

Аннотация

Использование явления избирательного переноса для повышения стойкости пар трения к водородному изнашиванию

В работе дан краткий обзор явлений водородного изнашивания и избирательного переноса, определяющих современный этап развития триботехники.

Abstract

About perspective directions in a science about friction

In work the brief review of the phenomena of hydrogen wear process and the selective carry, determining the present stage of development of a science about friction is given.

УДК 621.357.7: 631.3.004.67(075.3)

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Бобанова Ж.И., д.х.н., в.н.с.; **Петренко В.И.**, д.т.н., в.н.с.

Институт прикладной физики АН Молдовы, г. Кишинев, Молдова

Игнатьков Д.А., д.т.н., с.н.с.

Белорусский государственный аграрный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

Электролитическое железнение находит широкое применение для восстановления и упрочнения сельскохозяйственных машин и автомобилей [1, 2]. Расширение номенклатуры восстанавливаемых деталей, изготовленных из легированных сталей, чугуна, алюминия, подвергающихся высоким механическим и тепловым нагрузкам, воздействию агрессивных сред, требует применения покрытий с более высокими физико-механическими свойствами.

Примером могут служить детали цилиндро-поршневой группы, которые работают при повышенных температурах и давлениях. Их износостойкость может быть увеличена за счет повышения твердости рабочих поверхностей, сопротивления материала пластическим деформациям, микроконтактному схватыванию и механическому повреждению [3]. Электролитические сплавы на основе железа имеют более высокие характеристики по сравнению с чистым железом.

Работа посвящена изучению морфологии и фазо-структурных особенностей осадков железа, влияния гидродинамических условий на выход по току и скорость осаждения железных покрытий, а также физико-механических свойств сплавов железа, работающих в экстремальных условиях (при повышенных нагрузках, недостатке смазочного материала).

Методика эксперимента. Железные покрытия осаждали из хлористого электролита (№ 1) состава, г/л: FeCl_2 – 500, HCl – 0,5 – 1,0. (pH – 0,8 – 1,0, t – 40 – 50°C, i_k – 20 А/дм²); железо-никелевые (8 – 10% Ni) – из сульфатно-хлоридного электролита (№ 2), г/л: FeCl_2 – 500, NiSO_4 – 8 – 100, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ – 4 – 6. (pH – 0,8, t – 40°C, i_k – 50 А/дм²); железо-кобальтовые покрытия (20 – 22% Co) – из электролита (№ 3), г/л: – FeCl_2 – 400 – 500, CoSO_4 – 75 – 100. (pH – 0,8 – 1,0, t – 50 °C, i_k – 20 – 30 А/дм²). Также осаждали железные

покрытия из смешанного электролита (№4), г/л: $\text{FeCl}_2 - 200$, $\text{FeSO}_4 - 200$ ($\text{pH} = 0,8$, $i_k = 20$ $\text{A}/\text{дм}^2$, $t - 95^\circ\text{C}$). Подложкой служили материалы: углеродистая сталь, азотированная сталь 38ХМЮА. Для хорошего сцепления осадков с поверхностью подложки проводили предварительную анодную обработку.

Морфологические, кристаллографические и фазово-структурные особенности осадков железа исследовали методами растровой электронной микроскопии в режимах отраженных, поглощенных и вторичных электронов (микроскоп TESLA-BS 340) и рентгеновской дифрактометрии (HZG) в геометрии скользящего падения рентгеновского пучка. Химический состав пленок определялся с помощью рентгеновского микроанализатора (EDS – детектора).

Выход по току (ВТ) определяли кулонометрическим методом. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3. Определение остаточных напряжений производили методом гибкого катода [4]. Оценку противозадирных свойств производили по двум показателям: $P_{\text{кр}}$ – критическое контактное давление, при котором появлялись признаки заедания, МПа, $t_{\text{заед}}$ – температура, при которой происходило заедание поверхностей трения, $^\circ\text{C}$.

Износостойкость и антифрикционные свойства сплавов на основе железа исследовали также на машине трения СМД-2 по схеме ролик-колодка при скорости относительно скольжения 2,3 м/с. Износ покрытий определяли весовым методом. Испытания проводили при нагрузке 2,5, 5,0, 10,0, 12,5 МПа.

