

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УМК 620.193.16.004.624

Н. М. Вихров,
д-р техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

В. А. Голицын,
канд. техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ВЛИЯНИЕ ПРОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ХРОМИРОВАНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ СТАЛИ

EFFECT OF THE CHROMIUM FLOW ELECTROPLATING ON THE FATIGUE STRENGTH OF THE STEEL

В статье обсуждается вопрос влияния вынужденной конвекции электролита при электроосаждении хрома на предел выносливости стали.

In the article are discussing the question of the influence of forced convection of the electrolyte in the electrodeposition of chromium on the fatigue strength of steel.

Ключевые слова: электроосаждение, хромирование, вынужденная конвекция, усталостная прочность.

Key words: electrolytic chrome plating, forced convection of the electrolyte, fatigue strength.

В ОПРОСУ влияния хромовых покрытий на предел выносливости металлов посвящено достаточно много работ [1–10]. Однако многие стороны этой проблемы остаются невыясненными, а многочисленные экспериментальные данные получают самую различную интерпретацию.

Все исследователи в большей или меньшей степени приходят к согласию, что хромирование в зависимости от состава электролита, режимов электролиза, толщины покрытия снижает предел выносливости стали на 20–70 % по сравнению с пределом выносливости стали без покрытия. В связи с тем, что при определении влияния хрома на предел выносливости деталей не всегда учитываются такие важные факторы, как структура, физико-механические свойства хромовых покрытий, состояние поверхности основного металла и покрытия, методы обработки деталей перед нанесением покрытия и после хромирования, объяснение указанного снижения усталостной прочности принимает различные субъективные трактовки.

К неясным аспектам вопроса можно отнести: влияние принудительной циркуляции электролита, наводороживания, внутренних напряжений, структуры хромовых покрытий и других свойств на предел выносливости.

Привыкли считать, что если твердое хромирование значительно увеличивает сопротивление изнашиванию стальных деталей, однако в некоторых случаях оно может вызвать их поломку. Какой бы ни была природа поломки (повреждения), обычно принято считать, что повреждение вызвано тем, что осадок хрома поглощает водород, и поведением основного металла в процессе электролитических операций. Для предотвращения разрушения детали часто подвергаются корректировочной обработке (дегазации) и вообще термической обработке в тех случаях, когда опасаются возможности преждевременной поломки в необычных условиях применения. Такое общепринятое мнение отражает лишь приблизительно ту совокупность явлений, которые в действительности являются опасными и применение которых может привести к ошибкам. Опыт показывает, что

необходимо четко различать следующие явления: хрупкость электролитического осадка хрома и поведение хромированной стали при постоянных нагрузках (водородная хрупкость); поведение хромированной стали при переменных нагрузках (предел выносливости).

Современные представления о причинах снижения усталостной прочности металлов после нанесения гальванических покрытий базируются на следующем механизме [1]. Если усталостная прочность электроосажденного металла ниже усталостной прочности стали, то в условиях растягивающего циклического напряжения в покрытии может возникнуть усталостная трещина при напряжении ниже предела выносливости стали. Такая трещина будет действовать подобно надрезу, в результате чего на поверхности основного металла будет создаваться высокая концентрация напряжений. Как только уровень локальных растягивающих напряжений превысит предел усталости стали, трещина начнет распространяться в основной металл и вызовет усталостное разрушение. Данные многих исследователей подтверждают действенность рассмотренного выше механизма, поскольку предел усталости большинства конструкционных сталей значительно превышает значения, полученные для электролитического хрома. В связи с этим следует различать влияние микроскопических трещин в покрытии, образующихся в процессе электроосаждения хрома, от влияния трещин, которые образуются в покрытии при циклических нагрузках вследствие низкой усталостной прочности и пластичности хрома. Микроскопическая сетка трещин, имеющаяся в хромовом покрытии как в исходном состоянии, так и после термической обработки, сама по себе не может служить причиной снижения усталостной прочности основного металла, так как наличие очень большого их количества, примерно одинаковых размеров, приводит к значительному разгружающему действию этих трещин и резкому снижению отрицательного действия их как концентраторов. Трещины же в хромовом покрытии, возникающие в результате приложения циклических нагрузок, действуют как концентраторы напряжения и определяют снижение выносливости хромированной стали.

