм.

III. ТЕХНОЛОГИЯ ХРОМИРОВАНИЯ

Технологический процесс хромирования, как и других гальванических процессов, охватывает группу операций подготовки деталей, операцию нанесения покрытия и обработку покрытых деталей. Особенностью технологического процесса износостойкого хромирования является применение комплекса мероприятий для повышения равномерности покрытия, что обусловлено сравнительно большой толщиной слоя и низкой рассеивающей способностью электролитов для хромирования. Специальные мероприятия предусматриваются для уменьшения отрицательного влияния хромирования на стали, особенно высокопрочные.

14. Подготовка деталей

Подготовка деталей перед хромированием состоит из следующих последовательно выполняемых операций: механическая обработка поверхности (шлифование или полирование); предварительное обезжиривание для удаления основной части органических загрязнений по общепринятой технологии путем промывки органическими растворителями или обработки в горячем растворе щелочи, или в моющих растворах; заделка отверстий и изоляция участков, не подлежащих хромированию; монтаж деталей на подвески; обезжиривание; промывка в воде; активирование; подвешивание деталей в ванну.

Операция активирования может выполняться в ряде случаев после подвешивания деталей в ванну.

При сравнительно небольшом объеме работ и мелкосерийном и индивидуальном характере производства подготовка деталей для износостойкого хромирования может выполняться по следующей упрощенной схеме; обезжиривание в горячем щелочном растворе, промывка и сушка; изоляция нехромируемой поверхности, укрепление контакта или монтаж в приспособлении — подвеске, укрепление защитных катодов и экранов; очистка хромируемой поверхности шкуркой до блеска, прогрев деталей в хромировочном электролите и анодное активирование в этом электролите.

Для деталей из высокопрочных сталей применяются дополнительно: термообработка деталей при 200—230°C в течение 2—3 ч для снятия внутренних напряжений, оставшихся после механической обработки, и поверхностное упрочнение одним из методов поверхностной пластической деформации (гидропескоструйной обработкой до удаления следов предыдущей механической обработки, алмазным выглаживанием, виброупрочнением и др.) для создания в поверхностном слое напряжений сжатия. Детали из высокопрочной стали нельзя травить в кислых растворах и подвергать электролитическому обезжириванию.

Поверхностное упрочнение применяется также для деталей, у которых по условиям эксплуатации не должна снижаться усталостная прочность после хромирования.

Механическая обработка. Поверхность деталей перед защитно-декоративным покрытием хромом должна быть тщательно отполирована обычно применяемыми в гальванических цехах методами. Это в равной степени касается подслоя меди и никеля. Все недостатки полировки последних будут особенно заметны на блестящем хромовом покрытии и их удаление после хромирования практически невозможно. Перед износостойким хромированием поверхность детали обычно подвергается шлифованию. Шероховатость поверхности должна соответствовать $Ra=0,16 \div 0,08$, $Ra=0,08 \div 0,04$, однако для деталей, которые после хромирования подлежат шлифованию, шероховатость поверхности может быть более высокой.

Размер новых деталей перед покрытием занижается на величину слоя покрытия, предназначенного для повышения износостойкости деталей. Если деталь после хромирования должна шлифоваться, то занижение должно также учитывать точность установки деталей на шлифовальном станке. Выступающие части детали, острые края, вершины углов, ребра рекомендуется закруглять. При шлифовании деталей не допускаются «прижоги». Рациональная технология шлифования стальных деталей перед хромированием приведена в работе [22].

Изоляция поверхности. Хромирование деталей с открытыми отверстиями часто приводит к тому, что участки поверхности вокруг отверстий остаются не покрытыми хромом. Избежать этого можно путем заполнения отверстий каким-либо стойким в электролите материалом — свинцом, текстолитом и другим — или тщательной изоляцией лаком поверхности глухих отверстий.

Участки детали, не подлежащие хромированию, а также подвески (за исключением мест контактов) должны быть изолированы. Особенно тщательно эта изоляция должна быть выполнена для хромирования в электролитах, содержащих кремнефториды. Изоляционные материалы, применяемые при износостойком хромировании, должны быть химически стойкими в обезжиривающих растворах и выдерживать не разрушаясь катодную поляризацию в хромовом электролите при температуре 50—70°C в течение длительного времени.

В прозрачные изоляционные лаки следует вводить какой-либо анилиновый краситель для облегчения контроля наличия изоляции на защищаемых поверхностях и исключения возможного загрязнения хромируемой поверхности неудаленными остатками лака.

Монтаж деталей на подвески. Подвески или приспособления предназначены для надежного подвода тока к хромируемой детали и должны способствовать равномерному распределению тока по хромируемой поверхности. Надежность контактов при хромировании имеет большое значение, так как через них должны проходить значительные токи. Поверхности контактов подвески с деталями и катодной шиной должны перед каждым хромированием тщательно очищаться шкуркой. Сечения токоведущих элементов должны быть достаточно большими, чтобы исключить их перегрев. Рекомендуется рассчитывать сечения исходя из плотности тока 0,5 А/мм² для стали и 10 А/мм² для меди.

Детали, у которых хромируется наружная поверхность, не должны экранировать друг друга. Детали с глубокими выемками, а также детали, у которых покрывается внутренняя поверхность, должны

хромироваться с дополнительными анодами, укрепленными на той же подвеске, на которой смонтирована деталь, изолированно от нее и соосно с хромируемой поверхностью. Все поверхности подвески (кроме контактных мест и защитных катодов) должны быть покрыты изоляцией для устранения утечки тока.

Обезжиривание. При декоративном хромировании по подслою производится электролитическое обезжиривание по обычной технологии. Детали, подлежащие износостойкому хромированию, также могут обезжириваться электролитически, кроме деталей из высокопрочных сталей, для которых допустимо только химическое обезжиривание. Если после предварительного обезжиривания или последующих операций деталь имеет значительные загрязнения, то она может обезжириваться повторно в горячем щелочном растворе или путем протирки хромируемой поверхности кашицей из венской извести. Если на хромируемой поверхности нет заметных загрязнений, то можно, не производя специального дополнительного обезжиривания, освежить хромируемую поверхность шкуркой непосредственно перед загрузкой деталей в ванну. Выбор способа подготовки поверхности связан с особенностями деталей, их монтажом на приспособлениях, наличием изоляции и дополнительных анодов.

Активирование. Перед хромированием стальные и чугунные детали подвергаются анодному активированию в хромовом электролите при температуре, соответствующей процессу хромирования. После анодного активирования промывка водой не производится, поэтому в ряде случаев износостойкого хромирования анодное активирование можно производить в хромировочной ванне после прогрева деталей, непосредственно перед хромированием. Включение тока производится рубильником — переключателем полюсов.

При анодном активировании в хромировочной ванне электролит загрязняется железом, однако, как показала практика, накопление железа происходит очень медленно, поскольку анодное активирование при длительном износостойком хромировании производится относительно редко. Анодное активирование в хромовом электролите является очень важной операцией, так как от нее зависит сцепление хромового покрытия с основным металлом. При этой операции хромируемая поверхность полностью очищается бурно выделяющимся кислородом от остатков органических загрязнений. Слабым протравливанием с нее удаляют тонкие окисные пленки и поверхностный слой металла с искаженной структурой, обеспечивая наилучшие условия для надежного сцепления хрома со сталью.

Активирование чугуна с высоким содержанием кремния рекомендуется проводить предварительно в 3—5 %-ном растворе плавиковой кислоты в течение 2—4 мин. После активирования деталь промывают водой и протирают кистью для удаления налета графита. Более надежное удаление пленки графита обеспечивается протиркой детали венской известью с последующей промывкой ее теплой водой и дополнительной протиркой кистью. Анодное активирование производится для стальных деталей при плотности тока 25—40 А/дм² в течение 30—90 с, для чугунных деталей при плотности тока 20—25 А/дм² и продолжительности 5—10 с. Применение для чугунов более высокой плотности тока и большей выдержки приводит к перетравливанию поверхности, что затрудняет выделение хрома и снижает прочность сцепления с основным металлом.

Никелированные изделия перед хромированием рекомендуется активировать в 3—5 %-ном растворе соляной кислоты. После этого

изделия промывают в холодной воде и затем хромируют. Изделия из меди и медных сплавов активируют в 5 %-ном растворе соляной или серной кислот. Для холодных электролитов тетрахроматного типа перед активированием необходима предварительная электрохимическая обработка в смеси 1:1 50 %-ных растворов серной и фосфорной кислот. Деталь является анодом. Плотность тока 60–90 А/дм², $t = 18 \div 25^\circ\text{C}$, продолжительность обработки 2,0–2,5 мин. В зависимости от марки стали режим уточняется опытным путем. Эта обработка необходима для повышения прочности сцепления покрытия с основой [28].

15. Хромирование

Хромируемые детали к началу электролиза должны быть прогреты до температуры электролита. Мелкие детали, загруженные в ванну в небольшом количестве, нагреваются быстро; большие массивные детали нагреваются медленно и охлаждают ванну. Стальные и чугунные детали нагреваются в хромовой ванне. Изделия из меди и медных сплавов прогревают в горячей воде. При хромировании рельефных деталей рекомендуется в начале электролиза произвести «толчок» тока, т. е. электролиз начинают при силе тока примерно вдвое больше, чем следует по расчету, а спустя 1–2 мин значение его постепенно снижают до расчетного. Благодаря толчку тока удается осадить хром на углубленных участках детали и облегчается начало выделения хрома на чугуне.

Перерывы подачи тока в процессе хромирования нежелательны, так как при повторном наращивании возможно отслаивание хрома. Если перерыв подачи тока все же произошел, то перед повторным хромированием изделия подвергаются анодному активированию в хромовом электролите в течение 20–40 с при плотности тока 25–30 А/дм² и только после этого продолжают хромирование. Осаждение хрома после перерыва подачи тока следует начинать с относительно низких катодных плотностей тока (но не ниже 20–25 А/дм²) и постепенно увеличивать их до установленного значения.

Продолжительность хромирования рассчитывается исходя из заданной толщины хрома и скорости его наращивания при выбранном режиме хромирования. Толщина слоя хрома для деталей, шлифуемых после хромирования, складывается из толщины рабочего слоя хрома (слой, повышающий износостойкость детали или пополняющий дефектный размер) и припуска на шлифовку. Припуск на шлифовку зависит от возможной точности установки детали на шлифовальный станок. Припуск и расчет его детально рассмотрены в работе [22]. Обычно он составляет 0,05–0,10 мм на сторону.

Скорость наращивания хрома определяется для участка с наименьшей плотностью тока. Чем неравномернее покрытие, тем меньше фактическая скорость осаждения хрома относительно рассчитанной по средней плотности тока поэтому улучшение равномерности распределения тока указанными выше приемами является важным резервом повышения производительности хромировочных ванн. Скорость осаждения хрома при равномерном покрытии может быть подсчитана по следующей формуле:

$$u = 0,047 i_k \eta,$$

где u — скорость наращивания хрома, мкм/ч; i_k — катодная плотность тока, А/дм²; η — выход хрома по току, %.

Продолжительность хромирования T , мин, определяется по табл. 19 или рассчитывается по формуле

$$T = 1275d / (i_k \eta),$$

где d — толщина слоя, мкм.

В табл. 19 приведена зависимость продолжительности хромирования от толщины слоя и плотности тока при выходах по току

Т а б л и ц а 19. Зависимость продолжительности хромирования от толщины слоя и катодной плотности тока

Толщина слоя, мкм	Продолжительность хромирования, мин, при плотности тока, А/дм ²								
	10	15	25	30	35	50	60	80	100
1	9,81	6,53	3,92	3,26	2,80	1,96	1,63	1,22	0,98
	7,30	4,87	2,92	2,43	2,08	1,46	1,22	0,90	0,73
2	19,6	13,1	7,85	6,54	5,60	3,92	4,26	2,45	1,96
	14,6	9,74	5,84	4,87	4,17	2,92	2,43	1,80	1,46
3	29,4	19,6	11,8	9,81	8,41	5,88	4,90	3,68	2,94
	21,9	14,61	8,76	7,30	6,25	4,38	3,65	2,70	2,19
4	39,2	26,1	15,7	13,1	11,2	7,85	6,55	4,91	3,92
	29,2	19,48	11,68	9,73	8,36	5,84	4,86	3,60	2,92
5	49,1	32,7	19,6	16,3	14,0	9,81	8,15	6,18	4,91
	36,5	24,35	14,60	12,16	10,41	7,30	6,08	4,50	3,65
6	58,9	39,2	23,5	19,6	16,8	11,8	9,8	7,35	5,89
	43,8	29,22	17,52	14,6	12,5	8,76	7,29	5,40	4,38
7	68,7	45,8	27,5	22,9	19,6	13,7	11,5	8,58	6,87
	51,1	34,09	20,44	17,03	14,58	10,22	8,51	6,30	5,11
8	78,5	52,3	31,4	26,2	22,4	15,7	13,1	9,81	7,85
	58,4	38,96	23,36	19,46	16,66	11,68	9,73	7,21	5,84
9	88,3	58,8	35,3	29,4	25,2	17,7	14,7	11,0	8,83
	65,7	43,85	26,28	21,9	18,75	13,14	10,94	8,12	6,57
10	98,1	65,4	39,2	32,7	28,0	19,6	16,4	12,3	9,81
	73,0	48,7	29,2	24,33	20,83	14,6	12,17	9,01	7,3
Примечание. В числителе выход по току составляет 13 %, в знаменателе — 17,5 %.									

13 и 17,5 %. Расчетный выход по току 13 % характерен для блестящих покрытий из универсальной ванны, а выход по току 17 % — для блестящего покрытия из саморегулирующейся горячей ванны и серебристо-матового покрытия малоконцентрированной и универсальной ванны.

Обычно продолжительность хромирования уточняется для каждого типа деталей практическим путем, что позволяет учесть потери тока на хромирование защитных катодов, на утечки через изоляцию, а также учесть неравномерность распределения покрытия на данных деталях. Плотность тока на катоде не всегда определяет производительность ванны. Действительно, при увеличенной плотности тока

процесс хромирования ускоряется, но соответственно этому уменьшается загрузка деталей в ванну, если при нормальной плотности тока источник питания загружен полностью

16. Обработка деталей после хромирования

После хромирования детали промываются в ванне с непроточной водой для улавливания электролита, затем в проточной холодной и горячей воде и сушат. В зависимости от требования к покрытию и основного металла детали после хромирования подвергаются механической и термической обработке.

