DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

IKKILAMCHI POLIETILENTEREFTALAT ASOSIDA OLINGAN p-FENILENDIAMIN, FORMALIN VA TIOMOCHEVINADAN PPD-F-TM KORROZIYA INGIBITORINI SINTEZ QILISH VA UNING FIZIK-KIMYOVIY HAMDA ANTIKORROZION XOSSALARINI TADQIQ ETISH

Normurotov Jaxongir Boymurodovich, *tayanch doktorant,*
Kimyo muhandisligi kafedrasi,
Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti
Axmedov O'rol Choriyevich. *k.f.n., dotsent,*
E-mail: jahongirnormurotov1310@gmail.com
Termiz davlat universiteti

Annotatsiya. *Mazkur ish ikkilamchi polietilentereftalatni kimyoviy qayta ishlash yo'li bilan olingan p-fenilendiamin asosida p-fenilendiamin-formalin-tiomochevina (PPD-F-TM) turidagi geteroatomli oligomer korroziya ingibitorini sintez qilish va uning tuzilish-funksional xossalarini baholashga bag'ishlangan. Sintez spirtli muhitda p-fenilendiamin, formaldegid va tiomochevinaning 1:2:1 mol nisbatida, 80 °C da 2 soat davomida olib borildi. Mahsulot IQ-spektroskopiya, TGA/DTA va skanerlovchi elektron mikroskopiya usullari bilan tavsiflandi, St20 po'lat uchun 1 M HCl hamda graderniy aylanma suvida elektrokimyoviy himoyalash samaradorligi baholandi. IQ spektrida 3323 cm^{-1} da keng N–H yutilish sohasi, 1645 cm^{-1} da tiomid-I tabiatli tebranishlar hamda 1317 va 1253 cm^{-1} da tiomochevina fragmentlariga xos polosalar kuzatildi. TGA bo'yicha 29.81–448.70 °C oralig'ida 36.737%, 454.06–763.58 °C oralig'ida 10.519% massa yo'qotilishi qayd etildi. PPD-F-TM konsentratsiyasi 400 mg/L ga yetkazilganda 1 M HCl muhitida himoyalash samaradorligi 91.97%, graderniy aylanma suvida esa 91.66% ni tashkil etdi. SEM kuzatuvlari ingibitor ishtirokida metall sirtida adsorbsion-himoya qatlamining shakllanishiga mos morfologik belgilarni ko'rsatdi. Olingan natijalar PPD-F-TM ni ikkilamchi PET asosidagi azot va oltingugurt tutuvchi samarali korroziya ingibitori sifatida qo'llash istiqbolini ko'rsatadi.*

Аннотация. *Работа посвящена синтезу и исследованию гетероатомного олигомерного ингибитора коррозии PPD-F-TM на основе п-фенилендиамина, полученного при химической переработке вторичного полиэтилентерефталата, формалина и тиомочевины. Синтез проводили в спиртовой среде при мольном соотношении п-фенилендиамин: формальдегид: тиомочевина 1:2:1 при 80 °C в течение 2 ч. Продукт исследовали методами ИК-спектроскопии, TGA/DTA и сканирующей электронной микроскопии; защитное действие оценивали для стали St20 в 1 М HCl и в оборотной воде градирни. В ИК-спектре наблюдалась широкая полоса N–H при 3323 $см^{-1}$, полоса тиоамидного характера при 1645 $см^{-1}$ и полосы при 1317 и 1253 $см^{-1}$, связанные с тиомочевинными фрагментами. По данным TGA потери массы составили 36.737% в интервале 29.81–448.70 °C и 10.519% в интервале 454.06–763.58 °C. При концентрации 400 мг/л эффективность ингибирования достигала 91.97% в 1 М HCl и 91.66% в оборотной воде градирни. SEM-наблюдения согласуются с формированием адсорбционно-защитного слоя на поверхности стали. Полученные результаты показывают перспективность PPD-F-TM как ингибитора коррозии, создаваемого с использованием вторичного полимерного сырья.*

Abstract. *This work describes the synthesis and characterization of a heteroatom-containing oligomeric corrosion inhibitor, PPD-F-TM, based on p-phenylenediamine obtained through chemical processing of secondary polyethylene terephthalate, formalin, and thiourea. The synthesis was carried out in an alcoholic medium using a p-phenylenediamine: formaldehyde: thiourea molar ratio of 1:2:1 at 80 °C for 2 h. The product was characterized by FT-IR*

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

spectroscopy, TGA/DTA, and scanning electron microscopy, while its protective performance toward St20 carbon steel was evaluated in 1 M HCl and cooling-tower recirculating water. The FT-IR spectrum showed a broad N–H band at 3323 cm⁻¹, a thioamide-I-related band at 1645 cm⁻¹, and characteristic thiourea-associated bands at 1317 and 1253 cm⁻¹. TGA showed mass losses of 36.737% between 29.81 and 448.70 °C and 10.519% between 454.06 and 763.58 °C. At 400 mg/L, the inhibition efficiency reached 91.97% in 1 M HCl and 91.66% in recirculating cooling water. SEM observations were consistent with the formation of an adsorbed protective layer on the steel surface. The results indicate that PPD-F-TM is a promising nitrogen- and sulfur-containing corrosion inhibitor linked to valorization of secondary PET feedstock.