Поэтому все факторы, влияющие на механическую прочность и пластичность хрома при прочих равных условиях, будут влиять на образование трещин в хrome. К этим факторам следует отнести в первую очередь внутренние напряжения в хромовом покрытии и наводороживание, которые, в свою очередь, зависят от состава электролита, режима электролиза, вынужденной конвекции и формы тока. Структура хромовых осадков будет определяться всеми этими факторами.

Режим хромирования оказывает влияние на предел выносливости стали, при этом определяющее влияние на выносливость оказывает температура электролиза.

Очевидно, что любые внутренние растягивающие напряжения, создающиеся в покрытии, будут складываться с приложенными растягивающими напряжениями и приводить к уменьшению действительной усталостной прочности покрытия, способствуя тем самым преждевременному разрушению основного металла.

Из изложенного следует, что наиболее важными факторами, определяющими усталостную прочность деталей с гальваническими покрытиями, следует считать:

- соотношение между усталостной прочностью покрытия и основного металла;
- величину и знак внутренних напряжений, создающихся в покрытии;
- наводороживание основного металла и осадка хрома.

Кроме этих факторов, немаловажную роль играют: последующая за нанесением покрытия термическая обработка (особенно в случае хромового покрытия), толщина покрытия.

Исходя из современного уровня исследований, два параметра структуры хромовых осадков представляются наиболее характерными с точки зрения противодействия усталости — трещины и внутренние напряжения.

Систематические исследования ряда авторов [4; 8–10] убедительно показали отношения между границей предела выносливости покрытий хрома и их структурой, определяемой трещинами и внутренними напряжениями. Осуществляя электроосаждение хрома в ваннах с разным составом электролита и проведя опыты в различных температурных условиях и при различных

плотностях тока, эти авторы получили широкий ряд структур, охарактеризованных ими с точки зрения трещиноватости и внутренних напряжений.

Измеряя пределы выносливости образцов с такими покрытиями, они установили следующие зависимости: отложения с большим количеством трещин (3500 на 25,4 мм) обладают почти таким же пределом выносливости, как и нехромированная сталь; сопротивляемость усталости покрытий, имеющих 20–40 трещин на 25,4 мм, на 70–80 % меньше, чем в предыдущем случае. В классическом случае (400 трещин на 25,4 мм) это снижение будет равно 30–40 %.

Установлено, что трещиноватость осадков хрома дает хорошее представление об остаточных внутренних напряжениях. Чем больше трещиноватость покрытия, тем меньше напряжения, то есть существует линейная зависимость между остаточными внутренними напряжениями и пределом выносливости [10]. Таким образом, мы можем на основании вышеизложенного сделать заключение, что основной параметр, влияющий на предел выносливости хромированных сталей, заключается во внутренних напряжениях хромовых покрытий.

Однако противоположные результаты исследований были установлены между структурой хрома, пределом выносливости и термической обработкой хромированной стали.

Осадки хрома с большим числом трещин (предел выносливости непрокаленной стали близок к пределу выносливости нехромированной стали) после термической обработки 200 °С резко снижают предел выносливости образцов стали. Термическая обработка при 400 °С повышает предел выносливости.

Для осадков хрома со средним числом трещин (предел усталости непрокаленной стали на 20–30 % ниже предела усталости нехромированной стали) термическая обработка при 400 °С дает повышение на 10–20 %.

Для осадков хрома, почти не имеющих трещин (значительные напряжения, предел выносливости около 30 % от предела выносливости нехромированной стали) термическая обработка при 200 °С дает резкое повышение предела выносливости, значения которого сохраняются в той или иной степени при термической обработке при 300 °С.

Из исследований [3; 6] из-за отсутствия микроструктуры получаемых осадков хрома невозможно проследить вышеизложенные закономерности в зависимости от применяемых параметров режима электроосаждения и сопоставить настоящие данные.