Детали, которые нельзя хромировать в пределах допуска («в размер»), подвергают шлифованию. Эта операция помимо придания хромированной поверхности правильной формы и размеров должна рассматриваться как надежный контроль прочности сцепления покрытия с основой. Абразивное шлифование оказывает значительное механическое и термическое воздействие на поверхностный слой покрытия, в результате чего изменяется его микротвердость, пористость, шероховатость, напряженное состояние. Увеличение снимаемого припуска не влияет на шероховатость покрытия, но уменьшает его микротвердость и увеличивает пористость. Так, при увеличении снимаемого припуска от 0,01 до 0,15 мм микротвердость соответственно уменьшилась на 5 и 25 %, а пористость возросла от 2 до 200 пор/мм² [22]. Существенно влияет на качество покрытия интенсивность подачи охлаждающей жидкости. При недостатке ее подачи (менее 10 л/мин) шероховатость покрытия увеличивается примерно в 3 раза, микротвердость уменьшается на 11 %, пористость возрастает в 2,5 раза по сравнению с шлифованием при обильной подаче охлаждающей жидкости (30 л/мин).

Качество покрытия зависит также от характеристики абразивного круга и режима шлифования. Учитывая влияние всего комплекса факторов шлифования рекомендуется проводить круглое наружное шлифование хромовых покрытий при условиях, приведенных в табл. 20, используя круги из электрокорунда зернистостью 25—16 н твердостью СМ1—С1 на керамической связке, вращающиеся с окружной скоростью 30—35 м/с [22]. При обработке внутренних поверхностей с применением режимов наружного шлифования наблюдается меньшее изменение свойств покрытия, чем при наружном шлифовании. Закаленные детали после шлифования (перед и после хромирования) должны проходить магнитный контроль для выявления трещин.

Детали из высокопрочных сталей после хромирования подвергаются термообработке для обезводороживания. Детали загружаются в масляную ванну и выдерживаются при 200—230°C в течение 3 ч. Для этой цели применяется цилиндрическое масло 38 или 52. По окончании нагрева детали охлаждают на воздухе до 40—50°C и остатки вязкого цилиндрического масла удаляются промывкой веретенным маслом. После шлифования хрома детали снова термически обрабатывают в сушильном шкафу при 200—230°C в течение 3 ч. Такая обработка совместно с поверхностным упрочнением деталей перед хромированием устраняет отрицательное влияние хромирования на механические свойства высокопрочных сталей. В случае многократного хромирования деталей из высокопрочных сталей они также должны подвергаться трехкратной термообработке при каждом хромировании [34].

Устранение течи через поры хромового покрытия в гидравлических цилиндрах достигается алмазным выглаживанием хромового покрытия, при котором сквозные каналы в нем уплотняются и перекрываются. Согласно [22], выглаживание производится с силой 200—250 Н алмазным наконечником радиусом 1,5—2,0 мм при продольной подаче 0,04—0,06 мм/об и скорости вращения детали 10—100 м/мин с применением смазки (масло АМГ-10, веретенное 3, МС-8РК или эмульсол).

17. Контроль покрытий

Качество износостойких хромовых покрытий определяется по их внешнему виду, толщине слоя, прочности сцепления и у пористых покрытий, кроме того, по пористости или маслостойкости.

Покрытия на деталях, которые подлежат шлифованию, должны быть блестящими или иметь светло-серый с синеватым, или молочноматовым оттенком цвет. Поверхность — гладкая, допускается небольшая шишковатость покрытия в местах с повышенной плотностью тока. Наименьшая толщина слоя покрытия должна соответствовать указаниям в технологической документации. Наибольшая толщина обычно не нормируется, но для повышения технико-экономических показателей хромирования целесообразно добиться уменьшения неравномерности слоя, ограничив отношение максимальной толщины к минимальной от 1,1 до 1,3 в зависимости от конфигурации детали.

Чем более равномерны покрытия на деталях, тем выше должен оцениваться технический уровень хромирования.

Прочность сцепления покрытия определяется шлифованием его абразивным кругом. На всех участках, где сцепление покрытия нарушено, при шлифовании произойдет отслаивание покрытия.

К износостойкому покрытию, осажденному в размер без последующей шлифовки, предъявляются более высокие требования к качеству поверхности и равномерности толщины слоя. Поверхность должна быть гладкой на всех участках со степенью шероховатости, отвечающей условиям службы детали. Толщина хрома определяется значением занижения размеров детали перед хромированием.

Т а б л и ц а 20. Рекомендуемые режимы круглого наружного шлифования хромированных поверхностей

Шероховатость R_a , мкм	Подача		Окружная скорость детали, м/мин	Число зачистных ходов
	поперечная, мм/дв. ход	продольная, мм/об		
0,08—0,16	0,005—0,01	3—6	15—30	5—30
0,16—0,32	0,01—0,015	6—10	15—30	1—5
0,32—0,63	0,01—0,02	10—15	30—60	—
0,63—1,25	0,03—0,04	20—30	30—60	—
<p>П р и м е ч а н и е. При шлифовании хромированной закаленной стали (более 30 HRC) не следует применять режим для $R_a=0,63 \div 1,25$ мкм.</p>				

Размеры детали после хромирования должны быть в пределах установленного для нее допуска. Проверка качества сцепления покрытия производится путем осмотра хромированной поверхности — на ней не должно быть вздутий, отколов и иных внешних признаков плохого сцепления.

Внешний вид защитного хромового покрытия матовый, молочный; покрытие гладкое, без шишковатости и без каких-либо внешних признаков отслаивания. Минимальная толщина слоя должна соответствовать технологической документации. Учитывая, что свойства хромового покрытия существенно зависят от режима хромирования и недостаточно характеризуются внешним видом покрытия, целесообразно проводить пооперационный контроль, обратив особое внимание на операцию анодного активирования и режим хромирования (плотность тока и температуру электролита). Кроме того, для деталей из высокопрочных сталей надлежит проверять выполнение операций предварительного поверхностного упрочнения, термической обработки, предусмотренных технологическим процессом.

В цехе должна быть установлена такая периодичность анализа и корректирования ванн, чтобы при средней загрузке состав электролита соответствовал заданной рецептуре. Особенно важен при твердом хромировании контроль толщины хромового покрытия. Определение толщины слоя хрома рекомендуется производить приборами, основанными на магнитном или электромагнитном методе. Метод вихревых токов для хромовых покрытий не пригоден. При этом методе толщина покрытия оценивается по его сопротивлению, а у хромовых покрытий оно зависит от режима хромирования. Для контроля хромовых покрытий можно рекомендовать толщиномеры типов МИП-10, МТ-20Н, МТ-30Н, МТ-40НЦ, ЭМТ-2, ИТП-1, ЭТ-3М и другие, основанные на магнитном или электромагнитном принципах работы (табл. 21). Обычно погрешность при измерении составляет около

Таблица 21. Типы толщиномеров и их характеристики [30]

Тип толщиномера	Диапазон изме- рений, мкм	Масса, кг	Питание
МТ-20Н	0—16; 10—75; 60—280	6	Батарейное
МТ-30Н	0—100; 100— 10000	3	»
МТ-40НЦ (цифровой)	2—20; 20—200; 200—2000	6,5	200 В; 36 В, 50 Гц

10 %. Достоинством толщиномеров является возможность измерения толщины слоя в данной точке, что неосуществимо при определении толщины хрома на цилиндрических деталях по разности размеров до и после хромирования. Таким методом нельзя обнаружить одностороннее сошлифование хрома, при котором в одной точке толщина покрытия может быть значительно меньше, чем в другой.

По разности размеров до и после хромирования можно определить толщину покрытия на нешлифуемых после хромирования цилиндрических деталях, при одностороннем покрытии хромом и в отдельных случаях на шлифуемых деталях, если приняты специаль-

ные меры, обеспечивающие точную concentricность поверхностей детали до хромирования и после шлифования.

Пористость осадков хрома, как правило, определяется только у защитных и защитно-декоративных покрытий хромом.

Оценка пористости пористохромового покрытия в производственных условиях осуществляется макронсследованием поверхности контролируемой детали и сравнением с эталонными образцами, пористость покрытия которых заранее определяется металлографическим методом и планиметрированием. При этом на микрофотографиях устанавливают размеры пор или ширину и длину каналов, а затем вычисляют занимаемую ими площадь и выражают пористость в процентах от общей площади контролируемого участка. Для этой операции удобно использовать метод отпечатков пор на фотобумаге по способу, приведенному в работе [6].

Рекомендуется также контролировать пористое покрытие по его маслосемкости. Это определение производится путем измерения времени, необходимого для впитывания пористым хромом стандартной капли керосина. Капля наносится пипеткой с диаметром отверстия 0,8 мм, отверстие находится на расстоянии 10 мм от контролируемой горизонтально расположенной поверхности. Время определяется с момента касания капли хрома до ее полного исчезновения. Это время непосредственно связано с количеством пор, которые, в свою очередь, функционально связаны с количеством электричества, прошедшего через электролит при анодной обработке хрома [6], рис. 36.

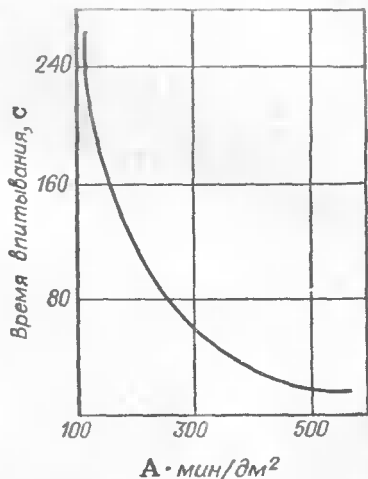


Рис. 36. Зависимость времени впитывания капли керосина в пористый хром от количества тока при анодной обработке

18. Основные дефекты хромовых покрытий

Получение доброкачественного хромового покрытия зависит от правильности выполнения подготовки поверхности перед покрытием, расположения деталей и анодов в ванне, соблюдения режима электролиза и сохранения в процессе электролиза заданного состава электролита. Возможные виды дефектов хромовых покрытий при нарушении этих требований и способы их устранения приведены в табл. 22.

19. Удаление покрытия

При выборе способа удаления недоброкачественного хромового покрытия необходимо считаться с природой основного металла детали. Хромированные детали, изготовленные из стали и сплава

Т а б л и ц а 22. Основные дефекты хромоых покрытий и способы их устранения

Вид дефекта	Причина возникновения	Способ устранения дефекта
Отслаивание покрытия от основного металла	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие анодной активации или нарушение ее режима 2. Плохая химическая подготовка детали перед хромированием 3. Деталь перед хромированием недостаточно прогревалась в электролите 4. Резко изменилась температура ванны во время электролиза (добавка холодной воды в электролит) или скачком резко возросла плотность тока 5. Перерыв тока во время хромирования 6. Наличие остатков покрытия от предыдущего хромирования 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проверить режим активации 2. Усилить контроль за выполнением этой операции 3. Увеличить время прогрева детали 4. Температуру электролита и плотность тока поддерживать на постоянном уровне 5. Устранить дефекты в контактах сети постоянного тока 6. Полностью удалить покрытие перед хромированием
Отслаивание покрытия с подслоем никеля	<ol style="list-style-type: none"> 1. Плохая подготовка детали перед никелированием 2. Нарушение кислотности электролита для никелирования 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Усилить контроль за операциями обезжиривания и активацией деталей перед никелированием 2. Откорректировать pH электролита
Отсутствие покрытия на отдельных участках хромируемой поверхности	<ol style="list-style-type: none"> 1. На углубленных участках из-за недостаточной для данного рельефа детали кроющей способности электролита 2. На краях отверстий из-за отвлечения тока на неизолированные внутренние поверхности отверстия 3. На деталях из чугуна из-за перетравливания при химической подготовке или при анодной активации 4. На никелевом подслое из-за пассивирования никеля 5. Мала плотность тока или чрезмерно высока температура 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дать толчок тока перед хромированием; применить дополнительный анод 2. Закрывать отверстия свинцовыми или изолирующими пробками 3. Дать толчок тока при включении 4. Произвести активацию никеля 5. Установить нормальный режим

Вид дефекта	Причина возникновения	Способ устранения дефекта
Серое покрытие	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокое содержание в электролите трехвалентного хрома 2. Значительное загрязнение электролита железом или медью 3. Низкая температура электролита или при дефектном покрытии на выступающих частях чрезмерно высокая плотность тока 4. Наличие в электролите продуктов разрушения недостаточно стойкой изоляции (целлулоид и др.); покрытие с сыпью 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проработать электролит током при возможно большей поверхности анодов 2. Полностью или частично сменить электролит 3. Отрегулировать температуру электролита; на выступающих частях детали установить экраны 4. Проработать электролит током при возможно большей поверхности анодов и высокой температуре электролита
Низкая скорость осаждения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Плохой контакт детали с приспособлением 2. Завышенная температура электролита; существенно заниженное или завышенное содержание серной кислоты; ошибка в расчете силы тока 3. Неправильное расположение анодов или плохая очистка некоторых анодов 4. Частичное экранирование детали случайным экраном 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Устранить неисправность контакта 2. Уточнить электрический и температурный режим ванны; откорректировать электролит 3. Очистить аноды и соответственно расположить их по отношению к детали 4. Устранить экран
На поверхности детали имеется крупный пitting в хромовом покрытии	<ol style="list-style-type: none"> 1. Задержка пузырьков водорода на нижней поверхности детали 2. Наличие в основном металле значительных неметаллических включений и пористости 3. Наличие в электролите взвешенных частиц 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Периодически поворачивать деталь или хромировать в вертикальном положении 2. Дефекты металла исключают возможность его хромирования 3. Очистить электролит декантацией
Высокое напряжение на ванне	<ol style="list-style-type: none"> 1. Покрытие поверхности анода слоем хромо-вокислого свинца, имеющего высокое сопротивление 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Очистить анод от налета

Вид дефекта	Причина возникновения	Способ устранения дефекта
Высокое напряжение на ванне	2. Завышенное содержание в электролите трехвалентного хрома и понижение содержания хромового ангидрида 3. Плохие контакты анодов с анодными шинами и приспособлений с катодной шиной 4. Недостаток серной кислоты в электролите	2. Откорректировать электролит 3. Исправить контакты 4. Откорректировать ванну по результатам анализа
Молочный хром по всей поверхности или на участках с пониженной плотностью тока	1. Недостаточная плотность тока или завышенная температура 2. Понижение концентрации сернокислого стронция и кремний-фторида калия в саморегулирующемся электролите	1. Откорректировать режим хромирования в соответствии с интервалом блестящих осадков данного электролита 2. Откорректировать электролит по результатам анализа

на медной основе, обрабатывают при комнатной температуре в ингибированной соляной кислоте, разбавленной 1:1.