Экспериментальные результаты. Размер зерен железа, полученных из сернокислого электролита, колеблется от 0,1 до 10 мкм в зависимости от условий осаждения. При высоких температурах $t = 60-80^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 1,6-1,8$ и $i_k = 5$ $\text{A}/\text{дм}^2$ субзеренные границы полигонального типа состоят из ряда краевых дислокаций. При более высоких плотностях тока осаждаются мелкокристаллические осадки с большим числом субзерен, которые включают плотные скопления дислокаций. Такие границы являются препятствием для сдвиговых деформаций, вследствие чего осадки железа приобретают высокую прочность.

Обнаружено наличие переходного слоя между покрытием и подложкой, обусловленного эпитаксиальным ростом электролитического железа. В нем кристаллы осаждаемого металла воспроизводят структуру кристаллов основы. Как следует из рисунка 1, тонкая линия, разделяющая ферритные зерна двух фаз, во многих местах является линией раздела кристаллов, составляющих единое целое, копируя структуру подложки.

Структура переходного слоя зависит от начальной плотности тока, температуры электролита, а также физико-химических свойств подложки. Эпитаксиальный переходный слой образуется при осаждении железных покрытий при высоких температурах электролита и низких начальных i_k (~ 1 $\text{A}/\text{см}^2$).

В случае, когда размеры решетки основания и покрытия различаются менее чем на 15%, в начальной стадии осаждения покрытий создается кристаллическая решетка с постепенным увеличением их шероховатости.



Рисунок 1 – Микроструктура железного осадка, полученного из хлористого электролита $\text{FeCl}_2 - 500$ г/л, $\text{pH} = 1,2$, $t = 100^\circ\text{C}$, $i_k = 100$ $\text{A}/\text{см}^2$

Структура характеризуется большими размерами областей когерентного рассеяния и низкой плотностью дислокаций. Существует корреляция между характером дефектности структуры и величиной прочности сцепления.

Прочносцепленные с основой осадки железа обладают столбчатой структурой и малой микротрещиноватостью. Микроструктура неотожженного железа характеризуется наличием кристаллитов с перпендикулярным расположением к поверхности основы.

Зависимость размера блоков мозаики от скорости потока электролита имеет максимум при 2,5 м/с (рисунок 2). Плотность дислокаций проходит через минимум при этой же скорости электролита. Возрастающая ветвь на кривой (увеличение размеров блоков мозаики) связана со снижением концентрационной поляризации вследствие интенсификации процессов переноса. Изменение гидродинамических условий в электрохимической системе позволяет резко увеличить скорость осаждения и управлять качеством образующегося осадка. Закономерности влияния скорости потока электролита на ВТ металла, скорость осаждения h и микротвердость осадков H_μ подтверждает этот вывод (рисунок 3).

Увеличение скорости потока от нуля до 3 м/с вызывает возрастание ВТ до 98%, а скорости осаждения до 1300 мкм/час. Дальнейшее повышение скорости потока до 5 м/с не влияет на скорость роста осадка. Повышение ВТ и h связано с перемешиванием электролита в прикатодной зоне, уменьшением толщины диффузионного слоя, что приводит к возрастанию скорости потока ионов. При этом концентрационная поляризация уменьшается, что обуславливает уменьшение перенапряжения разряда ионов водорода. Непрерывная подача свежих порций электролита в зону электролиза способствует быстрому отводу газов, выделяющихся в процессе электролиза, повышению электропроводности и увеличению ВТ.

Исследование зависимости остаточных напряжений железных покрытий от температуры и плотности тока показали, что с ростом t остаточные напряжения изменяются по кривой с ярко выраженным максимумом при 40–50°C, а зависимость остаточных напряжений от i_k имеет максимум при 20–25 А/дм². Значения остаточных напряжений в железных покрытиях, полученных из хлористых электролитов при $i_k = 30$ А/дм², достигают 690–760 МПа. Величины остаточных напряжений железных покрытий в зависимости от толщины показаны в таблице 3.