Kalit so‘zlar: *ikkilamchi PET, p-fenilendiamin, formalin, tiomochevina, PPD-F-TM, korroziya ingibitori, St20 po‘lat, IQ-spektroskopiya, TGA/DTA, SEM, adsorbsiya, 1 M HCl, graderniy aylanma suvi.*

Ключевые слова: *вторичный ПЭТ, п-фенилендиамин, формалин, тиомочевина, PPD-F-TM, ингибитор коррозии, сталь St20, ИК-спектроскопия, TGA/DTA, SEM, адсорбция, HCl, оборотная вода.*

Keywords: *secondary PET, p-phenylenediamine, formalin, thiourea, PPD-F-TM, corrosion inhibitor, St20 carbon steel, FT-IR, TGA/DTA, SEM, adsorption, hydrochloric acid, recirculating water.*

Kirish. Metall konstruksiyalar va texnologik uskunalarning kislotali hamda suvli-tuzli muhitlarda korroziyaga uchrashi neft-gaz, kimyo, energetika va metallurgiya tarmoqlarida material sarfi, rejadan tashqari ta’mirlash va ekspluatatsion xavflarning ortishiga olib keladigan asosiy omillardan biridir. Organik korroziya ingibitorlaridan foydalanish agressiv muhit tarkibini tubdan o‘zgartirmasdan metall sirtidagi faol markazlarni adsorbsion qoplash imkonini bergani sababli texnologik jihatdan qulay yondashuv hisoblanadi. Ayniqsa amin guruhlari, azot va oltingugurt kabi geteroatomlar hamda aromatik π-elektron tizimlarini saqlovchi birikmalar metall yuzasi bilan donor-akseptor o‘zaro ta’sirlarga kirishib, himoya qatlamining shakllanishiga yordam beradi [1,4,9].

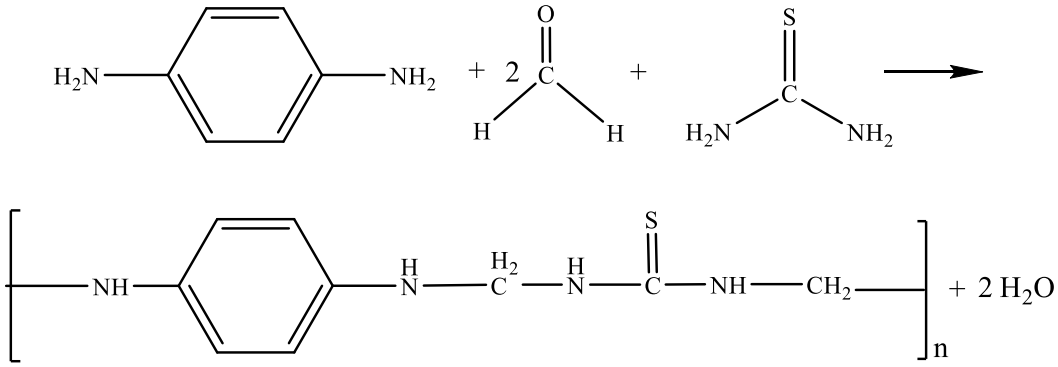
Amin asosli ingibitorlarda molekulyar tuzilish, donor markazlar soni, aromatik tizimlarning mavjudligi va molekulaning sirtni qoplash qobiliyati himoyalash samaradorligini belgilovchi muhim omillardir. Diamin va poliamin tipidagi birikmalarda bir nechta adsorbsion markazlarning mavjudligi ko‘p nuqtali bog‘lanishni kuchaytiradi; 1,4-fenilendiamin asosidagi hosilalarning kislotali muhitlarda samarali adsorbsiyalanishi bir qator tadqiqotlarda ko‘rsatilgan [5–7]. Oldingi ishimizda p-fenilendiamin asosida sintez qilingan SB-1 Shiff asosi St20 po‘latining 1 M HCl muhitidagi korroziyasini samarali sekinlashtirishi va metall sirtida barqaror himoya qatlamini shakllantirishi aniqlangan [2]. Tiomochevina fragmentining molekulaga kiritilishi N va S donor markazlarini bir tizimda birlashtirish imkonini beradi. Tiomochevina va uning kompozitsiyalarining po‘lat sirtida adsorbsiyalanib korroziya jarayonini tormozlashi tajribaviy va nazariy yondashuvlarda qayd etilgan [3]. Shu bilan birga, urea/amine tipidagi molekulyar tizimlarning metall yuzasida yig‘ilib himoya qatlamlari hosil qilishi ham adabiyotlarda yoritilgan [8].