Детали, наводороживание которых не допускается (например, детали из высокопрочных сталей, чугунные поршневые кольца), нельзя дехромировать в соляной кислоте. В этом случае применяют анодное растворение хрома в ванне с 15—20 %-ным раствором едкого натра при комнатной температуре и анодной плотности тока 10—15 А/дм². Катодами служат стальные пластины. В растворе не допускается присутствие ионов хлора, способствующих растворению основного металла детали. Удаление хрома с алюминиевых деталей можно производить путем анодного растворения покрытия в хромовом электролите.

20. Приготовление и корректирование электролита

Исходные материалы. Для основных хромовых электролитов применяются: хромовый ангидрид (ГОСТ 2548—77), кислота серная (ГОСТ 4204—77), натрий двуххромовокислый (ГОСТ 4237—76), препарат «хромин» (ТУП-59—67), стронций сернокислый (МРТУ 6-09-24059—67), калий кремнефтористый (МРТУ 6-09-4822—67).

Приготовление сульфатного электролита. Для приготовления сульфатного электролита рассчитанное количество хромового ан-

гидрида загружают в ванну и растворяют в воде, подогретой до 60—80°C. При этом можно использовать мягкую водопроводную воду. После растворения хромового ангидрида добавляют в него 3/4 рассчитанного количества серной кислоты, разливая ее тонкой струей по всей поверхности электролита. Перемешанный электролит анализируют и, установив действительное содержание хромового ангидрида и серной кислоты, подсчитывают и дополнительно вводят недостающее количество компонентов.

Состав хромовокислых электролитов в процессе электролиза непрерывно изменяется. Поддержание постоянной концентрации составных частей осуществляется на основе периодических их анализов, частота которых должна соответствовать загрузке ванны. Количество добавляемого в ванну хромового ангидрида определяется плотностью электролита (рис. 37) или по результатам анализа. При высоком содержании серной кислоты в электролите избыток ее необходимо удалить. Осаждение серной кислоты производят введением в разогретый до 50—60°C электролит углекислого бария из расчета 2 г на 1 г удаляемой серной кислоты. Электролит перемешивают, а затем отстаивают в течение суток. Образовавшийся сернокислый барий оседает на дно ванны. Приготовление и корректирование других электролитов производится аналогично в соответствии с их составом. Возможные особенности приготовления разных по составу электролитов должны учитываться по нормативно-технической документации.

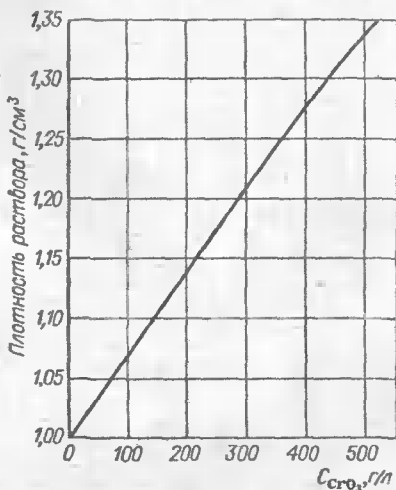


Рис. 37. Зависимость концентрации хромового ангидрида от плотности электролита при 15°C

21. Ускоренный контроль электролита

Методы химического анализа хромовых электролитов широко освещены в литературе [19]. Представляют интерес некоторые ускоренные методы контроля электролита, осуществимые непосредственно в цеховых условиях. Концентрация хромового ангидрида может определяться с помощью ареометра по плотности электролита (см. рис. 37). Ускоренное определение иона SO_4^{2-} может производиться двумя способами: с помощью сульфометра и хромированием рельефного катода. Сульфометр основан на зависимости величины скачка плотности тока на катодной поляризационной кривой перед выделением хрома от содержания в электролите серной кислоты.

Хромированием рельефного катода определяются интервал блестящих осадков в исследуемом электролите, вид осадка, степень

покрывания рельефа и вид поверхности с наименьшей плотностью тока, т. е. характеристики, зависящие от содержания серной кислоты.

Полированная латунная пластинка шириной 50—60 мм и длиной 100—150 мм изгибается вдоль на угол 60° и хромируется в контролируемой ванне в течение 20—30 мин при такой силе тока, чтобы

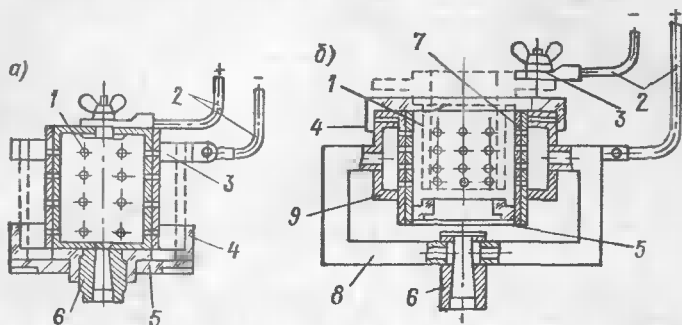


Рис. 38. Анодно-струйные устройства для хромирования внутренних (а) и наружных (б) поверхностей:

1 — полый цилиндрический анод; 2 — гибкий кабель; 3 — хомут для подвода тока к детали; 4 — катодно-упорный держатель; 5 — диафрагма, регулирующая расход электролита; 6 — конусная насадка для впуска электролита; 7 — круглое или щелевое отверстие в аноде; 8 — трубопровод, подводящий электролит; 9 — камера для электролита

в местах наибольшей плотности тока осадок был бы подгоревшим. При недостатке серной кислоты места с низкой плотностью тока покрываются коричневым налетом, а хром в местах с большой плотностью тока имеет типичный подгар в виде сыпи из отдельных небольших пятен (0,5—2,0 мм) с шероховатой поверхностью. При избыточном содержании серной кислоты кроющая способность электролита резко уменьшается и непокрытые хромом участки в глубине уголка имеют вид чистой травленной латуни.

Применяя уголки стандартных размеров и заготовив заранее их эталонный набор, соответствующий разному содержанию серной кислоты, можно ориентировочно судить о содержании серной кислоты путем сопоставления пробного уголка с набором эталонов. Хромирование пробного уголка необходимо производить в ванне, содержащей количество хромового ангидрида, соответствующее принятому составу ванны. Кроме определения серной кислоты при помощи уголка можно быстро и наглядно сопоставлять работу разных хромировочных электролитов по их кроющей способности и интервалу блестящих осадков.

22. Основное оборудование

Ванна хромирования, современные конструкции и типоразмеры хромировочных и вспомогательных ванн разработаны Тамбовским ЦКБ гальванических покрытий [12, 38]

С учетом высокой стойкости в сульфатном электролите низкоуглеродистой стали был предложен метод футеровки ванны лис-

товым стеклом, армированным проволоочной сеткой¹. Листы стекла стыкуются без уплотнения зазоров, и электролит заполняет пространство между стеклом и стенками ванны. Стекло изолирует стенки и дно ванны от анодов и катодов, чтобы исключить возможность анодной поляризации стали, так как при анодной поляризации сталь хоть и медленно, но разрушается в электролите. При такой футеровке устраняется потребность в свинце для обкладки ванн, резко возрастает теплопередача через стенки ванны и облегчаются меры для повышения равномерности покрытия, так как исключается влияние стенок и дна ванны на прохождение тока между анодом и катодом.

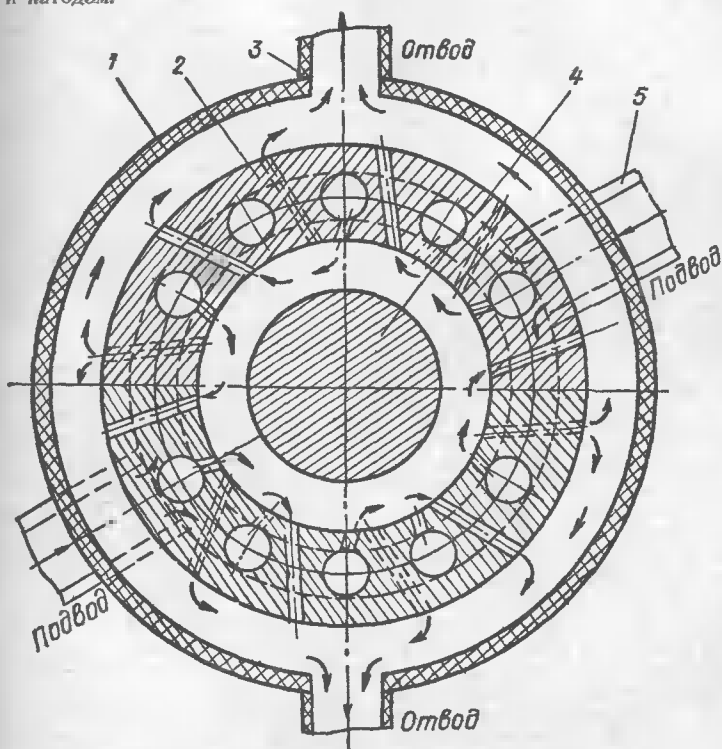


Рис. 39. Принципиальная схема электролитической ячейки для возвратно-струйного хромирования:

1 — корпус; 2 — анод; 3 — отводящий трубопровод; 4 — шейка хромлируемого вала; 5 — подводящий трубопровод; стрелками показан поток электролита

Длительное производственное применение футеровки ванн стеклом показало ее достаточную надежность и отсутствие чрезмерного накопления в ванне железа. Через 1—1,5 года круглосуточной

¹ А. с. 120720 (СССР).

эксплуатации ванны требовался только небольшой ремонт в виде подварки местных разрушений на сварных швах.

Анодно-струйное хромирование. Электроосаждение хрома при помощи анодно-струйного устройства осуществляется на специальных установках. Анодно-струйные устройства (рис. 38) имеют полые цилиндрические аноды с отверстиями, расширяющимися в сторону катода. Изготавливают аноды из коррозионно-стойкой стали. Рабочая поверхность их покрыта слоем сплава $Pb - Sb$ (при хромировании в сульфатном электролите) или сплавом $Pb - Sn$ (при хромировании в сульфатно-кремне-фторидном электролите). Сверху аноды герметично закрыты.

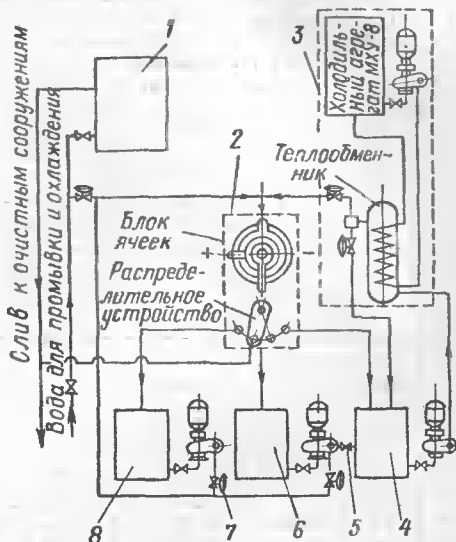
Применение анодно-струйного способа позволяет автоматизировать процесс хромирования и значительно повысить его производительность за счет более высокого выхода по току и применения высоких плотностей тока. При этом повышается равномерность отложения хромового покрытия по толщине слоя, создаются условия для получения осадков хрома заданной толщины. Установки для анодно-струйного хромирования могут быть созданы на несколько одновременно работающих ячеек. Вариантом анодно-струйной установки является анод, который не только подает электролит к хромируемой поверхности, но и равномерно отводит его из рабочего объема через ряд сливных отверстий на поверхности анода. Этим достигается большая равномерность омыwania электролитом хромируемой поверхности, способствующая более равномерному осаждению покрытия, особенно при значительных плотностях тока. Этот вариант получил название возвратно-струйного хромирования [21]. Схема такого анода для хромирования коленчатого вала приведена на рис. 39. Ячейка состоит из двух половин, охватывающих шейку коленчатого вала. В корпусе установлен анод. Электролит подается через трубу в кольцевую канавку через осевые каналы — отверстия и поступает в рабочую зону. Удаляется электролит через систему отверстий и трубу отвода. Весь агрегат для возвратно-струйного хромирования, использующего холодный электролит, состоит из следующих узлов (рис. 40): электролитическая ячейка с анодом, монтируемая на хромируемой детали, емкостей для электролита, анодного травления и улавливания электролита, холодильный агрегат с теплообменным аппаратом, выпрямитель и система трубопроводов с регулирующими клапанами. Ввиду особой важности поддержания постоянного уровня электролита и температуры электролита в заданных узких пределах рекомендуется оснастить ванну хромирования устройством для автоматического регулирования уровня электролита и температуры [12].

Источники питания. Питание хромировочных ванн производится от генераторов постоянного тока типа АНД или, более распространено, от выпрямителей с незначительной пульсацией выпрямленного тока. К ним относятся кремниевые выпрямители типов ВАКР (допускающие реверсирование тока) и ВАК. Некоторые данные о распространенных выпрямителях приведены в табл. 23. Подробные технические характеристики выпрямителей и другого электрооборудования хромировочных ванн приводятся в работе [3]. Для реверсирования тока на ряде заводов применяют установку САУ — ХРОМ, позволяющую в широких пределах изменять параметры при питании ванн от генераторов типа НД и выпрямителей типа ВАКР. Помышленностью изготавливаются и другие типы устройств для реверсирования: БРТ, БРП и другие [12].

Питание ванн производится, как правило, индивидуально — каждая ванна от своего выпрямителя. Для индивидуального и

Рис. 40. Принципиальная схема установки для возвратно-струйного хромирования с холодным электролитом:

1 — выпрямительный агрегат; 2 — агрегат гальванообработки; 3 — система стабилизации температуры хромировочного электролита; 4 — емкость для хромировочного электролита; 5 — краны; 6 — емкость для раствора улавливания; 7 — дистанционно управляемые краны; 8 — емкость для электролита анодного травления



мелкосерийного производства с разнообразным видом хромируемых деталей рекомендуется схема питания ванны, приведенная на рис. 41.

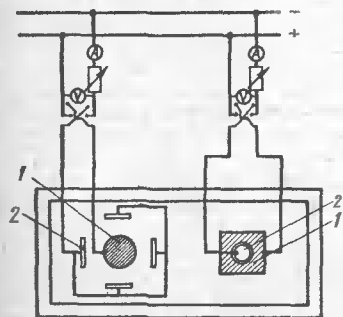


Рис. 41. Схема индивидуального питания током при хромировании разных деталей в одной ванне:

1 — деталь; 2 — анод

Эта схема позволяет полностью загрузить большую ванну разными деталями за счет индивидуального регулирования тока каждой детали. Можно, например, одновременно хромировать наружную поверхность с общими анодами и внутреннюю поверхность с дополнительным анодом¹.