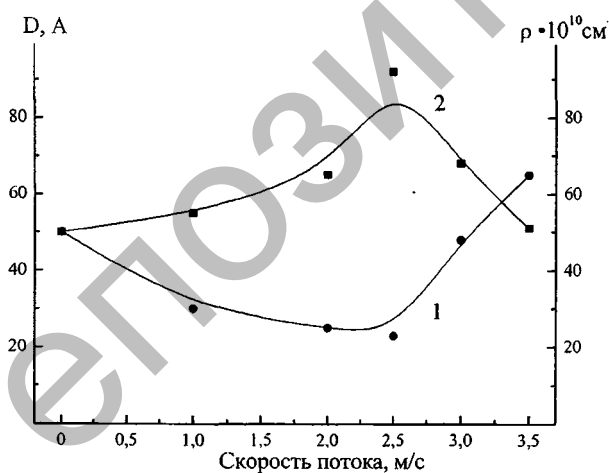


Рисунок 2 – Влияние скорости потока электролита на размер блоков мозаики (1) и плотность дислокаций (2) в железных покрытиях, полученных в электролите FeC₂ – 500 г/л; рН = 0,9; t = 60 °С при $i_k = 70$ А/дм²

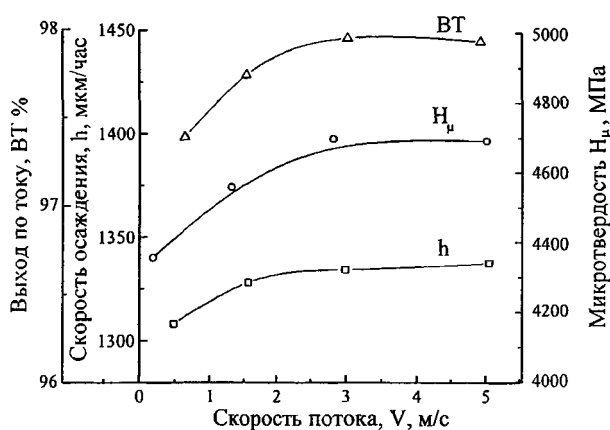


Рисунок 3 – Влияние скорости потока электролита на ВТ, скорость осаждения железа (h) и микротвердость осадков (H_μ) $i_k = 10$ А/дм², t = 95 С, рН = 1,2

Величина остаточных напряжений железа зависит от толщины покрытия. В тонких слоях эти напряжения имеют высокие значения, но с ростом толщины они уменьшаются до определенного значения и с дальнейшим увеличением толщины покрытия не изменяются.

В покрытиях толщиной 5-7 мкм, полученных при $i_k = 10-40 \text{ А/дм}^2$, остаточные напряжения увеличиваются с ростом i_k , а в более «толстых» (≥ 20 мкм) напряжения падают с увеличением i_k . С повышением t электролита от 20 до 60°C напряжения в слоях железа толщиной от 3 до 7 мкм снижаются. С увеличением толщины покрытия остаточные напряжения растут с температурой. С ростом рН электролита от 0,3 до 1,8 напряжения покрытий толщиной от 3-7 мкм падают. Для покрытий железа с толщиной 20 мкм и выше остаточные напряжения проходят через максимум, который соответствует рН = 1.1 (таблица 1).

Таблица 1 – Остаточные напряжения электролитического железа (электролит №4), МПа

Толщина, мкм	Режим									
	$t = 40^\circ\text{C}, \text{pH} = 1,1$				$i_k = 20 \text{ А/дм}^2, \text{pH} = 1,1$		$t = 40^\circ\text{C}, i_k = 20 \text{ А/дм}^2$			
	Плотность тока, А/дм ²				Температура раствора, °С		рН раствора			
	10	20	30	40	20	60	0,3	0,6	1,5	1,6
0	203	284	346	382	310	256	530	340	190	148,5
3	155	231	280	332	270	200	420	454	171	140
5	122,5	172	240	280	210	151	340	210	162	134
7	104,5	142	158	220	145	137	200	160	150	128
10	82,5	110	95	160	97,5	126	115	132,5	140	122
15	67	75	60	50	51	117	46	66	125	111
20	51	62	31	20	36	114	30	43	114	104,5
30	41	51	20	5,5	30	110	7,5	20	98,5	88,5
40	36,2	49	19,8	5,35	29	104	-	7	88	73,4
50	33,4	51	20,5	5,7	29	114	-	3,5	83	68,5
60	34,2	52	21,1	6,15	30,5	120	-	-	80	66,5
70	36,6	53,7	21,7	6,29	31	132	-	-	78	65

Представляет интерес получение электролитических сплавов на основе железа с улучшенными характеристиками. Изучены зависимости состава сплавов железа, их физико-механических свойств от состава электролитов, режимов электролиза. Микротвердость железа и сплавов железа (с 6,0 – 7,5% Ni и с 6,0 – 8,0% Co) зависит от условий электролиза и определяется изменением субмикроструктуры и структуры осадков, размерами кристаллитов, в результате включения легирующих компонентов в решетку основного металла и соосаждением гидроокисных соединений.