Оценивая сущность влияния остаточных напряжений на предел выносливости стали, следует особо отметить, что отрицательная роль поверхностных остаточных напряжений, связанных с электроосаждением хрома, проявляется благодаря чувствительности металла к величине и знаку среднего нормального цикла. Увеличение среднего напряжения цикла при наличии растягивающих остаточных напряжений в основном материале при хромировании сопровождается понижением предела выносливости. Согласно С. Ф. Медведеву [7], остаточные напряжения накладываются на циклические напряжения от внешних изгибающих сил, в результате симметричный цикл напряжений превращается в асимметричный, причем величина асимметрии тем больше, чем больше по величине остаточные напряжения. При этом растягивающие остаточные напряжения должны понижать предел усталости при изгибе, а сжимающие — повышать. Очевидно, что испытания на выносливость эталонных и хромированных образцов необходимо выполнять при равенстве напряжений с учетом остаточных напряжений в основном металле после хромирования и эталонном образце.

В настоящем исследовании влияние принудительной циркуляции электролита на предел выносливости было изучено на образцах из стали 20Х ГОСТ 4543-71. Электроосаждение хромового покрытия анодно-струйным способом выполнялось стационарной в ванне универсального типа (состав, в кг/м³: хромовый ангидрид — 250, серная кислота — 2,5; CrO₃ < 5), при плотности тока 6 кА/м² и температуре электролита 328 К. Расход электролита задавался на двух уровнях — 1·10⁻⁴ и 7,2·10⁻⁴ м³/с. С целью проверки влияния на предел усталости стали 20Х, повышения плотности тока и толщины хромового покрытия были испытаны две серии образцов, хромированных анодно-струйным способом при плотности тока 10 кА/м² и температуре 328 К на толщину 50 и 100 мкм.

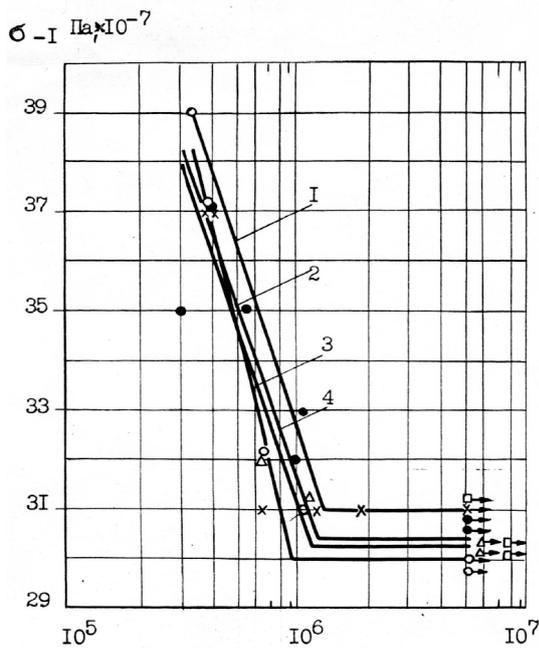


Рис. 1. Предел выносливости стали 20X, хромированной при плотности тока 6 кА/м² и температуре электролита 328 К в стационарной ванне и анодно-струйным способом.
1 — без хромового покрытия;
2 — стационарная ванна;
3, 4 — анодно-струйный способ соответственно при $Q = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

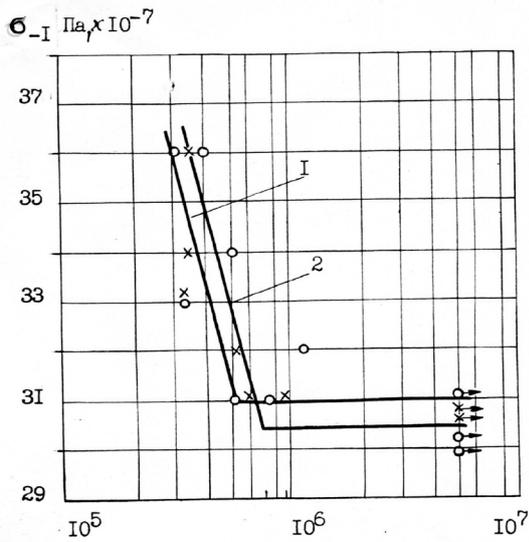


Рис. 2. Предел выносливости стали 20X, хромированной анодно-струйным способом, при плотности тока 10 А/м² и температуре 328 К:
1 и 2 — толщина осадка хрома 50 и 100 мкм соответственно

Испытания на усталость производились на машине типа НУ. Машина работает по схеме — изгиб при вращении консольных круглых образцов диаметром 12 мм с рабочей шейкой диаметром $5 \pm 0,01$ мм из нормализованной стали 20X при частоте вращения 50 с^{-1} . Расчет напряжения образца производился по стандартной формуле. В основу расчета определения напряжений при изгибе положено сечение образца без покрытия. База испытания для определения сопротивления усталости принята $5 \cdot 10^6$ циклов, что обусловлено сравнительным характером испытаний. Испытания были выполнены в соответствии с требованиями стандарта.