В схеме питания ванны следует предусмотреть включение амперметра в провод, подводящий ток к детали, до рубильника —

¹ А. с. 42774 (СССР).

переключателя полюсов ванны. Такое включение амперметра позволит избежать брака в случае утечки тока через ванну и позволяет контролировать ток анодного активирования.

Таблица 23. Техническая характеристика некоторых кремниевых выпрямителей

Тип выпрямителя	Выпрямленное напряжение, В	Выпрямленный ток, А
ВАКР-100-12ХЛ4	6—12 2—6	10—100
ВАКР-320-18ХЛ4	9—18 2—9	32—320
ВАКР-630-12ХЛ4	6—12 2—6	63—630
ВАКР-1600-24ХЛ4	12—24 3—12	160—1600
ВАКР-3200-12ХЛ4	6—12 2—6	320—3200
ВАКР-6300-12У4	6—12 3—6	630—6300
Примечание. Диапазон выдержки времени полярности, с: прямой 1—240, обратной — 0,1—60.		

IV. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ХРОМИРОВАНИЯ

Высокая химическая стойкость хромовых покрытий, значительная твердость и износостойкость, возможность нанесения толстых прочно сцепленных с основой покрытий определяют области высокоэффективного применения электролитического хромирования. Они охватывают отделку деталей (защитно-декоративное хромирование), защиту от коррозии (защитное хромирование), повышение износостойкости трущихся деталей и восстановление размеров изношенных поверхностей (твердое хромирование).

Защитно-декоративное хромирование является одним из наиболее распространенных способов отделки металлопокрытиями изделий, эксплуатирующихся в атмосферных условиях (например, автомобилей).

Защитное хромирование применяют для повышения жаростойкости деталей, предохранения их от цементации, защиту от коррозии в некоторых агрессивных средах (в том числе трущихся деталей).

Твердое хромирование широко применяется для повышения срока службы мерительного и режущего инструмента, штампов и пресс-форм, особенно для обработки неметаллических материалов (пластмассы, стекла, резины и др.), для увеличения износостойкости деталей двигателей (поршневых колец, цилиндров, поршневых пальцев и др.) и других машин.

Особое значение имеет широкое применение твердого хромирования для восстановления изношенных деталей в ремонтном производстве и восстановление деталей, забракованных из-за заниженных при обработке размеров. Выбор технологии хромирования деталей должен основываться на специфике их конструкции и требованиях условий эксплуатации. В данной главе приводятся примеры особенностей производственной технологии и производственного применения хромирования некоторых распространенных типов деталей.

23. Защитно-декоративные покрытия

При защитно-декоративном хромировании используется высокая коррозионная стойкость хрома в атмосферных условиях, даже самых тяжелых. Однако так как защитная способность блестящих хромовых покрытий невелика, защитно-декоративное хромирование выполняют с применением надежных защитных подслоев меди и никеля, а тонкий слой хрома (около 1 мкм) наносят на подслои для защиты его от окисления. Такое комбинированное покрытие сохраняет блестящую поверхность в течение длительного времени. Применительно к разным видам изделий толщины покрытий приводятся в нормативно-технической документации.

В табл. 24 приводятся примерные значения толщин подслоя по данным работы [37].

Т а б л и ц а 24. Примерные толщины многослойных защитно-декоративных хромовых покрытий, мкм

Материал детали	Металл подслоя	Условия эксплуатации			
		легкие	умеренные	тяжелые	очень тяжелые
Сталь	Медь	10	20	15	20
	Никель	5	10	25	30
Медь и медные сплавы	Никель	3	6	12	—
Примечание. Толщина слоя хрома — 0,3 мкм.					

В настоящее время широкое распространение получает защитно-декоративное покрытие, подслоем которого является система никелевых покрытий: «триникель» и «силникель». Подслои «триникель» состоит из слоя никеля полублестящего, тонкого промежуточного

слоя никеля, содержащего серу, и наружного слоя блестящего никеля. Блестящее хромовое покрытие толщиной 0,25—1 мкм наносится на блестящий никель. Промежуточный слой является анодом по отношению к соседним слоям никеля и при проникновении к нему коррозионной среды он подвергается разрушению, защищая другие слои. Важным усовершенствованием в этих системах является применение хромового покрытия толщиной около 1 мкм, имеющее большое количество пор или микротрещин. Такое хромовое покрытие обладает значительно большим защитным действием по отношению к подслою, чем покрытие блестящим хромом с обычной сравнительно небольшой трещиноватостью.

Высокая микропористость хромового покрытия обычно достигается нанесением под хром тонкого слоя композиционного никеля, содержащего частицы каолина в количестве 10^6 — 10^8 частиц на 1 см^2 . В местах выхода частиц каолина на поверхность в хромовом слое образуется очень развитая, но незаметная для глаза пористость. Защитное действие хрома толщиной 0,25 мкм улучшается уже при 5000—10 000 пор/ см^2 . Нанлучшая защитная способность хрома достигается при 200 000—400 000 пор/ см^2 . При такой концентрации пор внешний вид блестящего хромового покрытия не изменяется.

Композитный никель оптимального состава «силникель» может быть получен из следующего электролита разработанного Институтом химии и химической технологии АН ЛитССР, г/л: сериокислый никель — 260—280; хлористый никель — 40—60; борная кислота — 30—35; сахарин — 0,7—1,2; 1,4 бутандиол — 0,2—0,3; каолия «Экстра ОПС» — 0,3—2,0. Режим работы: $\text{pH} = 3,0 \div 3,5$; $i_k = 4 \div 5 \text{ А/дм}^2$; $t = 50 \div 60^\circ\text{C}$; слой — 3 мкм, перемешивание. В каолине не менее 75 % частиц имеют размер меньше 1 мкм.

Потенциал «силникеля» на 50 мВ отрицательнее потенциала хрома.

Коррозионные испытания по методу «Корродкот» (воздействие на покрытие специальной агрессивной пасты) показало, что после четырех циклов испытаний покрытие $\text{Ni}27\text{Cr}0,5$ имело оценку 2 балла, а такое же покрытие, но с подслоем под хром «силникеля» толщиной 3 мкм показало предельную стойкость и оценено в 10 баллов. По другим данным покрытие с подслоем никеля 9—12 мкм и с подслоем «силникеля» равноценно по защитной способности покрытию без силникеля толщиной 24 мкм.

Хромовое покрытие с развитой микротрещиноватостью может быть получено из электролита следующего состава, г/л: хромовый ангидрид — 250; кремнефтористоводородная кислота — 0,75; серная кислота — 1,5; селенат натрия — 0,015.

Концентрация трехвалентного хрома, образующегося в процессе электролиза, поддерживается в пределах 0,2—1,0 г/л.

Имеются данные о возможности получить микротрещиноватое хромовое покрытие из стандартного сульфатно-кремнефторидного электролита при режиме: $i_k = 15 \text{ А/дм}^2$, $t = 40 \div 50^\circ\text{C}$, слой — 2 мкм.

Для получения микротрещиноватого хромового покрытия Институт химии и химической технологии АН ЛитССР разработал технологический процесс хромирования, обозначенный «Лимеда Х-80». Этот процесс характеризуется следующими показателями: рабочие температуры хромирования — 18 — 55°C ; катодные плотности тока — 1 — 140 А/дм^2 ; выход хрома по току — до 23 %; расход добавки «Лимеда Х-80» — 1 г/м^2 ; минимальная толщина покрытия, при которой образуются микротрещины — 0,3 мкм.

Состав электролита, г/л: хромовый ангидрид — 200—400 и добавка «Линмеда Х-80» — 15.

Процесс внедрен на Горьковском автомобильном заводе и на Паневежском заводе точной механики. Трещиноватость определяется по числу трещин, пересекающим длину 1 см. Хорошая защитная способность достигается при 600 трещинах на 1 см.

Увеличение защитного действия хрома за счет существенного увеличения его микропористости или микротрещин объясняется спецификой его контакта с подслоем никеля, по отношению к которому хром является катодом. Важным фактором в этом контактировании представляется соотношение поверхностей катода и анода. Резкое увеличение пористости приводит к возрастанию поверхности никеля под порами более чем в 100 раз и соответственно этому уменьшается плотность тока контактной коррозии в каждой из пор, а значит, и уменьшается скорость коррозии анода, никеля (рис. 42.)

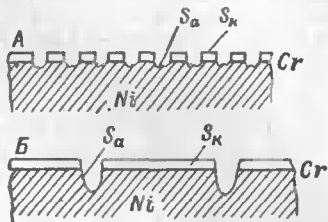


Рис. 42. Схема коррозии никелевого подслоя при разной пористости хрома

Защитно-декоративное хромирование деталей из легких и цинковых сплавов осуществляется также осаждением слоя хрома около 1 мкм на подслоя, который наносится по технологии, принятой для этих металлов [20].

Для хромирования мелких деталей насыпью применяется концентрированный электролит с хорошей кроющей способностью, г/л: хромовый ангидрид — 350—400; серная кислота — 3,5—4,0; борная кислота — 10. Режим работы: катодная плотность тока (сила тока, отнесенная к площади кюветы с деталями) — 120—300 А/дм²; температура электролита — 38—45°C; продолжительность хромирования — 15—20 мин.

На Казанском заводе «Автоспецоборудование» внедрен электролит для хромирования мелких деталей в колоколах. Электролит имеет следующий состав, г/л: хромовый ангидрид — 400; фтористый калий — 8—12; добавка «Прогресс» — 0,3—0,4. Режим работы: $i_k = 7 \div 10$ А/дм², $t^\circ = 20 \div 30^\circ\text{C}$, скорость осаждения — 0,25 мкм/мин.

Покрывание черным хромом. Черное хромирование нашло применение в приборостроении для защитно-декоративной отделки деталей, которые наряду с коррозионной стойкостью должны иметь поверхность, обладающую низким коэффициентом отражения света, например в различных оптических системах. Черные хромовые покрытия можно наносить на поверхность различных металлов. Покрытия черным хромом по сравнению с другими покрытиями черного цвета — черным никелем, оксидными или фосфатными пленками — отличаются хорошей защитной способностью, обеспечиваемой подслоем молочного или блестящего хрома, хорошей теплоустойчивостью и стойкостью в вакууме, а также относительно высокой износостойкостью, примерно в три—пять раз превосходящей износостойкость черного никеля, однако для работы на трение покрытие черным хромом непригодно. Для покрытия черным хромом применяются несколько электролитов.

Раствор № 1. Состав, г/л: хромовый ангидрид — 300—350; уксуснокислый барий — 5—7; азотнокислый натрий — 7—10; борная кислота — 12—15. Режим работы: плотность тока $i_k = 40\text{—}80 \text{ А/дм}^2$; $t = 30\div 40^\circ\text{C}$; скорость наращивания хрома — 6—8 мкм/ч.

Раствор № 2. Состав, г/л: хромовый ангидрид — 250—280; криолит — 0,2—0,3; железо щавелевокислое (окисное) — 50—60. Режим работы: $i_k = 8\div 15 \text{ А/дм}^2$, $t = 15\div 20^\circ\text{C}$, время хромирования — 15—30 мин, толчок тока 30—50 А/дм² в течение 1—2 мин.

Раствор № 3. Состав, г/л: хромовый ангидрид — 280—300; аммоний фтористый — 0,2—0,3. Режим работы: $i_k = 50\div 100 \text{ А/дм}^2$, $t = 18\div 25^\circ\text{C}$, продолжительность хромирования — 2 мин.

В электролитах не допускается наличие серной кислоты.

Новый электролит прорабатывается током из расчета 10—20 А·ч/л. Электролиты устойчивы в работе и обеспечивают получение равномерного черного цвета при широком диапазоне плотностей тока. Толщина слоя черного хрома обычно 1,5—2,0 мкм. Для надежности защиты от коррозии применяется подслоу молочного хрома толщиной 10—15 мкм.

Подготовка изделий к хромированию обычная для декоративных покрытий. После нанесения черного хрома изделия промывают водой, сушат и подвергают термообработке в масле при температуре 110—120°C в течение 30—60 мин.

Покрытие черным хромом производится также из электролита с добавкой ДХТИ-50. Состав электролита и режим хромирования приведены в табл. 3.

Существенное влияние на отражательную способность черного хромового покрытия оказывает шероховатость поверхности основного металла. Коэффициент отражения на полированной поверхности достигает 10 %, в то время, как на пескоструйной поверхности он снижается до 1—4 %.

Покрытие черным хромом с успехом применено для защитно-декоративной отделки стволов охотничьих ружей. Атмосферные коррозионные испытания, проведенные в районе Батуми, показали, что при ранее применявшемся оксидировании с использованием «ржавого лака» уже после 24 ч испытаний появились первые признаки коррозии, а образцы, покрытые черным хромом, не изменились после испытаний в течение месяца. Тамбовский завод гальванического оборудования изготовил автоматическую линию для черного хромирования стволов охотничьих ружей с источником тока ВАКГ—6/12 3200/1600.

Для расширения диапазона декоративных свойств хромовых покрытий предложен электролит¹, позволяющий наносить синне хромовые покрытия. Электролит имеет следующий состав, г/л: хромовый ангидрид — 250—400; кремнефтористый калий — 15—20; едкий натр — 15—20; тетраборнокислый натрий — 15—20; сахар — 1—3.

24. Защитные покрытия

Для защиты от коррозии стальных трущихся деталей хромирование с подслоем непригодно из-за низких механических свойств многослойного покрытия. В этом случае возможно применение беспористых хромовых покрытий достаточной толщины, наносимых непосредственно на сталь без подслоя меди и никеля. Беспористость

¹ А. с. 697609 (СССР).

покрытия достигается применением режима молочного хромирования, полировкой детали перед и после хромирования и пропиткой хромового покрытия уплотняющими составами с пассивирующими и гидрофобными свойствами. Хорошими защитными свойствами обладает молочный хром толщиной 20 мкм, осажденный из универсального электролита при температуре 70°C и плотности тока 30 А/дм². По имеющимся данным, такое покрытие показало удовлетворительную защиту некоторых деталей паровых турбин, валиков водяного насоса автомобильного двигателя, медицинских инструментов.

Молочный хром не имеет структурной пористости, однако нельзя исключить возможность образования в нем пор по причинам, не зависящим от структуры. Такими причинами могут быть неметаллические включения в основном металле, выходящие на хромируемую поверхность, неудаленные остатки загрязнений на этой поверхности, осаждение инородных частиц из электролита и др. Поэтому для деталей, эксплуатирующихся в агрессивных условиях, например в морской атмосфере, целесообразно увеличить толщину покрытия до 40—50 мкм и полировать поверхность детали до и после хромирования.