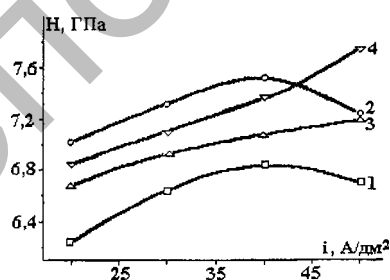


Рисунок 4 – Зависимость H_c Fe (1, 2) и сплава Fe-Ni (3, 4) от i_k . Электролит: 1 – № 1; 2 + 5 г/л $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$; 3 + 40 г/л NiSO_4 ; 4 + 40 г/л NiSO_4 + 5 г/л $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$

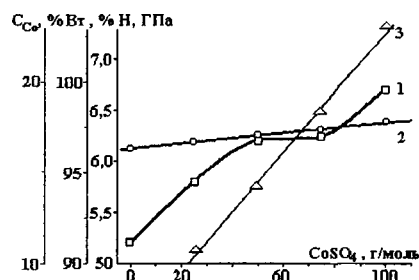


Рисунок 5 – Зависимость H_c (1), ВТ (2), содержания кобальта (3) в сплаве железо-кобальт от концентрации сернокислого кобальта

Микротвердость покрытий, полученных из хлористого электролита железнения № 1 с добавкой сульфата никеля и тартрата калия-натрия (рисунок 4, *кр.* 2 – 4) выше H_{μ} железа, полученного из электролита без добавок (рисунок 4, *кр.* 1). Наибольшее влияние на повышение H_{μ} оказывает присутствие в растворе сегнетовой соли. С увеличением i_k микротвердость осадков железа, полученных из электролита с добавкой 5 г/л калия-натрия виннокислого, проходит через максимум (рисунок 4, *кр.* 2). При добавлении 40 г/л сульфата никеля к этим двум растворам сплава Fe-Ni растет пропорционально i_k .

Микротвердость сплава Fe-Co при увеличении содержания CoSO_4 в электролите растет, ВТ сплава незначительно повышается (96,4 – 97,8%), а содержание кобальта растет от ~11 до 22% (таблица 2, рисунок 5). При увеличении i_k от 5 до 40 А/дм^2 H_{μ} сплава Fe-Co проходит через максимум при $i = 20 \text{ А/дм}^2$ ($H_{\mu} = 6,6 \text{ ГПа}$) (рисунок 6, *кр.* 1, таблица 2), что, вероятно, связано с появлением микротрещин на поверхности покрытия за счет больших остаточных напряжений [4]. Наблюдается такая же зависимость микротвердости покрытий железо-кобальт от температуры (рисунок 6, *кр.* 3). ВТ сплава растет до $i = 20 \text{ А/дм}^2$, при дальнейшем увеличении плотности тока ВТ сплава меняется незначительно. Рост рН раствора от 0,4 до 1,2 приводит к увеличению микротвердости сплава Fe-Co (рисунок 6, *кр.* 2) и выхода по току до 101,2% (таблица 2), что, вероятно, обусловлено включением гидроксидов железа и кобальта в покрытие.

Таблица 2 – Влияние условий электролиза на ВТ и H_{μ} сплава железо-кобальт

CoSO_4 , г/л	i_k , А/дм^2	t , °С	рН	ВТ %, сплава	ВТ %, Fe	ВТ %, Co	H_{μ} , ГПа
1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	50	0,8	96,4	100	0	5,20
25	20	50	0,8	96,7	89,2	10,8	5,80
50	20	50	0,8	97,0	85,7	14,3	6,30
75	20	50	0,8	97,3	81,4	18,6	6,50
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,60
100	1	50	0,8	84,8	69,8	30,2	–
100	3	50	0,8	85,2	72,0	28	–
100	5	50	0,8	88,0	74,8	25,2	–
100	10	50	0,8	95,2	76,0	24,0	6,00
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,66
100	30	50	0,8	98,7	79,5	20,5	6,40
100	40	50	0,8	98,8	80,4	19,6	6,05
100	20	50	0,4	88,4	79,0	21,0	6,30
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,60
100	20	50	1,2	101,2	81,0	19,0	7,00
100	20	40	0,8	97,4	83,2	16,8	6,40
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,60
100	20	60	0,8	98,6	81,4	18,6	5,85

