

Асқар Бағдатұлы Қасымов – PhD, Басқарма мүшесі – Стратегия және әлеуметтік даму жөніндегі проректор, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Елена Петровна Евлампиева – б.ғ.к., химия және экология кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Дария Мұратқызы Шабдарбаева – медицина ғылымдарының докторы, профессор, Семей медицина университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: dariya.shabdarbaeva@smu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9463-1935>.

Алтай Ахметқалиұлы Дүйсіпов – медицина ғылымдарының докторы, профессор, Басқарма төрағасы – ректор Семей медицина университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: altay.dyusupov@smu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0875-1020>.

Information about the authors

Alexey Klivenko* – PhD, Associate Professor, Director of Shakarim Lab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alexeyklivenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8971-686X>.

Askar Kassymov – PhD, Member of the Board – Vice-rector for Strategy and Social Development, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kassymov.asb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-6508>.

Elena Yevlampieva – PhD, Senior Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Daria Shabdarbayeva – MD, Professor, Semey Medical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: dariya.shabdarbaeva@smu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9463-1935>.

Altai Dyusupov – MD, Professor, Chairman of the Board – Rector of Semey Medical University, Republic of Kazakhstan; e-mail: altay.dyusupov@smu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0875-1020>.

Поступила в редакцию 09.09.2025

Поступила после доработки 23.10.2025

Принята к публикации 24.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-71](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-71)

FTAXP: 55.21.19



А. Мәуліт^{1,2*}, З.А. Сатбаева^{1,2}, Р.С. Кожанова^{1,2}, Д.Р. Байжан², А.С. Рүстемов¹

¹«Plasma Science» ЖШС,

Шығыс Қазақстан облысы, Өскемен қ., Гоголя көш., 7Г

²Шәкәрім университеті,

Абай облысы, Семей қ., Глинки көш., 20 А

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

12Х18Н10Т АУСТЕНИТТИ-ТОТ БАСПАЙТЫН БОЛАТТАН ЭЛЕКТРОЛИТТИ-ПЛАЗМАЛЫҚ АЗОТТАУДЫ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Бұл зерттеуде плазманың спектрлік сипаттамаларын, сондай-ақ электролиттік-плазмалық азоттау (ЕРА) процесінде аустениттік тот баспайтын болатта болатын құрылымдық және фазалық өзгерістерді кешенді талдау нәтижелері келтірілген. Өңдеу 10 минут ішінде 550°C температурада 10% кальцийленген сода (Na_2CO_3), 20% карбамид ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) және 3% аммоний хлориді (NH_4Cl) бар сулы электролитте жүргізілді. Осы жағдайларда қарқынды жарық шығаратын разрядтың тұрақты дамуы байқалды. Өңдеу кезінде жүргізілген оптикалық эмиссиялық спектроскопия азоттың ($N\ I$) және n_2 иондарының қозған түрлерінің, сондай-ақ атомдық оттегінің ($O\ I$) және сутектің иондануына сәйкес келетін $h\alpha$ сызығының тән сызықтарының болуын анықтады. Бұл электролит компоненттерінің плазманың түзілуіне және азоттың үлгі бетіне өтуіне белсенді қатысуын көрсетеді. На желісінің кеңеюі негізінде (Бальмер сериясы) плазманың электронды тығыздығы есептелді, ол шамамен $8.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ болды, бұл разрядтың жоғары энергетикалық сипатын көрсетеді. Рентгендік фазалық талдау хром (CrN) және темір (FeN) нитридтері сияқты азотты қосылыстардың, сондай-ақ $\gamma\text{-Fe(N)}$ аустениттік матрицасындағы азоттың қатты ерітіндісінің түзілуін көрсетті. Бұл нәтижелер Болаттың азотпен тиімді қанығуын және оның фазалық құрамының өзгеруін көрсетеді. Растрлық электронды

микроскопияны (РЭМ) қолданатын микроқұрылымдық талдау ЕРА технологиясына тән үш қабатты азотталған қабат құрылымын анықтады, оның ішінде беттік нитридті аймақ, композиция градиенті бар өтпелі аймақ және негізгі бөлігі қанықпаған аустениттік матрица. Сонымен қатар, энергияның дисперсиялық рентгендік талдауы (ЭДТ) қанықтылықтың диффузиялық сипатын көрсететін азоттың концентрациялық градиентінің тереңдігін растады. Нәтижелер төмен температуралы азот бар электролитті пайдаланған кезде электролит-плазмалық азоттаудың жоғары тиімділігін көрсетеді және өнімділігі жақсартылған көп фазалы модификацияланған қабатты алу мүмкіндігін растайды.