Для повышения износостойкости молочного хромового покрытия предлагается перекрывать его блестящим хромом толщиной 20—30 мкм [20]. С этой целью хромирование осуществляется последовательно в двух ваннах со стандартным электролитом. Первым осаждается слой молочного хрома толщиной 20 мкм при температуре 70°C и катодной плотности тока 30 А/дм². Затем деталь (не смывая) переносят в ванну с более низкой температурой электролита и наносят слой блестящего хрома при температуре 50°C и катодной плотности тока 50 А/дм².

Необходимо указать, что все однослойные хромовые защитные покрытия должны наноситься по возможности равномерно и во всяком случае контроль их толщины следует производить магнитным толщиномером в углублениях рельефа хромированной поверхности и в других местах, где толщина покрытия минимальна. В этих местах толщина хрома должна соответствовать заданному значению.

Высокая стойкость хрома при нагреве позволяет использовать хромирование для защиты от окисления полированных деталей, которые необходимо термически обработать при высокой температуре. Молочный хром толщиной 8—10 мкм обеспечивает такую защиту при закалке деталей. После термообработки хром снимается анодным растворением в растворе щелочи, не содержащем хлоридов. Такое же покрытие применяется для защиты стальных деталей от цементации и нитроцементации вместо гораздо более трудоемкого и длительного омеднения.

Примером эффективности хромирования для защиты от окисления является хромирование стальных кожухов для термодвигателей, устанавливаемых в нагревательных печах. Покрытие слоем хрома толщиной 30—40 мкм повысило срок службы кожухов в три — пять раз.

Пропитка хрома. Устранение структурной или случайной пористости хромовых покрытий путем заполнения пор уплотняющими составами является эффективным методом повышения защитной способности однослойного хромового покрытия достаточной толщины. Уже первые попытки пропитки хромового покрытия льняным маслом при температуре 120°C дали значительное увеличение защитной способности блестящих хромовых покрытий. Исследования пропитки блестящего хромового покрытия (толщиной от 10 до 40 мкм) пассивирующими растворами на основе нитратов, хроматов и фосфатов

полимеризующимися материалами (льняным маслом и клеем БФ-2), смазками АМС-3 показали, что наиболее эффективна пропитка льняным маслом, клеем БФ-2 и смазкой АМС-3. Как видно из табл. 25, эти пропиточные материалы существенно повысили защитную способность хромовых покрытий при толщине последних 40—50 мкм [4]. Дальнейшие исследования, направленные на замену льняного масла, показали также хорошую эффективность ингибированной смазки К-17.

Таблица 25. Результаты коррозионных испытаний стальных хромированных образцов с пропиткой пор различными наполнителями

Наименование наполнителя и покрытия	Время до появления коррозии, сут		
	Переменное погружение в дистиллированную воду при 15—85 °С	Климатическая камера (продолжительность испытаний 215 сут)	Камера с распыленным 3 %-ным раствором (продолжительность испытаний 40 сут)
Блестящий хром без пропитки	22 ч	1	1
Льняное масло	230	Коррозия отсутствует	Коррозия отсутствует
Насыщенный раствор нитрита натрия	122	—	—
Смазка АМС-3	158	38—45	—
Клей БФ-2	140	35—45	19
Концентрированный раствор Мажефа	31	—	—
Парафин	39	—	—
Четырехслойное покрытие	—	46	—

В работе [18] показано, что значительное повышение защитной способности хрома достигается при пропитке покрытия гидрофобной кремнийорганической жидкостью ГФЖ136-94.

На образцах с комбинированным покрытием Хмол25Хтв100, пропитанных этой жидкостью, после двухлетних испытаний в очень жестких условиях коррозии не было, в то время как на образцах, не пропитанных жидкостью ГФЖ136-94, коррозионные разрушения были на 2—2,5 % поверхности.

Основным требованием технологии пропитки является полное удаление влаги из пор. Это достигается наилучшим образом при погружении деталей в пропитывающую жидкость, нагретую до 110—120°С. Такой нагрев помимо удаления влаги обычно снижает вязкость жидкости, облегчая заполнение ею пор. Можно также непосредственно перед пропиткой нагревать деталь до указанной температуры.

Повышение защитной способности хромовых покрытий достигается также путем фосфатирования хромированных деталей с последующей пропиткой в 3—5 %-ной бензиновом растворе жидкости ГФЖ136-94. После пропитки и сушки детали прогревают при 110—130°С в течение 45—60 мин.

В области защиты от коррозии перспективным направлением является применение сплавов хрома [9]. В этом направлении представляет интерес сплав хрома с молибденом, исследованный М. А. Шлугером с сотрудниками. При содержании молибдена в сплаве 1,4 % слой сплава толщиной 0,5—0,6 мкм после испытаний в гидростате в течение 168 ч имел на поверхности образцов одну точку коррозии, а покрытие чистым хромом такой же толщины имело 140 точек. Испытания в течение 10 сут в 3 %-ном растворе хлористого натрия также выявили значительные преимущества сплава: на образцах, покрытых хромом, коррозии подверглось 62 % поверхности, в то время, как на сплаве были только 2 точки.

Ориентировочная рекомендация условной эксплуатации для разных хромо-вых покрытий приведена в табл. 26, которая составлена

Таблица 26. Условия эксплуатации стальных хромированных деталей

Вид покрытия	Условия эксплуатации по ГОСТ 14007—68					
	Л	С	Ж	ОЖ		
Защитно-декоративное с подслоем меди и никеля	+	+	+	+	*	
Защитно-декоративное с подслоем никеля	+	+	+	+	*	
Черное хромо-вое покрытие с подслоем меди и никеля	+	+	+	+	*	
Защитно-декоративное покрытие с подслоем меди	+	+	—	—	—	
Защитное покрытие молочным хромом	+	+	+	**	+	**
Защитное износостойкое покрытие молочным и твердым хромом	+	+	+	+	+	+
Твердое хромо-вое покрытие	+	+	+	**	—	—

Примечание. Знак «+» обозначает, что покрытие допускается для данных условий эксплуатации; знак «—» — покрытие не допускается.

* Не допускается для изделий, подвергающихся воздействию брызг морской воды. ** Не допускается для изделий, предназначенных для работы на открытом воздухе, и деталей, предназначенных для работы под навесом во влажном тропическом и морском климатах.

по ГОСТ 14623—69, где не указаны условия хромирования, обеспечивающие необходимую защитную способность покрытия. Представляется, что использование современных методов повышения стойкости покрытий (увеличения толщины, пропитки, полирование до и после хромирования, микротрещиноватый хром, специальные подслои никеля) позволит расширить области применения хромо-вых покрытий по сравнению с приведенными в таблице.

Износостойкое хромирование применяют для повышения износостойкости новых деталей машины и инструментов и устранения задирающих поверхностей, восстановления размеров изношенных деталей и исправления деталей, размеры которых оказались заниженными при механической обработке.

Условия осаждения хрома. По сравнению с защитно-декоративными покрытиями процесс износостойкого хромирования обладает некоторыми особенностями: толщина слоя хрома намного больше, что является причиной значительной продолжительности процесса, достигающей в отдельных случаях суток; режим электролиза и состав ванны должны способствовать наилучшей рассеивающей, а не крошащей способности (подготовка деталей и их расположение в ванне должны предусматривать возможно более равномерное распределение слоя покрытия на хромируемой поверхности); хромирование производится непосредственно по основному металлу без подслоя, хромируемая поверхность только шлифуется, не полируется, покрываются обычно отдельные участки, а остальная поверхность деталей изолируется.

Устранение задирающих поверхностей. У ряда вязких материалов (нержавеющих сталей, титановых сплавов) при особо значительных местных давлениях на трущихся поверхностях возникают задиры, выводящие детали из строя. Покрытие одной из сопряженных поверхностей твердым гладким блестящим хромом толщиной 10—20 мкм устраняет возможность задирающих пар. При слое хрома 1—2 мкм можно предупредить задирающие резьбовых соединений.

Хромирование титановых и алюминиевых сплавов. Эти сплавы отличаются наличием прочной окисной пленки, препятствующей сцеплению покрытий. Удаление этой пленки можно осуществить в процессе электролиза путем воздействия на катод ультразвуковым полем. Возможно также специальная подготовка поверхности, при которой обеспечивается сцепление покрытия.

Для титановых сплавов еще мало производственных данных о их хромировании. Рекомендуется предварительно травить титан в концентрированной соляной кислоте в течение 1 ч при 50°C. Эта обработка образует на поверхности титана пленку гидрида титана, на которую можно наносить хром из обычных электролитов. Приводятся и другие методы подготовки, при которых титан покрывается тонким подслоем цинка.

Детали из титана и титановых сплавов должны быть изготовлены из отожженных заготовок и хромируемая поверхность должна быть чисто обработана без прижогов. Покрытие наносится с подслоем молочного хрома толщиной 10 мкм, подвергнутого термодиффузионному вакуумному отжигу.

Исследованиями [43] показана возможность достижения высокой прочности сцепления хрома при его нанесении в ультразвуковом поле. Образцы хромировались слоем 50 мкм в универсальном электролите. Прочность сцепления определяли как на образцах прошедших термообработку после нанесения слоя 8—10 мкм, так и без этой обработки. Предварительную подготовку образцов проводили обработкой в растворе серной и соляной кислоты. Прочность сцепления определялась разрывом паяных соединений. Приведенные в табл. 27 результаты испытаний показывают, насколько ультразву-

Т а б л и ц а 27. Прочность сцепления хромового покрытия с титаном марки ВТ1-1

А/дм ²	Прочность сцепления, МПа			
	Ультразвуковая обработка		Хром на гидридной пленке без ультразвуковой обработки	
	термообработка	без термообработки	термообработка	без термообработки
50	86	82	57	25
70	115	85	53	22
100	117	120	55	19
120	123	132	55	18
150	135	141	42	16
200	138	140	29	—

ковая обработка (4,5 Вт/см² в течение 2 мин) повысила прочность сцепления хрома с титаном марки ВТ1-1 при $t=60^{\circ}\text{C}$. Близкие значения получены и для сплава ВТ-22. Под действием ультразвукового поля значительно повышается микротвердость хромовых покрытий [М. А. Шлугер и Л. Д. Ток].

Хромирование измерительных инструментов. Хромирование гладких калибров — пробок, калибров — скоб, концевых мер длины (плоскопараллельных плиток и др.), как правило, осуществляется в любых электролитах, дающих износостойкое покрытие при режимах, которые обеспечивают осаждение наиболее блестящих осадков. Перед хромированием производится обычное анодное активирование в течение 30 с. Толщина слоя хрома должна быть на 10—15 % больше допуска инструмента на износ. Обычно она составляет 10—20 мкм и не превышает 100 мкм (при исправлении калибров с заниженным размером). На величину рабочего слоя хрома следует уменьшить размер инструмента. При тонком слое хрома следует предусмотреть припуск на доводку, при толстом — на шлифовку и доводку. Скобы и калибры одного размера хромируются одновременно по несколько штук в приспособлении (рис. 43), чтобы хромируемые поверхности находились в одной плоскости. Даются два варианта достижения равномерности покрытия: стальные защитные катоды 4 и экраны из изоляционного материала 2.

Хромирование металлорежущего инструмента. Хромирование режущей части инструментов уменьшает силы трения при резании, облегчает сход стружки, значительно снижает температуру резания и в результате этого повышает износостойкость инструмента.

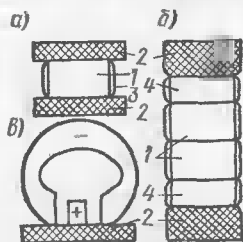


Рис. 43. Схема монтажа гладких калибров — пробки (а, б) и скобы (в): 1 — калибр; 2 — изолирующий экран; 3 — хромовое покрытие; 4 — стальной защитный катод

Хромирование эффективно для режущего инструмента с небольшими нагрузками на режущую кромку, мало нагревающуюся в работе. К таким инструментам относятся развертки, протяжки, метчики, фрезы, работающие при небольших нагрузках с интенсивным охлаждением. Особенно большой эффект дает хромирование всех видов режущих инструментов, обрабатывающих дерево, пластмассы, бумагу и подобные мягкие материалы.

Хромирование металлорежущего инструмента, используемого для обработки стали и чугуна, позволяет в ряде случаев повысить их стойкость в три-четыре раза. При обработке цветных металлов стойкость режущих инструментов увеличивается в пять — восемь раз. Кроме того, при обработке (особенно алюминия и его сплавов) устраняется налипание металла на режущую кромку инструмента. Наибольший эффект от применения хромирования режущего инструмента можно получить, если температура на режущих кромках инструмента не превышает 300°C , так как при более высоких температурах происходит значительное уменьшение твердости хрома.

Причинами разрушения хромового покрытия на кромках и гранях режущего инструмента являются мельчайшие заусенцы, приводящие к скалыванию хрома, и «прижоги» поверхности, вызывающие понижение твердости основного металла, что при давлении на режущую часть инструмента приводит к разрушению покрытий. Для предупреждения скалывания хрома на режущих кромках инструмента предлагается перед хромированием произвести обработку двух-трех деталей, что способствует полному удалению микрозаусенцев. Во избежание продавливания хрома твердость режущих кромок перед хромированием должна быть не ниже 55 HRC.

Толщина слоя хрома при покрытии металлорежущего инструмента должна быть, мкм: для метчиков — 3—4, для сверл и разверток — 5—10 и для долбяков — 20—30. Толщину хромового покрытия целесообразно уточнять практическим путем в зависимости от точности инструмента и рода обрабатываемого металла.

Условия электролиза для хромирования режущего инструмента рекомендуются аналогичными хромированию мерительного инструмента, но при определении силы тока необходимо учесть, что режущий инструмент имеет поверхность с развитым рельефом и максимальная плотность тока будет на лезвиях. Необходимо подбирать силу тока таким образом, чтобы на лезвиях покрытие было бы блестящим без подгара. Такое покрытие должно соответствовать расчетной плотности тока. Обычно при такой силе тока в углублениях будет осаждаться молочный хром.

После нанесения покрытия проводится термическая обработка при 200°C в течение 1,5—2,0 ч для удаления водорода. Шлифование инструмента после покрытия не рекомендуется; при необходимости производится притирка.