Mazkur tadqiqot dissertatsiya ishining ikkilamchi polietilentereftalat (PET) chiqindilarini bosqichma-bosqich kimyoviy qayta ishlash orqali p-fenilendiamin olish va uning asosida funksional korroziya ingibitorlarini yaratish yo‘nalishiga mos ravishda bajarildi. Ishning maqsadi ikkilamchi PET asosida olingan p-fenilendiamin, formalin va tiomochevina ishtirokida PPD-F-TM markali geteroatomli oligomer ingibitorni sintez qilish, uning IQ-spektroskopik va termik xususiyatlarini aniqlash hamda St20 po‘latini 1 M HCl va graderniy aylanma suvi muhitlarida himoyalash samaradorligini baholashdan iborat.

Materiallar va usullar

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

PPD-F-TM oligomer ingibitorini sintez qilish. Tadqiqotning asosiy amin komponenti sifatida ikkilamchi PET ni kimyoviy qayta ishlash yo‘li bilan olingan p-fenilendiamin qo‘llanildi. PPD-F-TM sintezi p-fenilendiamin, formaldegid (formalin eritmasi) va tiomochevina ishtirokida olib borildi. Reaksiya sxemasi va eksperimental tavsifga muvofiq optimal mol nisbat p-fenilendiamin:formaldegid:tiomochevina = 1:2:1 sifatida qabul qilindi. 40–45 °C gacha termostatlangan kolbada p-fenilendiamin va tiomochevinaning spirtli eritmasi aralashtirildi, so‘ng formalin eritmasi tomchilatib qo‘shildi. Aralashma qaytaruvchi sovutgich ostida 80 °C da 2 soat davomida mexanik aralashtirildi. Hosil bo‘lgan quyuq massa xona haroratigacha sovitilib, muvozanat holatiga kelishi uchun 24 soat saqlandi va filtrlash orqali ajratib olindi.



1-rasm. p-Fenilendiamin, formaldegid va tiomochevina asosida PPD-F-TM oligomer ingibitorining hosil bo‘lish sxemasi

1-jadval

PPD-F-TM uchun komponentlar mol nisbatining himoyalash ko‘rsatkichiga ta’siri

PPD-F-TM	Komponentlar mol nisbati	Himoyalash darajasi, %
1	1:1:1	80.25
2	1:2:1	93.01
3	1:2:2	89.12

Fizik-kimyoviy tavsiflash. PPD-F-TM ning funksional tuzilishini baholash uchun IQ-Fure spektroskopiyasi qo‘llanildi. Boshlang‘ich p-fenilendiamin spektridagi –NH_2 guruhlariga xos sohalar bilan sintez mahsuloti spektri qiyosiy tahlil qilindi. Termik xossalar TGA/DTA termogrammasi bo‘yicha 29.81–763.58 °C oralig‘idagi massa o‘zgarishlari va differensial termik effektlar asosida baholandi. TGA/DTA grafigida tajriba atmosferasi va qizdirish tezligi ko‘rsatilmagani sababli ushbu parametrlar talqinda kiritilmadi.

Metall sirtining morfologik holati skanerlovchi elektron mikroskopiya yordamida baholandi. PPD-F-TM ishtirokidagi namunalarning SEM tasvirlari EVO MA 10 turidagi skanerlovchi elektron mikroskopda qayd etilgan.

Elektrokimyoviy sinovlar. PPD-F-TM ning St20 po‘latiga himoyalovchi ta’siri 1 M HCl va graderniy aylanma suvi muhitlarida potensiodinamik qutblanish usulida baholandi. Elektrokimyoviy tajribalar 1000 mL hajmli termostatlangan yacheykada 298±1 K da bajarildi; statsionar potensial qaror topishi uchun elektrodlar sinov muhitida 2 soat ushlab turildi. O‘lchovlar CS-350 potensiostat-galvanostatda, ishchi elektrod sifatida St20 po‘lat, taqqoslash elektrodi sifatida to‘yingan KCl dagi Ag/AgCl va yordamchi elektrod sifatida platina qo‘llangan holda amalga oshirildi.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

Qutblanish ma’lumotlari asosida korrozion tok zichligi i, tormozlash koeffitsienti γ, sirt qoplanish darajasi θ va himoyalash samaradorligi η hisoblandi. Himoyalash samaradorligi quyidagi munosabat bilan baholandi:

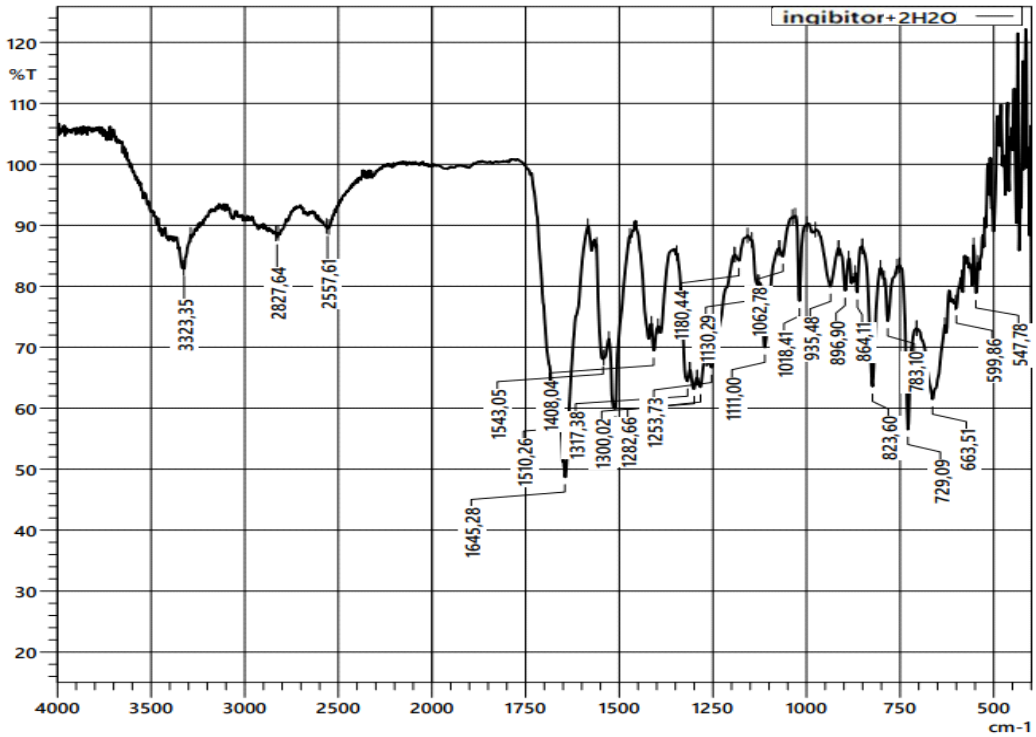
$$\eta, \% = [(i_0 - i_{inh}) / i_0] \times 100$$

bu yerda i_0 — ingibitorsiz muhitdagi, i_{inh} esa ingibitor ishtirokidagi korrozion tok zichligi.

Natijalar va muhokama

Sintez sharoitini optimallashtirish. Komponentlarning mol nisbati PPD-F-TM ning himoyalash ko‘rsatkichiga sezilarli ta’sir ko‘rsatdi. 1:1:1 nisbatda himoyalash darajasi 80.25% bo‘lgan bo‘lsa, formaldegid ulushini oshirib 1:2:1 nisbatga o‘tilganda qiymat 93.01% gacha ko‘tarildi. 1:2:2 nisbatda esa ko‘rsatkich 89.12% gacha pasaydi. Bu holat 1:2:1 nisbatda metilen ko‘prikchalari va tiomochevina fragmentlari ishtirokidagi zanjir tuzilishining adsorbsion faol markazlar soni hamda makromolekulaning sirtga joylashish qobiliyati nuqtai nazaridan maqbul muvozanat hosil qilishi mumkinligini ko‘rsatadi. Molekulyar hajmning ortishi har doim ham himoyalashni mutanosib oshirmasligi, chunki eruvchanlik va diffuziya omillari ham muhim ekani aminli ingibitorlar uchun umumiy qonuniyat sifatida qayd etilgan [1].

IQ-spektroskopik tahlil.