Результаты испытаний на сопротивление усталости стали 20X в нормализованном состоянии и хромированных на толщину 50 мкм при плотности тока 6 кА/м² и температуре электролита 328 К в стационарной ванне и анодно-струйным способом при расходе электролита $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ представлены на рис. 1.

Пределы выносливости стали 20X, хромированной при температуре 328 К и плотности тока 6 кА/м², в зависимости от толщины осадка хрома (50 и 100 мкм) представлены на рис. 2.

Полученные данные показывают, что хромирование анодно-струйным способом стали 20X в нормализованном состоянии не оказывает отрицательного влияния на предел выносливости по сравнению с гальванической обработкой ее хромированием в стационарной ванне. Влияние увеличения плотности тока и толщины осадка хрома также не превышает ошибки эксперимента.

Весьма важным для последующих рассуждений являются сведения, которые могут быть получены при обследовании сетки трещин в хромовом осадке. На рис. 3 и 4 представлены микрофотографии поперечного сечения образцов, хромированных на указанных режимах.

Имеющиеся данные [3; 5–8] о влиянии электроосажденного хрома в условиях вынужденной конвекции на усталостную прочность стали в различных электролитах по составу показывают в общем положительное влияние хромирования в проточном электролите на предел выносливости стали. Это объясняется не столько эффектом вынужденной конвекции, сколько частным характером выявленных закономерностей и не учетом влияния параметров режима хромирования на структуру хромовых покрытий.

Микроструктура осадков хрома, электроосажденного анодно-струйным способом, имеет более частую сетку трещин по сравнению с покрытием, полученным стационарным методом.

a

б



Рис. 3. Микрофотографии (x300) микроструктуры осадков хрома в поперечном сечении, электроосажденных в стационарной ванне (*a*) и анодно-струйным способом (*б*), при плотности тока 6 кА/м^2 и температуре 328 К

a

б

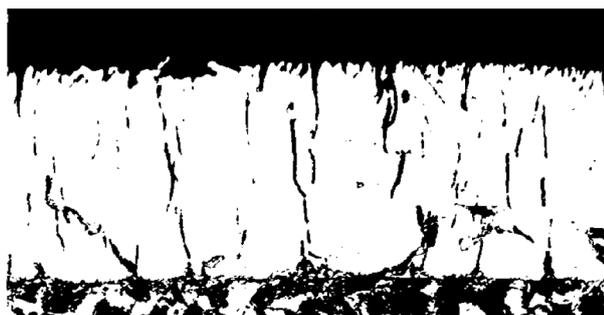


Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения хромового осадка (x300), электроосажденного при температуре 328 К и плотности тока 10 кА/м^2 : *a* — стационарная ванна; *б* — анодно-струйный способ

a

б

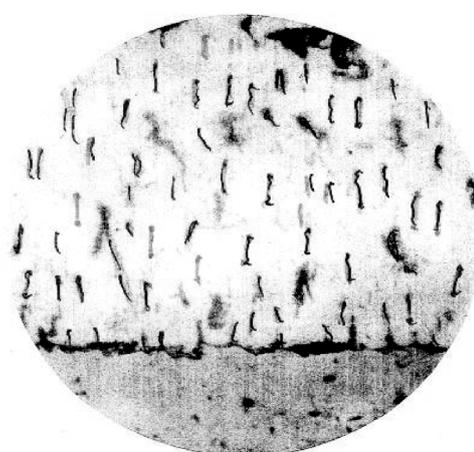
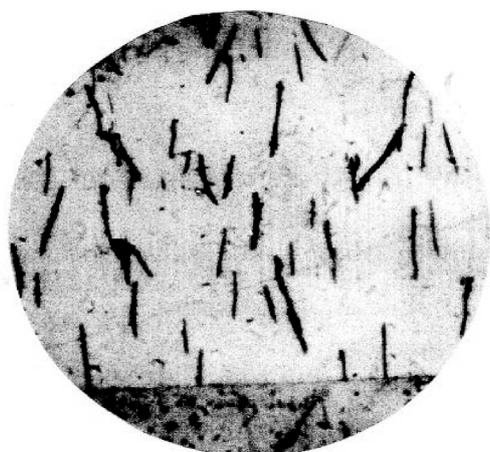