Хромирование пресс-форм, штампов, матриц и пуансонов. При хромировании инструментов, имеющих сложную форму рабочей поверхности, требуется применение соответствующих фигурных анодов или местных дополнительных анодов сравнительно простой формы с индивидуальным регулированием тока. Для большей жесткости, удобства монтажа и подводки тока в середине анода устанавливается и заливается свинцовым сплавом медный или латунный стержень (или трубка), к выступающему концу которого подводится ток.

Хромирование пресс-форм рекомендуется осуществлять в сульфатном малоконцентрированном электролите или в кремнефторидном электролите при режиме осаждения блестящего хрома, например $i_k = 30 \text{ А/дм}^2$, $t = 54 \div 56^\circ\text{С}$. Инструменты с особо сложным рельефом целесообразно хромировать при повышенной температуре электролита ($58\text{—}60^\circ\text{С}$), что уменьшит возможность пригара хрома на выступах. В начале процесса хромирования дается «толчок» тока продолжительностью 10—15 с. Расстояние между электродами при сложной конфигурации изделий по возможности стремятся сократить и часто оно составляет 1,0—1,5 см. Но во всех случаях стараются обеспечить одинаковое межэлектродное расстояние на всех участках хромируемой поверхности.

Для повышения стойкости холодновысадочных штампов применялись следующие условия хромирования. Новые штампы сначала эксплуатируются до некоторого износа, определяемого увеличением размеров «ручья». При этом металл штампа уплотняется и наклепывается и в дальнейшем мало подвержен усадке, которая является основной причиной разрушения хромового покрытия. Таким образом, поверхность ручьев после эксплуатации штампа имеет прочную основу для хромирования. После подготовки размеры ручьев восстанавливаются хромированием. Количество деталей, изготовленных штампом с хромовым покрытием, увеличивается в три-четыре раза по сравнению с нехромированным штампом. Хромирование производится в малоконцентрированном электролите при $i_k = 15 \div 35 \text{ А/дм}^2$ и $t = 54 \div 57^\circ\text{С}$. Толщина слоя обычно не превышает 0,08 мм во избежание искажения формы ручья. После хромирования проводится термообработка в печи или масле при температуре $180\text{—}200^\circ\text{С}$ в течение 2—3 ч.

Штампы для изделий, изготавливаемых методом холодной вытяжки, рекомендуется хромировать при режимах, указанных для пресс-форм. Толщина слоя хрома 15—30 мкм при гладкой и блестящей поверхности.

При многообразии пресс-форм, подвергающихся хромированию, является целесообразным применение универсального подвешного приспособления, которое предусматривает жесткое крепление анода, возможность различного положения анода относительно хромируемой поверхности и возможность применения местных дополнительных анодов.

Узел, на котором укрепляется анод, должен быть электрически изолирован от других узлов приспособления, но механически должен быть прочно соединен с ними (рис. 44).

Хромирование внутренних поверхностей деталей и металлообрабатывающего инструмента. Хромирование проводится при максимально точном центрировании анода относительно покрываемой поверхности, что должно обеспечить равномерное отложение слоя хрома, требуемую точность размера и правильность геометрической формы отверстия.

Схема монтажа матрицы для обрубки листовых материалов изображена на рис. 45. Матрица 1 жестко закрепляется между винипластовыми листами 2 и шайбой 3. Анод 4, представляющий собой стальную освинцованную проволоку ($d = 3 \div 4 \text{ мм}$), соединенную с освинцованным горизонтально расположенным диском, точно центрируется в отверстии матрицы. Чтобы предупредить концентрацию тока на краях отверстия, предусмотрена изоляция 5, установленная на диске анода. Расстояние l между указанными на

рис. 45 участками матрицы и анода должно быть одинаковым
Хромирование проводится, например, из малоconцентрированного электролита при $i_k = 45 \text{ A/дм}^2$ и $t = 65 \pm 1^\circ\text{C}$. Толщина слоя

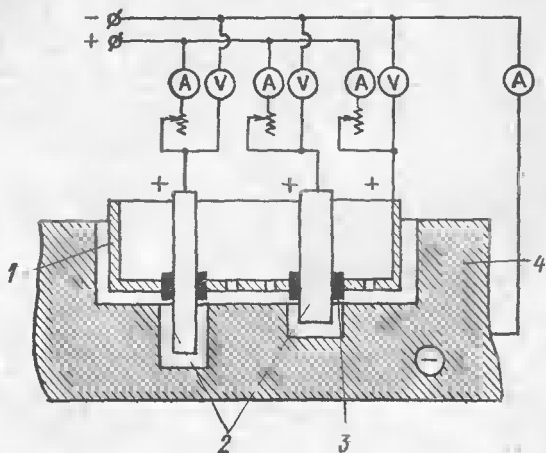


Рис. 44. Схема приспособления для хромирования деталей с глубоким рельефом:

1 — общий анод; 2 — дополнительные аноды с независимым регулированием тока; 3 — изоляция; 4 — хромируемая пресс-форма

хрома в среднем составляет 10 мкм. После хромирования, промывки, демонтажа и сушки проводится термообработка при температуре $180\text{--}200^\circ\text{C}$ в течение 1,5—2,0 ч.

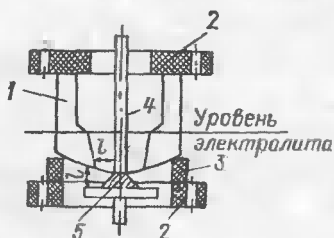


Рис. 45. Схема монтажа приспособления для хромирования обрубной матрицы:

1 — матрица; 2, 3 — монтажные детали из винипласта; 4 — анод; 5 — экран

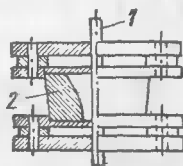


Рис. 46. Схема монтажа приспособления для хромирования матрицы для холодной протяжки:

1 — анод; 2 — матрица

Схема хромирования поверхности волочильного инструмента для холодной протяжки приведена на рис. 46, где анод (стальная оцинкованная проволока 1) помещается точно в центре волочильного

инструмента 2. Расчетная толщина слоя хрома 15 мкм, в калибрующей части она несколько больше. Покрытие хрома должно быть обязательно блестящим, а поверхность гладкой.

Хромирование внутренней поверхности деталей типа цилиндров двигателей внутреннего сгорания, цилиндров гидросистем, рекомендуется осуществлять в проточном электролите. Для этого, например, после подготовки к покрытию, полый свинцовый анод устанавливается в центре детали. Разогретый электролит подается принудительно по аноду сверху вниз, вытекает в пространство между электродами, поднимается вверх по желобу (у надставки) и стекает в сборник.

Для хромирования рекомендуется малоконцентрированный сульфатный электролит. Температура электролита 50—55°C; плотность тока 35—50 А/дм² должна уточняться в соответствии с длиной трубы. Расстояние между электродами от 5 мм и более.

Возможно применение электролитов других типов, а также выбор режима хромирования с учетом требований к покрытию и особенностей процесса при проточном электролите.

При значительной величине хромируемой поверхности трубы можно производить ее хромирование на постепенно перемещаемом участке с помощью анода, имеющего длину хромируемого участка и движущегося вдоль хромируемой поверхности со скоростью, обеспечивающей наращивание необходимого слоя хрома при данной плотности тока. Перед хромированием производится анодное активирование хромируемой поверхности, при котором скорость движения анода должна обеспечить продолжительность операции на каждом участке 30—60 с. Местное хромирование по этой системе позволяет использовать источник питания током с ограниченной мощностью и регулировать свойства хрома на разных участках хромируемой поверхности¹.

Хромирование поршневых пальцев. В зависимости от размеров на одной подвеске можно хромировать несколько пальцев при условии, чтобы общая длина пальцев на подвеске составляла 350—400 мм. При монтаже необходимо подобрать пальцы одного диаметра и проследить, чтобы на подвеске они не были смещены по оси. Нависание одного пальца над другим вызовет образование непокрытых участков или завалов в размерах. У крайних пальцев устанавливаются того же диаметра стальные шайбы — защитные катоды. Нижний край анодов должен быть на уровне нижней шайбы.

Для обеспечения надежного электрического контакта пальцев между собой и с подвеской необходимо хорошо очистить торцы пальцев и контактные поверхности подвески от загрязнений и после сборки с силой прижать их друг к другу и к подвеске с помощью имеющейся на подвеске гайки. В ванне вокруг подвески, навешиваемой в строго вертикальном положении, на равных расстояниях (50—70 мм) помещаются четыре плоских анода. После прогревания в течение 4—5 мин поршневые пальцы активируют 30—45 с при анодной плотности тока 25—30 А/дм². Режим электролиза рекомендуется следующий: $i_k = 25 \div 35$ А/дм², $t = 65 \pm 1^\circ\text{C}$. Толщина слоя хрома обычно определяется величиной допуска на износ и в среднем составляет 0,1 мм. При восстановлении размеров изношенных поршневых пальцев (как и других подобных деталей) толщина слоя хрома может быть повышена до 0,2—0,3 мм.

¹ А. с. 348882 (СССР)

Хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Увеличение износостойкости трущейся пары цилиндр — поршневые кольца осуществляется применением пористых хромовых покрытий. Как указывалось, пористый хром применяется для тяжело нагруженных деталей машин, работающих при высоких давлениях, повышенных температурах и недостаточно хорошей смазке. Гладкие хромовые покрытия в таких условиях, характерных для нормальной работы цилиндров и поршневых колец двигателей, недостаточно стойки. Практикой установлено, что зеркало цилиндра двигателя, покрытое гладким хромом, после 3—5 ч испытания на стенде оказывалось разрушенным.

Вследствие недостатка смазки происходит сильное местное разогревание и выкрашивание частичек хрома, влекущее за собой появление на зеркале цилиндра глубоких царапин. При пористом хромировании эти недостатки исключаются.

Увеличение срока службы цилиндра обычно достигается двумя путями. Первый состоит в пористом хромировании внутренней поверхности цилиндра, работающего в паре с чугунными поршневыми кольцами. При этом многократное увеличение общего срока службы цилиндра возможно за счет проведения повторного хромирования цилиндра. Второй путь заключается в пористом хромировании поршневых колец, которые, работая в паре с нехромированным цилиндром, способствуют уменьшению его износа. Износостойкость детали, покрытой пористым хромом, возрастает в три — пять раз, срок службы сопряженно работающей детали увеличивается примерно в полтора — два раза. Выбор того или иного пути зависит от производственных возможностей.

В практике пористого хромирования шлифование хромируемой поверхности производится перед анодным травлением. После создания сетки каналов пористого хрома, при необходимости, производится приработка хромированной поверхности в масле (например, при беспритирочном пористом хромировании поршневых колец).

Применение для сглаживания пористого хрома хонингования или притирки абразивными порошками не допускается. При такой обработке сошлифовывается значительная часть пористого слоя покрытия, а частички абразива внедряются в каналы пористого хрома. В этом случае рекомендуется хромирование производить на реверсивном токе или после хромирования производить шлифование хрома до нанесения сетки пор.

При подготовке к хромированию имеющиеся на цилиндрах окна и смазочные отверстия необходимо заделать свинцом. Эту операцию следует выполнять так, чтобы свинец выступал над хромируемой поверхностью примерно на 0,5 мм. При этом выступающая часть свинца несколько экранирует края отверстия, и хром на них осаждается значительно меньшим слоем. Если заделку отверстия произвести заподлицо с поверхностью детали, то хром отложится на острых краях отверстия, и вследствие этого при работе цилиндра возможно его скалывание.

Анодное активирование цилиндров перед их покрытием осуществляется в хромовом электролите при следующих условиях: для чугунных цилиндров — $i_a = 25 \text{ А/дм}^2$; $T = 10 \div 30 \text{ с}$; для стальных цилиндров — $i_a = 30 \div 35 \text{ А/дм}^2$; $T = 45 \div 60 \text{ с}$.

Режим электролиза: при хромировании — $i_k = 45 \div 60 \text{ А/дм}^2$ $t = 58 \div 60^\circ\text{C}$; при анодном травлении — $i_a = 40 \div 50 \text{ А/дм}^2$, количество электричества $350 \text{ А} \cdot \text{мин}$, $t = 58 \div 60^\circ\text{C}$.

Хромированный, промытый и высушенный цилиндр (перед шлифованием) подвергается термообработке с целью обезводороживания. Термообработка осуществляется в сушильном шкафу при $150-180^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5 ч. По другой технологической схеме, по которой анодное травление осуществляется непосредственно после осаждения хрома, производят размерное хромирование. При назначении толщины слоя хрома припуск должен предусматриваться лишь на анодное травление 0,03—0,04 мм.

При ремонте цилиндров двигателей иногда применяют механический способ повышения маслостойкости покрытия [28]. Для этого на зеркало цилиндра специальным накаточным приспособлением накатывают углубления до 0,25—0,35 мм.

Восстановление изношенных гильз целесообразно выполнять без ванны на специальной установке для возвратно-струйного хромирования (см. рис. 40). Номинальная производительность этой установки по данным [28] при наращивании слоя 0,25 мм составляет 30 шт. в смену. В некоторых случаях износ цилиндров двигателей носит местный характер. Изнашивается главным образом головная часть. В этом случае хромирование целесообразно производить только по изношенной поверхности. После хромирования производится шлифование всей внутренней поверхности гильзы, что позволяет выровнять переход между хромированной и нехромированной частями цилиндра.

Местное хромирование цилиндров двигателей осуществляется по приведенной схеме технологического процесса хромирования. Иллюстрация составляет операция шлифования перед хромированием, которая заменяется зачисткой поверхности наждачным полотном или местным шлифованием.

Хромирование блока цилиндров двигателей. Хромирование может быть осуществлено на установке (рис. 47) без погружения самого блока в ванну с электролитом. Принудительная подача электролита в пространство между электродами производится насосом 1. Электролит нагнетается в приемник 2, распределяется по цилиндрам блока и по внутренней части анода стекает в сборник 3.

В последнее время наметился значительный прогресс в технологии хромирования цилиндров двигателей внутреннего сгорания за счет использования преимуществ хромирования в проточном электролите и новых электролитов. При достаточной скорости потока можно проводить хромирование без подогрева электролита и при высоких плотностях тока. В этих условиях достигается выход по току до 40 % и соответственно высокие скорости наращивания. В результате исследований хромирования цилиндров ДВС в работе [28] предлагается следующий состав холодного электролита, г/л: хромовый ангидрид — 400; углекислый кальций — 65; сериокислый кобальт — 20.