2-rasm. Sintez qilingan PPD-F-TM oligomer korroziya ingibitorining IQ-spektri

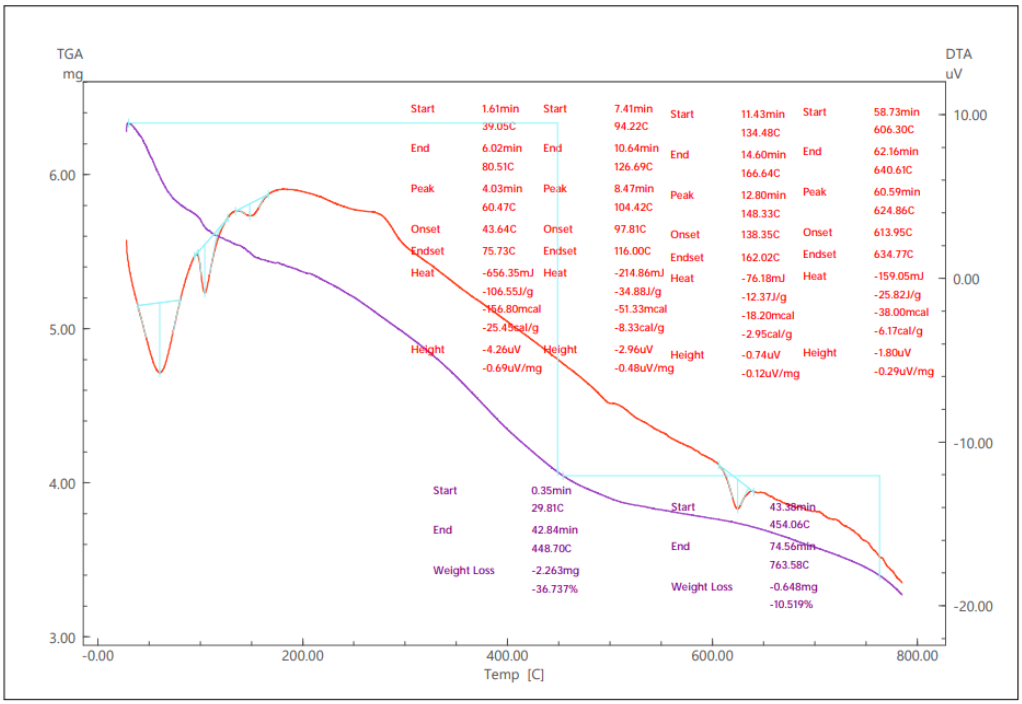
Boshlang‘ich p-fenilendiaminda 3385–3371 cm^{-1} sohasida birlamchi amin guruhlarining N–H valent tebranishlariga xos intensiv dublet kuzatiladi. PPD-F-TM spektrida esa ushbu dubletning o‘rnida 3323 cm^{-1} atrofida keng va tarqoq yutilish sohasi paydo bo‘lgan. Bu o‘zgarish birlamchi amin markazlarining formaldegid ishtirokida metilen ko‘prikchalari orqali modifikatsiyalanishi va ikkilamchi –NH– guruhlari hamda molekulalararo vodorod bog‘larining shakllanishi bilan mos keladi.

1645 cm^{-1} dagi kuchli yutilish tiomid-I tabiatli –NH– deformatsion va C–N valent tebranishlarining qo‘shilgan hissasi bilan izohlanadi. 1543–1510 cm^{-1} oralig‘idagi polosalar aromatik karkas va C–N bog‘lari tebranishlari bilan bog‘liq. 1408, 1317, 1300–1282 va 1253 cm^{-1}

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

sohalardagi yutilishlar C–N hamda tiomochevina/tiokarbonil fragmentlarining vibratsion xususiyatlari bilan mos keladi. Ayniqsa 1317 va 1253 cm^{-1} dagi intensiv polosalar S tutuvchi fragmentning oligomer tuzilishga kiritilganini tasdiqlovchi muhim spektral belgilar sifatida qaraladi. 1111–1018 cm^{-1} va 935–864 cm^{-1} sohalardagi signallar C–N, aromatik C–H va zanjirning skelet tebranishlariga hissa qo‘shadi. Shunday qilib, IQ spektri reaksiyadan keyin boshlang‘ich amin holatining o‘zgarishi va N/S tutuvchi geteroatomli oligomer tizim shakllanganini qo‘llab-quvvatlaydi. Heteroatomlar va aromatik elektron tizimlarning birgalikda mavjudligi metall sirtiga adsorbsiyani kuchaytiruvchi strukturaviy omil sifatida adabiyotlarda keng ko‘rsatilgan [1,9].

Termik tahlil



3-rasm. PPD-F-TM oligomer ingibitorining TGA/DTA termogrammasi

TGA egri chizig‘i PPD-F-TM namunasining termik o‘zgarishi kamida ikki asosiy massa yo‘qotish sohasi bilan tavsiflanishini ko‘rsatadi. Birinchi qayd etilgan interval 29.81–448.70 °C bo‘lib, massa kamayishi 2.263 mg yoki 36.737% ni tashkil etadi. Ushbu keng interval past haroratli adsorbsiyalangan/uchuvchan komponentlarning chiqishi bilan bir qatorda metilenli, aminli va tiomochevina fragmentlarining bosqichma-bosqich termik o‘zgarishlarini o‘z ichiga olishi mumkin. DTA egri chizig‘ida 60.47, 104.42 va 148.33 °C da termik effektlarning kuzatilishi mazkur bosqichning bir nechta ketma-ket jarayonlardan iborat ekanini ko‘rsatadi.