Рис. 5. Микроструктура поперечного сечения осадков хрома (x600), электроосажденных из стационарной универсальной сульфатной ванны (*a*) и в саморегулирующейся сульфатно-кремнефторидной ванне (*б*), при температуре 328 К и плотности тока 6 кА/м^2 [4]

На рис. 5 для сравнения представлены микрофотографии структуры осадков хрома в поперечном сечении образцов при увеличении $\times 600$, полученные в универсальном сульфатном и саморегулирующемся сульфатно-кремнефторидном электролитах при плотности тока 6 кА/м^2 и температуре 328 К [4]. Сравнение структур осадков хрома показывает, что саморегулирующая сульфатно-кремнефторидная ванна дает осадки с большим количеством включений (трещин), чем из универсальной ванны. Включения меньше по длине и ширине. Данные испытаний предела выносливости стали 45, полученные в работах [4; 8], не установили значимого различия пределов выносливости для образцов, хромированных в универсальном сульфатном электролите и в саморегулирующемся сульфатно-кремнефторидном электролите.

Таким образом, изменение структуры осадков хрома применением вынужденной циркуляции электролита и другого состава электролита при электроосаждении хрома на образцы из стали разного состава (сталь 20Х и 45) при испытании на машинах разного типа и частотах вращения показали одинаковые результаты. То есть более частая сетка трещин в осадках хрома не изменила предел выносливости стали. Однако результаты ряда других исследователей показали противоположные результаты [7]. Отсутствие данных о структуре хромовых покрытий в этих исследованиях не позволяет дать какую-либо оценку влияния трещиноватости хромовых покрытий на предел выносливости.

В работе В. И. Барановского [3] были выполнены исследования предела выносливости стали 45 (нормализованной) в широком диапазоне изменения плотности тока и температуры электролита. Хромирование осуществлялось в стандартном сульфатном электролите с использованием разных по конструкции устройств, обеспечивающих циркуляцию электролита в межэлектродном зазоре. Электроосаждение было выполнено на толщину хрома от $0,05$ до $0,2 \text{ мм}$ при плотности тока $4,0\text{--}12 \text{ кА/м}^2$, температуре $323\text{--}343 \text{ К}$, скорости прокачки электролита $1,2 \text{ м/с}$. Предел выносливости стали 45 (эталон $\sigma_{-1} = 285 \text{ МПа}$). В упомянутой работе были выполнены в сопоставимых условиях исследования предела выносливости стали 45 с хромовыми покрытиями, полученными в спокойном электролите, в проточном электролите, анодно-струйным, возвратно-струйным, воздушнo-струйным и эжекторным способами [3]. Режимы нанесения покрытий при всех перечисленных способах хромирования с принудительной циркуляцией электролита, по мнению автора, были строго идентичными и составляли: температура электролита — 333 К , плотность тока — 12 кА/м^2 , скорость истечения электролита — $1,2 \text{ м/с}$. Хромирование в стационарном электролите осуществлялось при температуре электролита 328 К и плотности тока 5 кА/м^2 . Толщина слоя хрома была принята во всех сериях равной $0,2 \text{ мм}$ на сторону.

Результаты исследования показали, что предел выносливости образцов, хромированных приведенными технологическими приемами, практически незначительно различается между собой и в среднем на 25% выше, чем у образцов с покрытиями в спокойном электролите.

Предел выносливости стали 45, хромированной при температуре 325 К и плотности тока $4,0; 6,0; 8,0; 12,0 \text{ кА/м}^2$ на толщину хрома $0,1 \text{ мм}$, изменялся от 275 до 285 МПа . То есть эти результаты исследования показали также слабое влияние толщины хрома и плотности тока на предел выносливости стали 45. Таким образом, данные исследования согласуются с результатами наших исследований о влиянии вынужденной циркуляции электролита на предел выносливости стали.