Түйін сөздер: электролиттік-плазмалық азоттау, электр разряды, эмиссиялық спектроскопия, электронды тығыздық, нитрид қабаты, беттік модификация.

1. Кіріспе

Аустениттік тот баспайтын болаттар жоғары коррозияға төзімділікті және биомедицина, кеме жасау және аэроғарыш сияқты жақсы механикалық қасиеттерді қажет ететін салаларда кеңінен қолданылады [1-2]. Азоттау аустенитті тот баспайтын болаттардың механикалық қасиеттерін айтарлықтай жақсартады. Бұл әсер құрамында азот бар аустениттің (S фазасы) және материалдың бетін нығайтатын басқа қатты фазалардың пайда болуына байланысты. Болат құрылымына азот атомдарын енгізу темір мен хром нитридтерінің түзілуіне әкеледі [3-4]. Жұмыс авторлары [5-8] азоттау негізгі қасиеттерін айтарлықтай өзгертпестен болаттың бетінде мықты қабаттардың пайда болуына ықпал ететінін анықтады. Зерттеу [9] аустенитті болаттардың төмен температуралы азотталуы хлоридтер сияқты агрессивті заттардың енуіне жол бермейтін тығыз қорғаныс қабатын құрайтынын анықтады. Зерттеу [10] азоттау уақытының ұлғаюы үйкеліс коэффициентін төмендететін және бетінің беріктігін арттыратын қалың нитридті пленканың пайда болуына ықпал ететінін анықтады.

Тот баспайтын болаттардың қасиеттерін жақсарту үшін азоттаудың бірнеше әдістері қолданылады: газды азоттау – қаттылықты арттыратын, бірақ коррозияға төзімділікті төмендететін нитридтер қабатын құру арқылы аммиак атмосферасында жоғары температурада жүзеге асырылады [11]. Иондық (плазмалық) азоттау-болат бетіне азотты енгізу үшін иондық разрядты пайдаланады, жоғары қаттылық пен тозуға төзімділікті қамтамасыз етеді, бірақ күрделі жабдықты қажет етеді [12]. Төмен температуралы азоттау-әсіресе медициналық және биомедициналық қолдану үшін пайдалы, өйткені ол нәзік фазалардың пайда болуына жол бермейді [13]. Электролиттік-плазмалық азоттау (ЭПА) – бұл электролиттік плазманың көмегімен азотты болаттың беткі қабатына тез диффузиялау үшін қолданатын инновациялық әдіс, ол оны басқа беттік өңдеу әдістерінен ерекшелендіреді. Авторлардың зерттеуі [14] ЭПА дәстүрлі әдістермен салыстырғанда бетті азотпен қанықтырудың жоғары жылдамдығын қамтамасыз ететінін көрсетті. Дәстүрлі газды азоттаулардан айырмашылығы, ЭПА болат құрылымының термиялық бұрмалануын тудыруы мүмкін жоғары температураны болдырмайды [15].

ЭПА процесін жүзеге асыруда шешуші рөл өңделетін беттің айналасындағы бу-газ қабығында пайда болатын электр разрядтары болып табылады. Олар жергілікті жылуды, бетті белсендіруді және металға тиімді диффузиялауға қабілетті азоттың белсенді түрлерінің пайда болуын қамтамасыз етеді. Разрядтардың түрі, қарқындылығы және тұрақтылығы қалыптасқан қабаттың микроқұрылымына, фазалық құрамына және қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Тұрақсыз және қарқынды разрядтар қызып кетуге, микроэлементтерге және ақаулардың пайда болуына әкелуі мүмкін, ал бақыланатын жану разрядтары біркелкі және тығыз қатайтылған қабаттың пайда болуына ықпал етеді. Разрядтарды негізгі үш санатқа бөлуге болады: тікелей сұйықтықтың ішінде пайда болатын разрядтар [16], сұйық беттің үстіндегі газ фазасындағы разрядтар, соның ішінде сұйықтықтың өзі өткізгіш электрод ретінде қызмет ететін жағдайлар [17], сондай – ақ көп фазалы жүйелердегі разрядтар-көпіршіктердің ішінде, бу-газ қоспаларында, аэрозольдік орталарда және көбіктерде [18]. Сұйық ортадағы плазма визуалды бақылаулар мен оптикалық эмиссиялық спектроскопия арқылы зерттеледі [19]. Бұл әдістер плазманың негізгі сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді, мысалы, плазмалық түзілімдердің түрі мен формасы, оның құрамы, температурасы және компоненттердің тығыздығы [20-21].