Ikkinchi TGA sohasi 454.06–763.58 °C oralig‘ida kuzatilib, qo‘shimcha massa yo‘qotilishi 0.648 mg yoki 10.519% ni tashkil etadi. 624.86 °C atrofidagi DTA maksimumi yuqori haroratli destruksiya yoki qoldiq strukturada kechadigan chuqur termik qayta tashkil topish bilan bog‘lanishi mumkin. Ikki TGA bosqichidagi jami massa yo‘qotilishi 47.256% bo‘lib, 763.58 °C ga kelib taxminan 52.744% qoldiq massa saqlanib qoladi. Bu natija aromatik va geteroatomli qismning ma’lum darajada termik barqaror qoldiq hosil qilishga moyilligini ko‘rsatadi; shu bilan birga aniq destruksiya mexanizmini belgilash uchun TG-MS yoki TG-FTIR kabi gaz-faza tahlillari talab qilinadi. Shu sababli mazkur ishda TGA/DTA natijalari funksional guruhlarning umumiy termik barqarorligini tavsiflovchi dalil sifatida talqin qilindi.

St20 po‘latining elektrokimyoviy himoyalanishi

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

2-jadval

1 M HCl muhitida PPD-F-TM ning elektrokimyoviy parametrlari (298±1 K, 2 soat)

C, mg/L	i, mA/cm²	γ	θ	η, %
0	0.760±0.17	–	–	–
100	0.095±0.02	8.00	0.8750	87.50
200	0.088±0.08	8.64	0.8842	88.42
300	0.073±0.03	10.41	0.9039	90.39
400	0.061±0.01	12.46	0.9197	91.97

1 M HCl muhitida ingibitorsiz St20 po‘latining korrozion tok zichligi 0.760±0.17 mA/cm² bo‘lgan. 100 mg/L PPD-F-TM kiritilganda bu qiymat 0.095±0.02 mA/cm² gacha kamayib, himoyalash samaradorligi 87.50% ni tashkil etdi. Konsentratsiya 400 mg/L ga oshirilganda tok zichligi 0.061±0.01 mA/cm² ga tushdi, γ 12.46 ga, θ 0.9197 ga va η 91.97% ga yetdi. Tok zichligining konsentratsiya ortishi bilan muntazam kamayishi PPD-F-TM molekulalarining metall-eritma chegarasidagi faol markazlarni tobora katta darajada egallashi bilan mos keladi. Diamin va p-fenilendiamin asosidagi ingibitorlarda bir nechta azot donor markazlari hamda aromatik tizimlar hisobiga yuqori sirt qoplanishi kuzatilishi ilgari ham qayd etilgan [5–7].

3-jadval

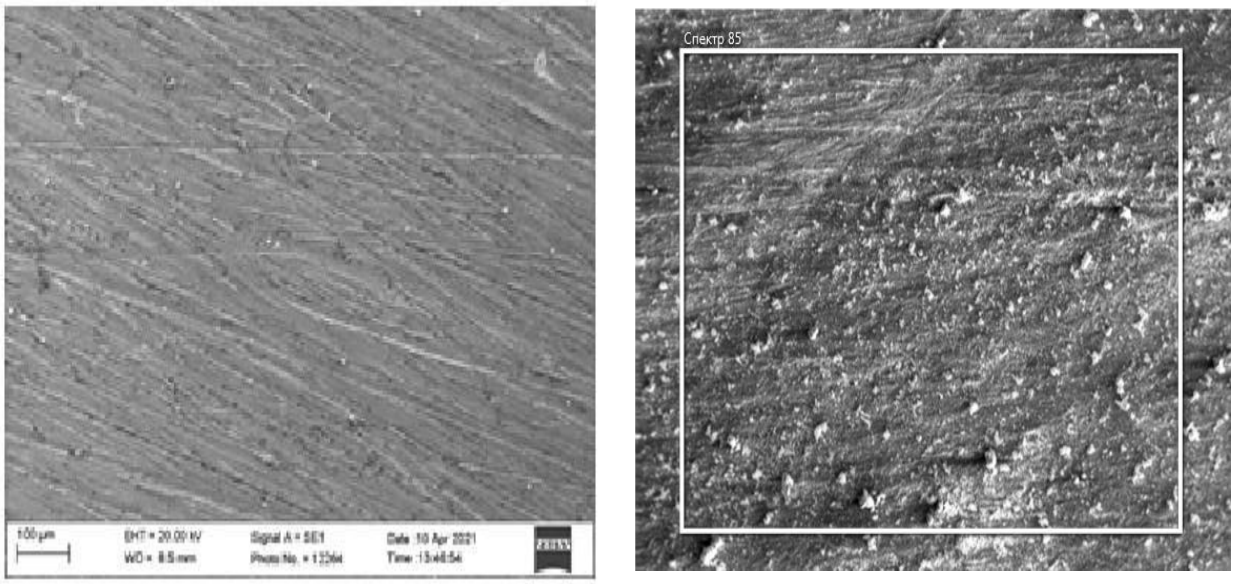
Graderniy aylanma suvida PPD-F-TM ning elektrokimyoviy parametrlari (298±1 K)