Характер износа электролитического железа и сплавов на его основе различен. С увеличением удельного давления до 10,0 – 12,5 МПа износ электролитического железа уменьшается, а затем начинает возрастать (рисунок 7, *кр.* 2). В области нагрузок 2,5 – 12,5 МПа наилучшую износостойкость имели покрытия Fe-Co: при нагрузке 2,5 МПа их износ в 2,5 раза меньше, чем у железа. При нагрузке 5,0 МПа износ Fe-Ni покрытий возрастал (до 2,4 – 2,5 мг/ч) и сопровождался явлениями схватывания с хромированной поверхно-

стью колодки. Fe-Ni изнашивался быстрее, чем чистое электролитическое железо. Износ сплава Fe-Co с ростом нагрузки свыше 7,5 МПа приближается к насыщению (рисунок 7, кр. 3). Лучшая износостойкость сплавов Fe-Co объясняется, вероятно, их большей антифрикционностью.

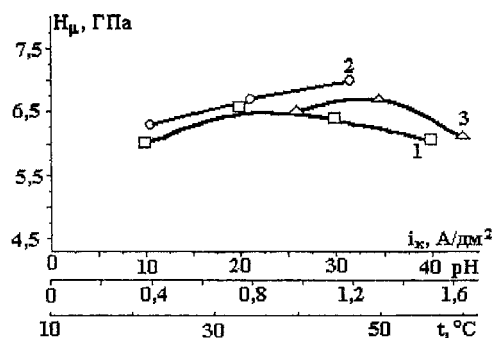


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости Fe-Co сплавов от плотности тока (1), pH (2), температуры (3) при осаждении в электролите № 3

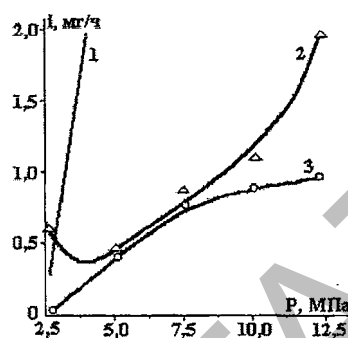


Рисунок 7 – Скорость изнашивания покрытий (i , мг/ч) в зависимости от удельного давления (P , МПа). 1– Fe-Ni; 2– «чистое» железо; 3– Fe-Co

Испытания в условиях недостатка смазки (при подаче ее в сопряжение 2 кап/мин) показали, что наиболее высокий коэффициент трения имели покрытия Fe-Ni (рисунок 8, кр. 2). При ступенчатом нагружении в первые 15 – 20 мин работы на повышенной нагрузке трение покрытий Fe-Ni с хромом отличалось неустойчивостью. Момент и температура трения резко возрастали, однако после обильной смазки возвращались к нормальному значению и покрытия Fe-Ni быстро прирабатывались и приобретали состояние, позволяющее им в дальнейшем длительно работать при ограниченной смазке.

Вероятно, вследствие плохой смачиваемости хрома маслом и ухудшения адгезии масла к железному покрытию при его легировании никелем покрытия Fe-Ni при давлениях $p \geq 7,5$ МПа оказались неработоспособными в паре с хромом. Вместе с тем, при увеличении подачи масла вдвое (4 кап/мин) они выдерживали испытания до нагрузок 9,0 – 9,2 МПа.

Электролитические сплавы железо-кобальт оказались более антифрикционными, чем сплавы железо-никель (рисунок 7). Лучшие антифрикционность, стойкость к задиру и способность нести повышенные нагрузки в условиях недостатка смазки показал при испытаниях в контакте с хромом сплав железо-кобальт (рисунок 9, кр. 3' и 3'').