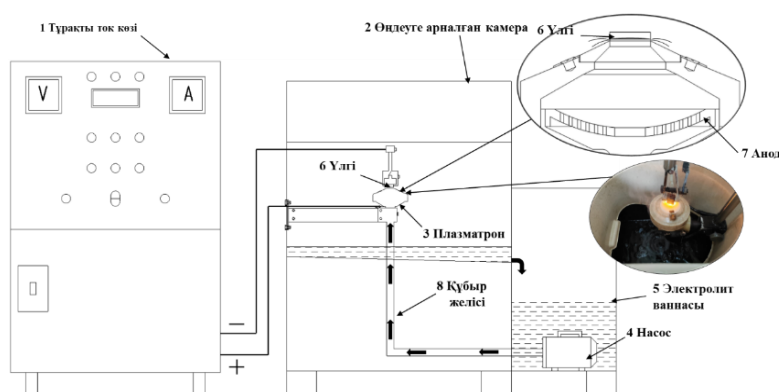
Бұл мақалада біз аустенитті тот баспайтын болатты электролиттік-плазмалық азоттау үрдісіндегі электр разрядының спектрлік сипаттамаларын және оның құрылымдық-фазалық түрленуі зерттеуді мақсат етеміз. Азотталған қабатты құрайтын плазманың белсенді

компоненттерін, сондай-ақ материалдың тереңдігі бойынша азоттың таралуын анықтауға баса назар аударылады.

2. Материалдар мен әдістер

ЕРА жүргізу үшін AISI 321 болатының аналогы болып табылатын 12X18H10T маркалы аустенитті тот баспайтын болат таңдалды. ГОСТ 5632-72 сәйкес 12X18H10T Болаттың химиялық құрамы: темір (Fe) 67%-ге дейін, хром (Cr) 17-19%, никель (Ni) 9-11%, марганец (Mn) 2%-ге дейін, титан (Ti) 0,4-1%, кремний (Si) 0,8%-ге дейін, мыс (Cu) 0,3%-ке дейін, көміртек (C) 0,12% дейін, фосфор (P) 0,035% дейін, күкірт (S) 0,02 дейін. Үлгілер өлшемі 20x20x20 мм текше түрінде дайындалды. беткі процесті бастамас бұрын үлгілер HUMP-2 тегістеу және жылтырату станогында дайындалды, Ra $1,0 \pm 0,1$ мкм кедір-бұдыр деңгейі. Жылтырату аяқталғаннан кейін үлгілер абразивті материалдардың қалдықтары мен кез келген ластаушы заттарды кетіру үшін ағынды сумен мұқият жуылды. Тәжірибе барысында құрамында 10% натрий карбонат, 22% карбамид, 3% аммоний хлориді, 60% тазартылған су негізіндегі электролит қолданылды.

Тәжірибе 40 кВт тұрақты ток түзеткішімен және 1-суретте көрсетілгендей плазмотрон орналастырылған арнайы өңдеу камерасымен жабдықталған ЭПА қондырғысында жүргізілді.



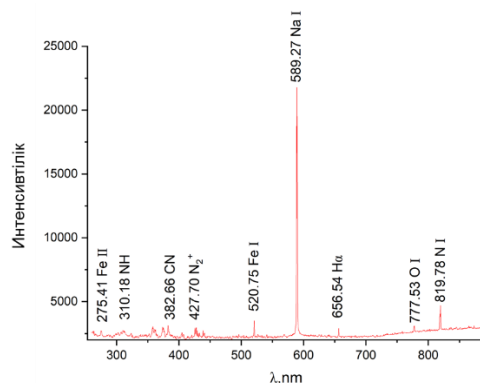
Сурет 1 – Электролитті-плазмалық азоттау қондырғысы