На основании исследования проточного хромирования с использованием такого холодного электролита Белгородским ПКТБ ВО «Росстеххозтехника» разработана промышленная установка для безванного хромирования зеркала цилиндра. Она включает блок для одновременного хромирования четырех цилиндров, холодильную установку, теплообменник, шкаф управления и источник питания, бак с электролитом и бак для воды первой промывки. Блок с хромируемыми гильзами, распределительное устройство и система трубопроводов с кранами собраны на одной раме, образуя агрегат хромирования. Он может быть установлен в технологической линии. Вся

установка рассчитана на хромирование гильз диаметром от 100 до 130 мм и высотой до 285 мм. При наращивании слоя хрома толщиной 0,25 мм номинальная производительность установки составляет 30 шт. за смену. Режим хромирования при восстановлении цилиндров: $i_k = 100 \div 150$ А/дм²; $t = 20 \div 23^\circ\text{C}$, $v = 80 \div 130$ см/с, межэлектродное расстояние 15 мм, выход по току 40—42 %, анодное

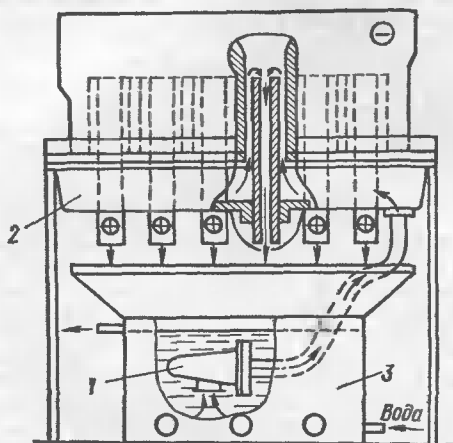


Рис. 47. Схема установки для проточного хромирования цилиндров в блоке двигателя:

1 — насос; 2 — приемник электролита; 3 — бак для слива электролита

травление для пористости покрытия 150—200 А·мин/дм². Износостойкость восстановленных хромированием гильз в 2,4—2,7 раза больше, чем износостойкость новых нехромированных и примерно равна износостойкости гильз, хромированных в универсальном электролите.

Такая интенсификация хромирования в ряде случаев может серьезно улучшить его технико-экономические показатели. Вместе с тем при производственном освоении интенсифицированного хромирования потребуется решить ряд задач, обеспечивающих его технологичность. Такими задачами, в частности, являются устройство контактов для подвода тока к сравнительно крупным деталям и охлаждение электролита для поддержания низкой температуры ванны.

Хромирование поршневых колец. Пористое хромирование поршневых колец производят главным образом для увеличения срока службы цилиндров двигателей. Толщина слоя хрома на поршневых кольцах двигателей различного типа колеблется от 0,1 до 0,3 мм. Соответственно этому перед хромированием занижается диаметр поршневых колец.

Последовательность выполнения технологических операций при покрытии пористым хромом поршневых колец разного диаметра несколько различна.

Поршневые кольца автомобильного или тракторного двигателя перед хромированием подвергаются опиловке для закругления острых углов, в том числе и на стыке замка; радиус закругления фаски 0,3—0,4 мм. Эта операция необходима для предупреждения наростов хрома на краях и срастания хромового покрытия между кольцами. Шлифование колец после хромирования не проводится. Пористо-хромированные кольца подвергаются притирке или поступают в эксплуатацию без дополнительной обработки.

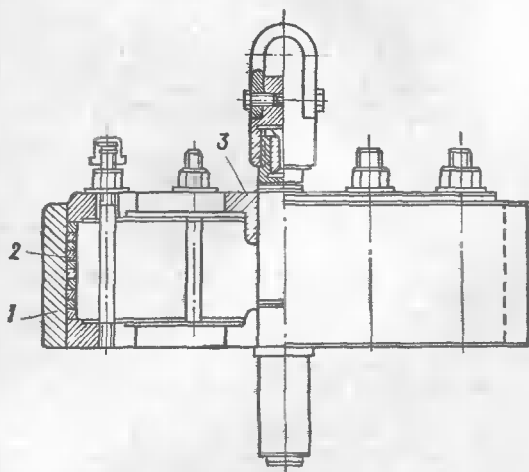


Рис. 48. Схема устройства приспособления для хромирования и шлифования поршневых колец большого диаметра:

1 — кондуктор для сборки; 2 — поршневые кольца; 3 — подвесное приспособление

При хромировании поршневых колец двигателей судового типа диаметром 300—700 мм сглаживание поверхности достигается путем чистового шлифования перед хромированием и после него, т. е. перед анодным травлением покрытия. Подвеска для хромирования (рис. 48) одновременно служит приспособлением для шлифования колец. Верхняя часть стержня подвески с крючком делается съемной (на резьбе), а в торец оставшейся части стержня запрессовывается закаленная втулка с центром для шлифования. Вторая втулка запрессовывается в нижнюю часть стержня. Чтобы не повредить «нижний» центр при хромировании, на него наворачивается глухая гайка.

При сборке в кондукторе поршневых колец с прямым срезом желательно, чтобы все замки были расположены на одной линии. Образующаяся при этом сплошная щель легко зачеканивается свинцом. При замках с косым срезом каждое поршневое кольцо в стопке тщательно зачеканивается свинцом отдельно. Поверхность свинца должна лежать на 0,5—0,3 мм ниже уровня хромируемой поверхности, не закрывая фаску кольца. Все части подвески — оправки, соприкасающиеся с электролитом, необходимо изолировать целлулоидом или пластиком. Для гарантии предохранения болтов от

покрытия хромом предусматриваются колпачки, навертываемые на резьбу.

На ускорение приработки трущихся поверхностей хорошее действие оказывает покрытие оловом или свинцом толщиной слоя около 10 мкм, наносимое на пористый хром. Осаждение этих металлов осуществляется в электролитах обычного состава.

Беспритирочное хромирование поршневых колец. Хромирование на реверсивном токе обеспечивает получение гладкой поверхности хрома и улучшает равномерность покрытия. Это послужило основанием для технологии хромирования поршневых колец в размер без последующей притирки. Разработка и практическое применение беспритирочного хромирования приведены в работах [5, 17]. Применен универсальный электролит, $i_k = i_a = 50 \div 52$ А/дм², $t = 54 \div 56^\circ\text{C}$, $T_k = 20 \div 22$ мин, $T_a = 20 \div 30$ с. Продолжительность анодного травления в последнем цикле — 6 мин, объем ванны — 1000 л, рабочий ток 700—1300 А, применено автоматическое поддержание температуры с точностью регулирования $\pm 1^\circ\text{C}$.

По данным работы [17], на одном из заводов годовой экономический эффект от внедрения беспритирочного хромирования на токе переменной полярности с использованием преобразователя тока САУ-ХРОМ составил около 9000 руб. на одну хромировочную ванну. В расчете учитывался только один из факторов экономии — уменьшение затрат за счет устранения брака хромированных колец.

Хромирование коленчатых валов. Для восстановления хромированием коленчатых валов возвратно-струйным методом разработана специальная установка (см. рис. 40). На установке производится все операции промывки, анодное травление в смеси кислот и хромирование одновременно всех шеек коленчатого вала двигателя ЗИЛ-130. Блок возвратно-струйных ячеек, распределитель, система трубопроводов и дистанционно управляемых кранов, емкости для электролитов и растворов, насосные агрегаты к ним объединены в одну установку, расположенную в цехе. Холодильный агрегат, теплообменник, источник тока и блок контакторов для реверса находятся в агрегатном помещении. Производительность установки при наращивании слоя хрома 0,4 мм составляет 5 валов за смену. Установка для безвального возвратно-струйного хромирования цилиндров и коленчатых валов отражают одно из прогрессивных направлений механизации процесса твердого хромирования. Следует ожидать в дальнейшем развития такого типа установок для массового и серийного производства. Такого типа установки могут быть применены и при горячих электролитах, в связи с чем отпадает необходимость в оборудовании для электрохимического травления деталей и в холодильном агрегате. Однако поскольку при этом уменьшается производительность оборудования, выбор технологии хромирования должен в каждом случае обосновываться соответствующим технико-экономическим анализом.

Восстановленные хромированные валы в два-три раза более износостойки, чем валы серийного производства. Что касается предела усталости хромированных коленчатых валов, то имеются данные, что у валов из высокопрочного чугуна предел усталости не ниже, чем у валов перешлифованных на очередной ремонтный размер (если хромировалась только цилиндрическая часть). Хромирование проводилось в холодном электролите слоем 0,3 мм (после шлифования) при $i_k = 120$ А/дм², $t = 20 \div 25^\circ\text{C}$. При хромировании также и гал-

дльного перехода (концентратора напряжений) наблюдалось некоторое снижение предела усталости (на 5 МПа) [А. И. Муравьев].

Практический интерес представляет возможность местного хромирования шеек на длинных валах. Оно может быть осуществлено по упрощенной схеме, когда хромируемая шейка располагается под ванной, в которую самотеком стекает электролит из рабочей ячейки, с анодом, окружающим хромируемый участок вала. Электролит универсальный, $i_k = 50 \div 60$ А/дм², $t = 50 \div 55^\circ\text{C}$. Электролит подается в рабочую ячейку из ванны насосом. Более совершенным методом является устройство герметизированной рабочей ячейки, в которой создается непрерывный проток электролита [34]. Такое устройство позволяет применить высокие плотности тока. Хромирование производится в электролите, г/л: хромовый ангидрид — 200—300; серная кислота — 5—7. Режим: $i_k = 50 \div 200$ А/дм², $t = 55^\circ\text{C}$. При $i_k = 100$ А/дм², $t = 65^\circ\text{C}$, скорость потока 20—150 см/с, межэлектродное расстояние 10—30 мм. Технология местного хромирования крупногабаритных изделий подробно изложена в работе [34].

На Пермском моторостроительном заводе применено проточное хромирование валов турбин для восстановления посадочных мест с нанесением слоя хрома не менее 0,1 мм. Хромирование производится в электролите, г/л: хромовый ангидрид — 200—250; серная кислота — 4—6. Режим: $i_k = 80 \div 120$ А/дм², межэлектродное расстояние 3 мм. Анод из сплава свинца с оловом (10 %) и сурьмой (4—6 %). Материал приспособлений: оргстекло, титан, уплотнения из вакуумной резины и резины ИРП-1237, выпрямитель ВАКР 12/6-600, насос ЯНЗ-ЭЭ-25м. Распределительный коллектор с гуммированными вентилями, трубы из титанового сплава и гибкие шланги из прорезиненных тканей с протянутой внутри хлорвиниловой трубой.

Большое число примеров практического осуществления хромирования разнообразных деталей приведено Г. С. Левитским, который длительное время успешно разрабатывал практические приемы износоустойчивого хромирования.

26. Вопросы повышения экономичности при хромировании

Твердое хромирование, особенно для восстановления изношенных деталей, отличается разнообразием продукции, разной продолжительностью хромирования отдельных партий деталей, часто индивидуальным и мелкосерийным характером производства. Применительно в основном к этим особенностям рассматриваются следующие пути экономии на участке хромирования: организация работ по хромированию; производительность хромировочной ванны; расход энергии; расход материалов.

Организация работ. Имеет одной из главных целей обеспечить постоянную полную загрузку бригады хромировщиков. Необходимо так подбирать партии хромируемых деталей применительно к имеющемуся оборудованию, чтобы за время сравнительно длительного нахождения деталей в хромировочной ванне бригада хромировщиков смогла быть полностью занята подготовкой партии деталей для следующей загрузки. Это требует от бригадира учета конструктивных особенностей деталей, требований к их хромированию (толщина и равномерность слоя покрытия, изоляция нехромируемых поверхностей), определение величины партии деталей, полностью загружающей

щей ванну, учета трудоемкости подготовительных работ. При такой организации труда работы бригады большое значение имеет рациональное устройство рабочего места хромировщика. Полезные указания об этом имеются в специальной инструкции [39].

Повышение производительности ванн. Для этого необходимо рационально загрузить ванны деталями, полностью загрузить их током, сократить продолжительность хромирования за счет уменьшения расчетного слоя хрома, увеличения выхода по току, повышения равномерности покрытия. Для рациональной загрузки ванн деталями целесообразно распределить их по группам таким образом, чтобы в каждой группе были детали однотипные: по габаритным размерам, толщине слоя хрома, величине хромируемой поверхности и форме. Для каждого типа деталей разработать рациональные приспособления для навешивания в ванну.

Величина поверхности загруженных в ванну деталей определяется значением полной токовой нагрузки ванны, т. е. силой тока, при которой заданная температура электролита поддерживается за счет джоулевой теплоты, без подачи пара (для горячих электролитов).

Если по габаритным размерам детали загружают ванну полностью, а по величине поверхности загрузка недостаточна, то повышают плотность тока по возможности до достижения полной токовой нагрузки. Такое повышение плотности тока с сохранением требуемого качества покрытия достигается на основе изложенных ранее закономерностей, определяющих рабочий интервал. Хромирование при возможно более высоком выходе хрома по току связано с выбором состава электролита и режима осаждения. Выход по току наибольший (до 40 %) в тетрахроматных холодных электролитах, затем в сульфатно-кремнефторидных (17—19 %) и в сульфатных (13—15 %).

Выход по току возрастает с увеличением плотности тока, что особенно проявляется в малоконцентрированных сульфатных электролитах; в этом случае при $i_k = 45 \text{ А/дм}^2$ выход по току 15 %, а при $i_k = 80 \text{ А/дм}^2$ выход по току достигает 20 % ($t = 55^\circ\text{C}$). Применение высоких плотностей тока в пределах сохранения требуемого качества покрытия возможно в проточном электролите с некоторым повышением выхода по току.

Выход хрома по току является важным показателем эффективности электролита, однако при технико-экономическом анализе для выбора электролита учитываются и другие его особенности: потери хромового ангидрида, зависящие от его концентрации в электролите, необходимость специальных установок для охлаждения электролита при низких температурах, химическая агрессивность электролита, сложность его состава и др.

При нанесении толстых покрытий значительное повышение производительности ванн может быть достигнуто за счет мероприятий, повышающих равномерность покрытия (см. гл. I). Скорость наращивания покрытия определяется на том участке поверхности, где толщина покрытия наименьшая. Поэтому, чем более равномерно покрытие, тем выше расчетная скорость наращивания при той же заданной средней плотности тока. Сокращение продолжительности хромирования, и довольно значительное, дает также применение размерного хромирования, при котором покрытие наносится без припуска на шлифование. Толщина этого припуска примерно 0,1—0,15 мм и его наращивание требует продолжительности хромирования при плотности тока 60 А/дм^2 1,5—2,0 ч.

Расход энергии. Он складывается в основном из потребления тока на процесс электролиза, энергии на нагрев или охлаждение электролита и на вентиляцию. Уменьшение расхода тока можно получить путем возможно более широкой замены защитных катодов на защитные изоляционные экраны. Некоторую экономию тока можно получить за счет ухода за подвесными приспособлениями, тщательно изолируя их поверхности и устраняя наросты хрома в местах повреждения изоляции.