В исследовании В. П. Манаенко [5] установлено, что каждому значению температуры электролита соответствует определенная плотность тока, при которой можно получить максимальное значение предела выносливости. В общем, высокое значение предела выносливости смещается в область более низких температур электролита и плотности тока. Так, при значениях температура электролита 323 К , плотность тока 6 кА/м^2 предел выносливости соответствовал $277,5 \text{ МПа}$; при 328 К и 10 кА/м^2 — 270 МПа и 333 К и 12 кА/м^2 — 270 МПа .

С целью установления связи между пределом выносливости стали, режимными параметрами электроосаждения и микроструктурой осадков хрома нами были получены микрофотографии при увеличении $\times 300$ поперечного сечения осадка хрома в диапазоне температур от 318 до 338 К и плотности тока от 3 до 20 кА/м^2 (табл. 1). Микрошлифы были электролитически обработаны в 10% -ном растворе NaOH при напряжении 3 В в течение 20 с . Сопоставляя структуру осадков хро-

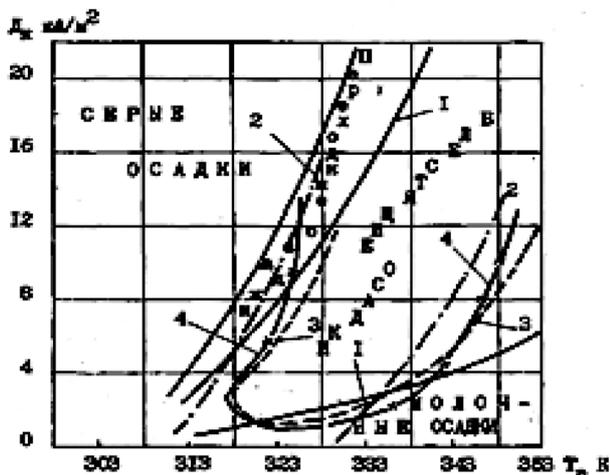


Рис. 6. Диаграмма расположения осадков хрома различного типа в зависимости от режима электроосаждения:
 1 — в универсальной ванне анодно-струйным способом;
 2 — в универсальной ванне стационарным способом;
 3 — в саморегулирующейся сульфатно-кремнефторидной ванне стационарным способом;
 4 — в саморегулирующейся сульфатно-кремнефторидной ванне с добавкой бихромата калия стационарным способом

ма, полученную при одной и той же плотности тока и при различных температурах, можно проследить характер ее изменения (см. рис. 6 и табл. 1).

Осадки серого цвета имеют однородную структуру с единичными трещинами и пронизывают весь слой хромового покрытия (табл. 1).

Осадки блестящего цвета имеют единичные и многочисленные трещины, увеличивающие свою плотность с уменьшением температуры. Трещины с понижением температуры уменьшают свою длину и ширину (табл. 1).

Осадки молочного вида, получаемые при температурах выше 338 К и низких плотностях тока, характеризуются большим количеством коротких и широких включений (рис. 6).

Покрyтия хрома, получаемые в переходной зоне от серых к блестящим осадкам, характеризуются дендритным формированием осадка и многочисленными трещинами разной ориентации (табл. 1).

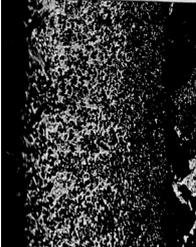
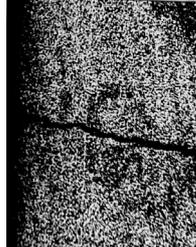
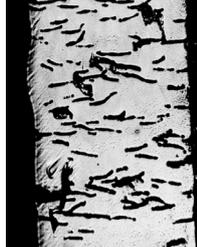
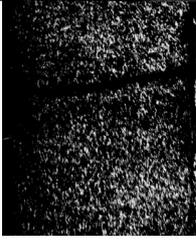
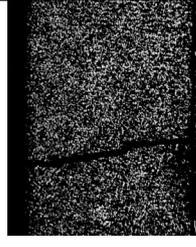
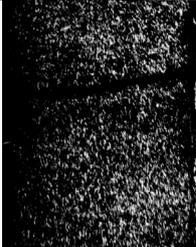
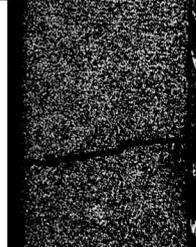
Систематические исследования [3; 5] предела выносливости хромовых покрытий в широком диапазоне режимов осаждения позволяют качественно связать режимы осаждения со структурой хромовых покрытий, полученных в наших исследованиях.