Үлгілерді азоттау процесі келесідей жүргізілді: басында жұмыс ваннасы (5) электролитпен толтырылды. Содан кейін ваннаның түбіне орнатылған сорғы (4) көмегімен электролит құбырлар арқылы (8) өңдеу камерасында орналасқан плазмотронға (3) берілді (2). Плазмотроннан өткеннен кейін электролит жұмыс ваннасына арнайы белгіленген ағызу тесіктері арқылы қайта оралып, осылайша сұйықтық айналымын жасады. Электролиттің берілу жылдамдығы 4-7 л/мин диапазонында сақталды, ал жылу алмастырғышқа берілетін салқындатқыш су 3-6 л/мин жылдамдықпен айналды, бұл 500-550°C үлгілерді қыздыру кезінде электролит температурасын 40-50°C температурада ұстауға мүмкіндік берді. конус тәрізді плазмотронның саңылауынан 2-3 мм қашықтықта. Бұл тесік арқылы үлгілердің салқындауы мен температурасын бақылауды қамтамасыз ететін электролит ағыны берілді. Анод (7) қуат көзінің оң полюсіне (1) қосылды, ал катод рөлін атқаратын үлгілер теріс полюске қосылды. Содан кейін қанығу температурасына тез жету үшін үлгілерге 320 В кернеуі 10 секундқа берілді. Содан кейін кернеу 180 В дейін төмендеді және өңдеу 10 минут бойы жалғасты, үлгілердің температурасы электролит беру жылдамдығын реттеу арқылы 500-550°C диапазонында сақталды [22].

Электролиттік-плазмалық азоттау процесінің спектрлік сипаттамалары АТР3030 ультра жоғары ажыратымдылықтағы оптикалық спектрометрде талданды (Optosky, Қытай). Алынған деректерді талдау зерттелетін спектрді ұлттық стандарттар және технологиялар институтының (NIST) мәліметтер базасымен салыстыру арқылы жүргізілді [23]. Рентгендік фазалық талдау Xpert PRO PANalytical (PANALYTICAL BV, Нидерланды) құралында жүргізілді. Зерттеу барысында анодты мыс түтікке кернеу 40 кВ және ток 30 мА, Cu-K α сәулеленуі ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) 30 дан 100-ге дейін, түсіру қадамы 0,02, санау уақыты 0,5 с/қадам болды. Алынған дифрактограмма сызықтарын фазалық талдау Highscore Plus бағдарламалық пакетін қолдану арқылы жүргізілді. Азотталған үлгілердің микроқұрылымын зерттеу үшін оюдан кейін TESCAN MIRA3 LMH (TESCAN, Брно, Чехия) сканерлейтін электронды микроскоп қолданылды.

3. Нәтижелер мен талқылау

2-суретте көрсетілген алынған эмиссиялық спектр электродқа дейінгі аймақта пайда болатын белсенді бөлшектерге сапалы талдау жасауға мүмкіндік береді. Na I (589.27 нм), Fe I/II, NH, CN сызықтарын, сондай-ақ N_2^+ молекулалық иондарын және N I атомдық азотты анықтау плазмада иондалған және қозған бейтарап бөлшектердің болуын растайды. Бейтарап натрийдің резонанстық D сызығына сәйкес келетін 589.27 нм толқын ұзындығындағы қарқынды шыңды ерекше атап өткен жөн. Себебі Na I 589.0/589.6 нм желісі өзін-өзі сіңіруге әлсіз сезімтал [20, 21]. 427.70 нм (N_2^+) аймағындағы жарылыс нитридті қабаттың түзілуінде шешуші рөл атқаратын қозған азот плазмасына тән молекулалық иондардың болуын көрсетеді. CN және NH радикалдарының болуы электролиттегі карбамид пен аммонийден алынған көміртегі мен сутегі компоненттерінің күрделі химиялық азоттау кинетикасына қатысуын көрсетеді.