C, mg/L	i, mA/cm²	γ	Θ	η, %
0	0.96±0.012	–	–	–
100	0.21±0.12	4.57	0.7813	78.13
200	0.16±0.09	6.00	0.8333	83.33
300	0.10±0.01	9.60	0.8958	89.58
400	0.08±0.002	12.00	0.9167	91.66

Graderniy aylanma suvida ingibitorsiz korrozion tok zichligi 0.96±0.012 mA/cm² bo‘lgan. PPD-F-TM miqdori 100 dan 400 mg/L gacha oshirilganda tok zichligi 0.21 dan 0.08 mA/cm² gacha kamaydi va himoyalash samaradorligi 78.13% dan 91.66% gacha ortdi. Kislotali muhitga nisbatan past konsentratsiyadagi samaradorlik farqi muhitning ion tarkibi, sirt zaryadi va inhibitorning protonlanish holati bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Biroq 400 mg/L da har ikkala muhitda 91% dan yuqori himoyalanish kuzatilishi PPD-F-TM ning turli agressiv sharoitlarda barqaror adsorbsion ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatadi. Oldingi SB-1 tadqiqotida ham p-fenilendiamin asosidagi tizimning yuqori samaradorligi azot donor markazlari va aromatik π-tizimlarning sirt bilan o‘zaro ta’siri orqali izohlangan [2].

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

SEM bo‘yicha sirt morfologiyasi



(a) **(b)**

4-rasm. PPD-F-TM markali korroziya ingibitori 400 mg/L konsentratsiyada graderniy aylanma suvida dastlabki (a) va keyingi (b) St20 po‘lat sirtining SEM tasviri

SEM tasvirida St20 sirtida dastlabki mexanik ishlov izlarining bir qismi saqlangani, yuzada lokal notekisliklar mavjud bo‘lsa-da, uzluksiz chuqur yemirilish morfologiyasi ustun emasligi ko‘rinadi. Bu holat PPD-F-TM ning 400 mg/L konsentratsiyada graderniy aylanma suvida qayd etilgan 91.66% elektrokimyoviy himoyalash samaradorligi bilan mos keladi. Bunday morfologik barqarorlashuv N va S donor markazlarining metall yuzasiga adsorbsiyasi, aromatik qismning sirt bilan qo‘shimcha o‘zaro ta’siri hamda oligomer zanjirning ekranlovchi qoplama hosil qilishi bilan izohlanadi. Zamonaviy korroziya tadqiqotlarida SEM orqali sirtning nisbatan bir tekis va kam shikastlangan holatga o‘tishi adsorbsion himoya qatlamining shakllanishini tasdiqlovchi muhim eksperimental dalil sifatida qo‘llanadi [9,10].

Tuzilish–xossa bog‘liqligi. PPD-F-TM ning yuqori samaradorligini uning tarkibidagi bir nechta funksional fragmentlarning birgalikdagi ta’siri bilan tushuntirish mumkin. p-Fenilendiaminning aromatik yadrosi va azot atomlari metall bilan donor-akseptor o‘zaro ta’sirlar uchun elektron markazlar yaratadi; formaldegid orqali hosil bo‘lgan metilen ko‘priklari molekulyar zanjirni kattalashtirib, sirtni qoplash maydonini oshiradi; tiomochevina fragmentidagi N va S atomlari esa qo‘shimcha adsorbsion markazlar hosil qiladi. Shu bilan birga, oligomer tabiat agressiv ionlarning metall sirtiga diffuziyasini cheklovchi fizik to‘siq shakllanishiga yordam berishi mumkin. Polimer va oligomer amin tizimlarida film hosil qilish qobiliyati va uzoqroq sirt qoplanishi muhim afzallik sifatida qayd etilgan [1,7].

Mazkur ishning ilmiy-amaliy jihati shundaki, PPD-F-TM sintezi dissertatsiyada taklif etilgan ikkilamchi PET → p-fenilendiamin → funksional korroziya ingibitori qiymat zanjirining keyingi bosqichini ifodalaydi. Bunda polimer chiqindisini qayta ishlash mahsuloti metall korroziyasini kamaytirishga yo‘naltirilgan yuqori qo‘shimcha qiymatli funksional reagentga aylantiriladi. Bu yondashuv korroziya ingibitorlarini molekulyar dizayn qilish bilan ikkilamchi polimer resurslarini valorizatsiya qilish g‘oyalarini birlashtiradi.

Xulosa

1. Ikkilamchi PET asosida olingan p-fenilendiamin, formaldegid va tiomochevina ishtirokida PPD-F-TM markali geteroatomli oligomer korroziya ingibitori sintez qilindi;

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

komponentlarning 1:2:1 mol nisbati eng maqbul bo‘lib, dastlabki baholashda 93.01% himoyalash darajasini ta’minladi.