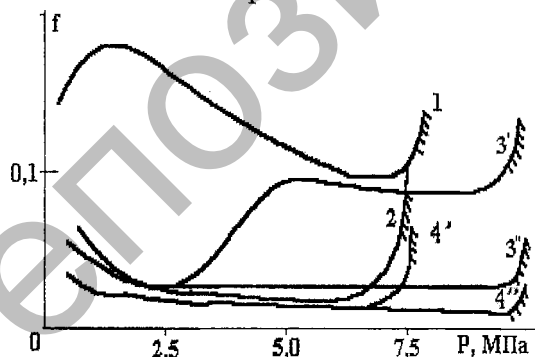


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента трения от удельной нагрузки: 1 – Fe-Ni; 2 – «чистого» железа; 3' и 3'' Fe-Co 4' и 4'' – стали 38ХМЮА при ступенчатом (3', 4') и постепенном (3'', 4'') приложении нагрузки

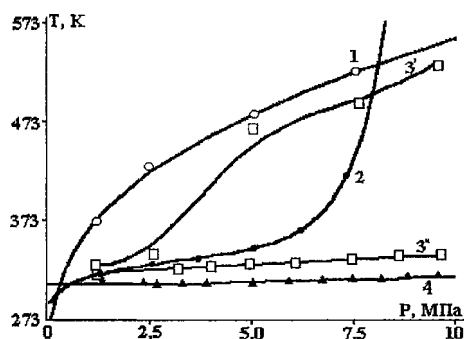


Рисунок 9 – Влияние удельного давления на температуру трения в контакте с хромированной колодкой: 1– Fe-Ni; 2– «чистого» железа; 3' и 3'' – Fe-Co при ступенчатом и постепенном приложении нагрузки; 4 – закаленной стали 38ХМЮА

При испытаниях сплава Fe-Co резкое изменение нагрузки приводило к росту тепло-выделения, повышению момента трения в течение первых 15 – 20 мин работы сопряжения, затем, вследствие повышенного уровня деформирования, роста поверхности контакта, ускорения окислительных процессов наблюдалась ускоренная приработка поверхности ролика и колодки. Температура и момент трения пары уменьшались, и она продолжала работать в условиях недостатка смазки устойчиво и без задиров.

Покрытие Fe-Co при работе со смазкой в режимах ступенчатого и постепенного повышения нагрузки показало характеристики не хуже, чем у стали 38ХМЮА (рисунок 7). Предельная несущая способность Fe-Co оказалась такой же, как и у пары сталь-хром.

Изучение поверхности роликов и колодок после испытаний показало, что наилучшая локализация разрушений и очагов схватывания наблюдается для пары железо-кобальт-хром. Разрушения электролитического хрома происходили в контакте со сплавом железо-никель.

Сплавы Fe-Ni, обладающие достаточной микротвердостью (6,5 – 7,5 ГПа), следует рекомендовать для восстановления деталей, работающих в условиях статических нагрузок.

Твердые сплавы Fe-Co целесообразно применять для восстановления деталей, изготовленных из легированных и закаленных сталей, работающих в условиях динамических нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелков, М. П. Твердое осталивание автотракторных деталей. – М., 1971.
2. Кудрявцев Н.Т., Мельникова М.М., Яковлева И.Д. Восстановление изношенных деталей методом железнения. – М., 1958.
3. Ваграмян А.Т., Петрова Ю.С. Физико-механические свойства электролитических осадков. – М., 1960.
4. Игнатьков, Д.А. Остаточные напряжения в неоднородных деталях /Д.А. Игнатьков. – Кишинев: Штиинца, 1992. – 302 с.

Аннотация

Применение износостойких гальванических покрытий на основе железа при восстановлении деталей машин

Изучены свойства железа и износостойких гальванических сплавов Fe-Co, Fe-Ni, работающих при повышенных нагрузках. Эти сплавы обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками в сравнении с покрытиями из «чистого» железа. Особо высокой микротвердостью и износостойкостью характеризуются покрытия Fe-Co.

Abstract

The use of wear-resistant coatings based on galvanic iron recovery of machine parts

Properties of iron and wear resistant galvanic Fe-Co, Fe-Ni alloys for high loadings were investigated. These alloys better satisfy performance requirements in comparison with «pure» iron coverings. Especially high microhardness and wear resistance characterize Fe-Co coverings.