Таблица 1

Микроструктура поперечного сечения осадков хрома при увеличении x300

3 кА/м ² — 318 К	323 К	328 К	333 К	338 К
5 кА/м ² — 318 К	323 К	328 К	333 К	338 К

Таблица 1
 (Окончание)

				
8 кА/м² — 318 К	323 К	328 К	333 К	338 К
				
11 кА/м² — 318 К	323 К	328 К	333 К	338 К
				
15 кА/м² — 318 К	323 К	328 К	333 К	338 К
				
20 кА/м² — 318 К	323 К	328 К	333 К	338 К

Структуры осадков хрома, полученных на режимах: 323 К и 5 кА/м²; 328 К и 8 кА/м²; 338 К и 15 кА/м² и на режимах [5]: 323 К и 6 кА/м²; 328 К и 10 кА/м²; 333 К и 12 кА/м², имеют качественное сходство, что и определило получение одинаковых значений пределов выносливости усталостных образцов из стали 45.

В процессе электролиза при хромировании происходит выделение значительного количества газообразного водорода и нагрев детали током. Увеличение расхода электролита снижает газонаполнение межэлектродного зазора и снижает температуру прикатодного слоя за счет интенсивного тепло- и массообмена. При скорости электролита выше 0,8 м/с происходит стабилизация температуры электролита в межэлектродном зазоре и, как следует из представленных в работах [3; 5] данных, предел выносливости не изменяется. Наибольшее влияние на предел выносливости оказывает температура электролита, особенно выше 333 К. Даже колебание температуры электро-

лита ± 276 К [9] оказывает такое же действие на предел выносливости, как увеличение температуры на 283 К. Качество поверхности покрытий так же изменяется с их толщиной, плотностью тока и температурой. Этот параметр, как правило, не фиксируется при исследованиях предела выносливости хромированных образцов. Все эти факторы вносят свои изменения в структуру осадков хрома.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Исследования, выполненные с использованием различных технологических приемов, разных составов электролитов, методов обработки до и после электроосаждения хрома, разных форм тока, различных толщин осадков хрома, без демонстрации их микроструктуры не позволяют должным образом оценить влияние режимов получения покрытий на предел выносливости материала детали и сопоставить результаты различных исследований.

Для получения качественных результатов исследований предела выносливости гальванически обработанных металлов необходима единая методика проведения исследования.

Список литературы

1. *Бронз Л. Д.* Технология и обеспечение ресурса самолетов / Л. Д. Бронз. — М.: Машиностроение. 1986. — 184 с.: ил.
2. *Безносков А. Е.* К вопросу о причинах снижения усталостной прочности хромированной стали 45 / А. Е. Безносков // Тр. — Кишинев: Кишиневский с/х ин-т им. М. В. Фрунзе, 1970. — Т. 75. — С. 68–72.
3. *Барановский В. И.* Исследование возможности уменьшения потерь усталостной прочности электролитически хромированной стали применительно к восстановлению и упрочнению деталей автомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Барановский. — Одесса: ОПРИ. — 28 с.
4. *Вороницын И. С.* Исследования механических свойств хромовых покрытий, применяемых для упрочнения и восстановления деталей машин / И. С. Вороницын. — Л.: ЛАТТ, 1963. — 210 с.
5. *Манаенко В. П.* Исследование электролитического возвратно-струйного хромирования применительно к восстановлению и упрочнению автотракторных деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. П. Манаенко. — Кишинев: КСХИ, 1973. — 20 с.
6. *Медведев С. Ф.* Циклическая прочность металлов / С. Ф. Медведев. — М.: Машгиз, 1961. — 304 с.
7. *Молчанов В. Ф.* Эффективность и качество хромирования / В. Ф. Молчанов. — Киев: Техника, 1979. — 229 с.
8. *Шлугер М. А.* Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин / М. А. Шлугер. — М.: Машгиз, 1961. — 140 с.
9. *Morisset P.* Chromage dur et decorative / P. Morisset. — P., 1961.
10. *Wiegand H.* Uber das Duer festigkeitsverhal ten tines in zwei verschiedenen / H. Wiegand, H. R. Kaiser.