Сокращение расхода энергии на хромирование достигается во всех случаях сокращением продолжительности процесса за счет повышения выхода хрома по току, увеличением равномерности покрытия и применением размерного хромирования. В малоконцентрированных электролитах непосредственно на электролиз расходуется больше энергии, чем в электролитах с большей концентрацией, имеющих более высокую электропроводность. Однако этот дополнительный расход не является потерей, так как он используется на нагрев электролита, соответственно уменьшая расход пара. Количество этой энергии может быть достаточным для поддержания постоянной рабочей температуры электролита, исключив паровой нагрев.

Большая экономия энергии может быть получена при организации непрерывной круглосуточной работы ванны, исключив ежедневный подогрев их до рабочей температуры. Такой подогрев требует особо большой затраты теплоты. Часовой расход пара на нагрев в пять — семь раз превышает его расход на поддержание температуры электролита. Например, расход пара для ванны объемом 2000 л составляет для нагрева до 60°C 200 кг/ч, а для поддержания этой температуры — 23,6 кг/ч.

Основная затрата теплоты работающей ванны обусловлена испарением электролита. Эта потеря может быть существенно уменьшена путем добавки в электролит хрома или нанесения на поверхность электролита защитного слоя из полиэтиленовых поплавков или защитной жидкости.

Сокращение расхода основных материалов. Оно касается хромового ангидрида, поскольку его расход составляет главную часть расхода материалов. Хромовый ангидрид используется для выделения хрома и расходуется, кроме того, при уносе электролита с деталями, в вентиляцию и на потери при приготовлении и корректировании ванны.

Расход хромового ангидрида на выделение хрома может быть уменьшен при осуществлении мероприятий по экономии электрического тока (замене защитных катодов на изоляционные, повышения равномерности покрытий и др.). Потеря хромового электролита для деталей средней сложности составляет около 0,3 л/м² [14]. Из них 50 % на унос с деталями, 30 % в вентиляцию и 20 % на потери при приготовлении и корректировании электролита. Нормы на унос с деталями уже учитывают улавливание электролита при первой промывке. Основным путем уменьшения этих потерь является применение электролитов с малой концентрацией хромового ангидрида.

Относительные потери хромового ангидрида особенно велики при защитно-декоративном хромировании. При средней потере электролита 250 мл/м², концентрации хромового ангидрида 350 г/л и толщине покрытия 1 мкм потери хромового ангидрида составят 87 г/м², а его расход на покрытие 13,3 г/м². Таким образом потери равны 650 % от полезного расхода! Конечно, снижение концентрации

хромового ангидрида в электролите соответственно уменьшит его потери. Основными путями снижения уноса электролита в вентиляцию являются применение защитного слоя на зеркале ванны из оплавков или за счет добавки хрома (потери уменьшаются приблизительно на 50 %) и применением малокоцентрированных электролитов. Потери на приготовление электролитов с малой концентрацией хромового ангидрида также будут меньше. Такое значительное влияние концентрации хромового ангидрида на его потери является важной причиной современной тенденции возврата к электролитам с низкой концентрацией хромового ангидрида.

В перспективе можно наметить путь уменьшения расхода хромового ангидрида за счет регенерации отработавших хромировочных электролитов. В настоящее время электролиты, в которых накопилось большое количество железа, загрязненные азотной кислотой и другими вредными примесями, выливают в канализацию, затрудняя тем самым очистку сточных вод. Разработка методов очистки и регенерации таких электролитов проводится и уже имеются обнадеживающие результаты. Имеется положительный опыт очистки и повторного использования хромового электролита с помощью сульфокатионитов типа КУ-2 и КУ-23.

Изложенные соображения также намечают пути повышения производительности труда и снижения стоимости хромирования. Большое значение имеет квалифицированный творческий рационализаторский подход хромировщиков к выполняемым работам. Этим определяется ценность практических мероприятий для повышения экономической эффективности хромирования конкретных деталей в конкретных условиях данного цеха.

27. Охрана труда и техника безопасности

Во время работы хромировочной ванны на электродах обильно выделяются пузырьки кислорода и водорода, увлекающие электролит и образующие над ванной туман из распыленного электролита. Хромовый ангидрид и его растворы относятся к вредным веществам, поражающим кожу и слизистые оболочки дыхательных путей. Основными средствами борьбы с этой вредностью являются: усиленная вентиляция, нанесение на поверхность электролита в ванне барьерного слоя и снижение концентрации хромового ангидрида в электролите.

В основе усиленной вентиляции является местное удаление испарений электролита путем устройства по бортам ванны щелевого отсоса с таким объемом удаляемого воздуха, чтобы его скорость над серединой ванны превышала бы скорость подъема паров электролита. Расчет этой вентиляции должен производиться по специальному положению [32].

Создание барьерного слоя на поверхности электролита можно осуществить слоем оплавков из полихлорвиниловых или полиэтиленовых трубочек. Более практичным является введение в электролит препарата «хромин», который во время хромирования образует на поверхности ванны барьерный слой из пены. Достаточно 3 г/л хрома для создания необходимого барьерного слоя, позволяющего уменьшить унос хромового ангидрида в вентиляцию ванны на 50 %.

При всех видах работ на участке хромирования должны выполняться указания, содержащиеся в «Правилах техники безопасности и производственной санитарии при производстве металлопокрытий».

1. Аветов А., Дзыцук В. Разбавленный электролит для хромирования — Техника вооружения, 1981, № 3, с. 18.
2. Аджиев Б. У., Соловьева З. А. Средние внутренние напряжения электролитического хрома различной структуры. — В кн.: Твердые износостойкие гальванические покрытия. М.: МДНТП, 1980, с. 25—31.
3. Алмазов А. М. Электрооборудование участков гальванопокрытий на предприятиях ВОС. М.: Изд. ВОС, 1980. 86 с.
4. Богорад И. Я., Богорад Л. Я., Гакман Э. Л. Повышение защитных свойств блестящих хромовых покрытий. Л.: ЛДНТП, 1959. 28 с.
5. Богорад Л. Я. Хромирование на токе переменной полярности. Л.: ЛДНТП, 1957. 16 с.
6. Богорад Л. Я., Гакман Э. Л. Пористое хромирование. Л.: Лен-издат, 1950. 96 с.
7. Богорад Л. Я., Кнопва Л. К., Иванов Э. П. Интенсифицированный процесс хромирования в хром-кадмиевом электролите (ХКФ). Л.: ЛДНТП, 1976, 28 с.
8. Вороницын И. С. Исследование механических свойств хромовых покрытий, применяемых для упрочнения и восстановления деталей машин. Л.: Изд. Акад. тыла и трансп., 1963. 210 с.
9. Вячеславов П. М. Современное состояние и перспективы развития функциональной гальванотехники. — В кн.: Специальные химические и гальванические покрытия. Л.: ЛДНТП, 1982, с. 4—7.
10. Вячеславов П. М., Плескач А. М. Высокопроизводительные электролиты для нанесения металлических покрытий: Материалы краткосрочного семинара. Л.: ЛДНТП, 1975. с. 63.
11. Гиммельфарб Р. Е. Скоростное износостойкое хромирование в холодном электролите саморегулирующегося типа. — В кн.: Современная технология хромирования. Л.: ЛДНТП, 1976, с. 85—90.
12. Дасоян М. А., Пальмская И. Я. Оборудование цехов электрохимических покрытий. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979, 287 с.
13. Изучение осаждения хрома с титаном и иаводороживание покрытия и основы. / Л. Н. Солодкова, В. Ф. Ляхов, З. А. Соловьева, В. Н. Кудрявцев. — В кн.: Твердые износостойкие гальванические покрытия. М.: МДНТП, 1980, с. 32—38.
14. Инструкция по нормированию расхода материалов при гальванопокрытиях. М.: ЦНИИТИстроймаш, 1975. 75 с.
15. Каданер Л. И., Гиммельфарб Р. Е. Износостойкое хромирование в проточном электролите. Киев: Техника, 1971. 70 с.
16. Каинин Е. Н., Давыдова Э. В. Влияние органических добавок в электролит хромирования на качество хромового покрытия. Куйбышев, 1978. с. 51—56.
17. Квинт Г. Ю. Интенсификация процессов хромирования поршневых колец и крупногабаритных деталей с применением тока переменной полярности и автоматизации режима хромирования. — В кн.: Современная технология хромирования. Л.: ЛДНТП, 1976 с. 71—75.
18. Коррозия и защита судов. / Т. В. Трактирова, И. А. Винокурова, Д. В. Федина, В. М. Белов — Л., Судостроение, 1982, 27—29 с.
19. Котик Ф. И. Ускоренный контроль электролитов, растворов, расплавов: Справочник. М.: Машиностроение, 1978. 191 с.
20. Лайнер В. И. Защитные покрытия металлов. М.: Metallurgia, 1974. 384 с.
21. Маиенко В. П. Исследование возвратно-струйного хромирования применительно к восстановлению и упрочнению автотракторных деталей. Кишинев: КСХИ, 1973. 19 с.
22. Михайлов А. А. Обработка деталей с гальваническими покрытиями. М.: Машиностроение, 1981. 143 с.
23. Михайлова А. А., Немченко Н. Л., Михайлова Л. К. Влияние хрома, легированного титаном, на физико-механические свойства высоко-

прочных сталей.— В кн.: Твердые износостойкие гальванические покрытия. М.: МДНТП, 1980, с. 41—44.

24. Молчанов В. Ф., Постовойтенко В. В., Севастьянов В. Б. Опыт работы промышленных предприятий по усовершенствованию процессов хромирования. Киев: Знание, 1978, 29 с.

25. Неловский Н. М. Автоматизация и механизация в цехах металлопокрытий. В кн.: Совершенствование технологии гальванических процессов. Киров: Знание, 1980, с. 109—110.

26. Немченко Н. Л., Михайлова А. А., Сукова О. И. Исследование возможности осаждения хромовых покрытий, легированных титаном.— В кн.: Твердые износостойкие гальванические покрытия. М.: МДНТП, 1980, с. 38—40.

27. Паикратов С. М., Пласкеев Е. В., Батраков В. П. Хромирование с применением тока с прямым импульсом.— В кн.: Современная технология хромирования. Л.: ЛДНТП, 1976, с. 18—25.

28. Петров Ю. Н., Косов В. П., Стратулат М. П. Ремонт авто-тракторных деталей гальваническими покрытиями. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1976, 150 с.

29. Плешаков В. В., Игнатъев Р. А. Оптимизация процесса электролитического хромирования.— В кн.: Твердые износостойкие гальванические покрытия. М.: МДНТП, 1980, с. 111—116.

30. Приборы для неразрушающего контроля изделий и материалов: Номенклатурный каталог. М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1981, 79 с.

31. Разработка саморегулирующих добавок к электролитам хромирования./ В. В. Старовойтов, Н. К. Зверева, В. В. Орленко, В. И. Данилов, М. А. Лошкарёв. В кн.: Новая технология гальванических покрытий. Киров: ЦНТИ, 1974, с. 122—123.

32. Руководство к проектированию отопления и вентиляции предприятий машиностроительной промышленности: Гальванические и травильные цеха. М.: Минмонтажспецстрой ЦБНТИ, 1980, 20 с.

33. Рябой А. Я., Соловьева З. А. Влияние условий хромирования на наводороживание основы.— В кн.: Коррозия и защита металлов. Пермь, 1979, с. 117—118.

34. Рябой А. Я., Брондз Л. Д. Повышение ресурса авиационных деталей из высокопрочных сталей. М.: Машиностроение, 1978, 101 с.

35. Соловьева З. А., Кудрявцев В. Н. Изучение наводороживания стали при электролитическом хромировании/ Тр. III Междунар. конф. по проблеме СЭВ «Разработка мер защиты металлов от коррозии», т. 4. Варшава, 1980, с. 123—126.

36. Солодкова Л. Н., Соловьева З. А. Изучение равномерности распределения хрома при осаждении из хромовокислых разбавленных электролитов.— Электрохимия, 1981, в. 11, с. 1668—1671.

37. Техника борьбы с коррозией/ Пер. с польск.; Под ред. А. М. Сухотина. Л.: Химия, 1978, 304 с.

38. Типаж оборудования для нанесения гальванических, химических и анодно-оксидных покрытий на 1981—1985 гг. М.: ЦНИИТмаш, 1980, 26 с.

39. Типовой проект организации труда на рабочем месте гальваника. М.: ЦНИИТмаш, 1979, 40 с.

40. Ток Л. Д., Игнатъев В. И., Шевякова Л. Г. Сплавы на основе хрома с повышенными физико-механическими свойствами.— В кн.: Износостойкие антифрикционные и защитно-декоративные металлические покрытия. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1980, с. 1—4.

41. Федотьев Н. П., Вячеславов П. М., Бардин В. В. Хромовые электролиты с добавкой борной кислоты и окиси магния. Л.: ЛДНТП, 1965, 11 с.

42. Шлугер М. А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин. М.: Машгиз, 1961, 140 с.

43. Электролит для осаждения сплава хром — ванадий с добавлением хлорамини Б./М. А. Шлугер и др.— В кн.: Твердые износостойкие гальванические покрытия. М.: МДНТП, 1980, с. 3—6.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
I. Основы процесса хромирования	4
1. Общие сведения	—
2. Катодный процесс	—
3. Анодный процесс	7
4. Электролиты для хромирования	8
5. Хромирование при движении электролита	21
6. Хромирование с применением нестационарного тока	25
7. Анодная обработка хрома	30
8. Методы повышения равномерности покрытия	33
II. Свойства электролитических хромовых покрытий	37
9. Физико-химические свойства и структура	—
10. Механические свойства хромовых покрытий	39
11. Влияние хромирования на механические свойства основного металла	44
12. Химическая стойкость и защитная способность хро- мовых покрытий	53
13. Обозначение покрытий	54
III. Технология хромирования	55
14. Подготовка деталей	—
15. Хромирование	58
16. Обработка деталей после хромирования	60
17. Контроль покрытий	61
18. Основные дефекты хромовых покрытий	63
19. Удаление покрытия	—
20. Приготовление и корректирование электролита	66
21. Ускоренный контроль электролита	67
22. Основное оборудование	68
IV. Практическое применение хромирования	72
23. Защитно-декоративные покрытия	73
24. Защитные покрытия	76
25. Износостойкие покрытия	80
26. Вопросы повышения экономичности при хромирова- нии	91
27. Охрана труда и техника безопасности	94
Список литературы	97