2. IQ-spektrda p-fenilendiaminga xos birlamchi amin dubletining o‘zgarishi va 3323, 1645, 1317 hamda 1253 cm^{-1} sohalardagi xarakterli yutilishlar metilen ko‘priklari hamda N/S tutuvchi tiomochevina fragmentlari ishtirokidagi oligomer tuzilmaning shakllanishini qo‘llab-quvvatladi.

3. TGA/DTA natijalarida 29.81–448.70 °C oralig‘ida 36.737% va 454.06–763.58 °C oralig‘ida 10.519% massa yo‘qotilishi aniqlandi; 763.58 °C gacha jami massa yo‘qotilishi 47.256% ni tashkil etdi.

4. PPD-F-TM ning 400 mg/L konsentratsiyasida St20 po‘lat uchun potensiodinamik qutblanish bo‘yicha himoyalash samaradorligi 1 M HCl muhitida 91.97%, graderniy aylanma suvida 91.66% ga yetdi.

5. SEM tasviri elektrokimyoviy natijalar bilan uyg‘un holda, PPD-F-TM ishtirokida po‘lat sirtining morfologik barqarorlashuvi va adsorbsion-himoya qatlamining shakllanishini qo‘llab-quvvatlaydi. Natijalar ikkilamchi PET ni yuqori qo‘shimcha qiymatli korroziya ingibitoriga aylantirishning istiqbolli yo‘nalish ekanini ko‘rsatadi.

Adabiyotlar

1. Normurotov J.B., Akhmedov U.Ch., Karimov M.U., Kiyomov Sh., Bozorov S.T., Toshbekov O.A., Olimova D.M., Narkabilova R., Khayrullaev Ch.Q. Rational molecular design of amine-based corrosion inhibitors for acidic media: Mechanistic insights and industrial perspectives // Chemical Review and Letters. – 2026. – Vol. 9. – P. 781–795. DOI: 10.22034/crl.2026.578828.1807.

2. Normurotov J.B., Akhmedov U.Ch., Karimov M.U., Majidov I.S., Khusanov N.A., Berdiyarov U.M., Zikirov H.A. et al. Synthesis, spectroscopic characterization, and corrosion inhibition performance of a novel Schiff base for carbon steel in hydrochloric acid // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2026. – Vol. 15, No. 3. – P. 567–581. DOI: 10.17675/2305-6894-2026-15-3-26.

3. Uzah T.T., Mbonu I.J. Insight into synergistic corrosion inhibition of thiourea and ZnCl2 on mild steel: Experimental and theoretical approaches // Journal of Chemical Letters. – 2024. – Vol. 4. – P. 211–221. DOI: 10.22034/jchemlett.2024.413932.1135.

4. Boughoues Y., Benamira M., Messaadia L., Ribouh N. Experimental and theoretical investigations of four amine derivatives as effective corrosion inhibitors for mild steel in HCl medium // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10. – P. 24145–24158. DOI: 10.1039/D0RA03560B.

5. Herrag L., Hammouti B., Elkadiri S., Aouniti A., Jama C., Vezin H., Bentiss F. Adsorption properties and inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric solution by some newly synthesized diamine derivatives: Experimental and theoretical investigations // Corrosion Science. – 2010. – Vol. 52. – P. 3042–3051. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.05.024.

6. Li X., He J., Xie B., He Y., Lai C., Wang W., Zeng J., Yao B., Zhao W., Long T. 1,4-Phenylenediamine based Schiff bases as eco-friendly and efficient corrosion inhibitors for mild steel in HCl medium: Experimental and theoretical approaches // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2024. – Vol. 955. – 118052. DOI: 10.1016/j.jelechem.2024.118052.

7. Abd El Rehim S.S., Sayyah S.M., El-Deeb M.M., Kamal S.M., Azooz R.E. Poly(o-phenylenediamine) as an inhibitor of mild steel corrosion in HCl solution // Materials Chemistry and Physics. – 2010. – Vol. 123. – P. 20–27. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.02.069.

8. Zhang H.L., Ma T.F., Gao L.X. et al. Vapor phase assembly of urea–amine compounds and their protection against the atmospheric corrosion of carbon steel // Journal of Coatings Technology and Research. – 2020. – Vol. 17. – P. 503–515. DOI: 10.1007/s11998-019-00301-7.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.50

9. Dehghani A., Berdimurodov E., Verma C. et al. Constructing efficacy: A novel perspective on organic corrosion inhibitors and interfacial interactions // Chemical Papers. – 2024. – Vol. 78. – P. 1367–1397. DOI: 10.1007/s11696-023-03181-9.

10. Pan X., Zhao Y., Liu Q., Zhang J. Corrosion protection with polymer composites in aqueous versus organic electrolytes // Journal of Materials Science. – 2026. – Vol. 61. – P. 5645–5701. DOI: 10.1007/s10853-026-12166-4.