Сурет 2 – Электролиттік-плазмалық азоттау кезіндегі электр разрядының спектрі

Қолданылатын жабдықтың сипаттамаларын ескере отырып, Штарктың қысымы мен сызықтық әсеріне байланысты спектрлік сызықтардың кеңеюі [23] формуласына сәйкес Лоренц профилінің жартылай биіктіктегі (FWHM) толық ені бойынша есептелді:

$$\Delta\lambda_F = 0,5346 \times \Delta\lambda_L + \sqrt{0,2166 \times \Delta\lambda_L^2 + \Delta\lambda_G^2}$$

мұндағы $\Delta\lambda_G$ – Гаусс профилінің биіктігінің жартысындағы жарты ені (OPTOSKY АТР3030 спектрометрінің аппараттық кеңеюі = 1.0 нм), $\Delta\lambda_F$ – Войгт профилінің биіктігінің жартысындағы жарты ені (1.12 нм), ал $\Delta\lambda_L$ — Лоренц профилінің биіктігінің жартысындағы жарты ені. Есептеу нәтижесінде Лоренц профилінің биіктігінің жартысындағы жартылай енінің шамасы 0,496 нм болды. .

n_e электронды тығыздығын есептеу үшін n_e -дің Na сызығының еніне жартылай биіктікте (FWHM) тәуелділігінің эмпирикалық формуласы қолданылды [24]:

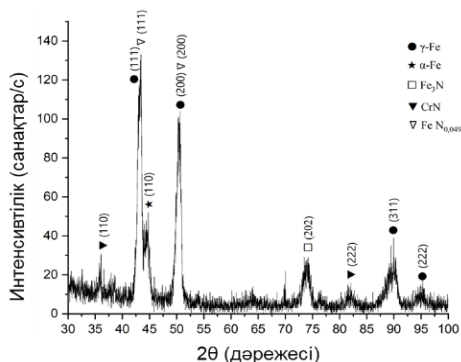
$$n_e = 10^{13} (\Delta\lambda_L)^{\frac{3}{2}} \left[C_0(T) + \sum_{n=1}^m C_n(T) (\ln \Delta\lambda_L)^n \right]$$

мұндағы $\Delta\lambda_L$ — Лоренц контурының жарты ені, $C_0(T)$ алынған [24] Бальмер сериясының сәйкес сутегі сызығы үшін. Бальмер сериясының сутегі сызықтарының сәулелену спектрлерінен электронды тығыздықты есептеу үшін қолданылатын коэффициенттер: $C_0=671.4$, $C_1=-227.5$, $C_2=44.72$, $C_3=-2.325$.

Осылайша, плазманың есептелген электронды тығыздығы $n_e \approx 8.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ құрайды, бұл атмосфералық азотты плазмалық разрядқа тән мәндерге сәйкес келеді. Бұл қолданылатын спектрлерді тіркеу және өңдеу әдісінің дұрыстығын, сондай-ақ көрсетілген жағдайларда электролиттік-плазмалық азоттаудың тиімділігін растайды.

3-суретте электролиттік-плазмалық азоттаудан кейін 12X18H10T болат бетінің рентгенографиясы көрсетілген. Алынған рентограмманы талдау материалдың бастапқы күйімен салыстырғанда беткі қабаттың фазалық құрамындағы айтарлықтай өзгерістерді анықтауға мүмкіндік береді. Дифрактограммада келесі фазаларға сәйкес келетін биіктер байқалады: γ – Fe (аустенит) – жазықтықтағы негізгі рефлексстер (111), (200), (220), 12X18H10T болаттың бастапқы құрылымына тән. бұл фазаның болуы көлемнің көп бөлігінде аустениттік

тордың сақталуын көрсетеді. α -Fe (феррит) – әлсіз шың (110), жоғары термиялық және азоттық әсерлердің әсерінен ішінара мартенситтік түрленуді немесе аустениттің деградация аймағын көрсетеді. Fe_3N (ϵ -фаза) – азотталған қабаттарға тән рефлекс (202) бетке жақын темірдің нитридті фазасының түзілуін растайды. CrN биіктері (111) және (200) хром нитридтерінің түзілуін, азоттың болаттың легирленген элементімен химиялық әрекеттесуінің нәтижесін көрсетеді. $\text{FeN}_{0.0499}$ – кең рефлекс (111), (200) γ -Fe-де қанығудың ерте сатысында пайда болатын қатты азот ерітіндісінің болуын көрсетеді. γ -Fe матрицасында темір және хром нитридтерінің, сондай-ақ еріген азоттың болуы беттің белсенді азотты компоненттермен сәтті қанығуын көрсетеді, бұл эмиссиялық спектроскопия нәтижелеріне сәйкес келеді, атап айтқанда, плазмадағы азоттың жоғары белсенділігін көрсететін N_2^+ (427.7 нм) және N I (819.8 нм) сызықтарының болуы. Сонымен қатар, аустениттік биіктердің қарқындылығының бастапқы күймен салыстырғанда төмендеуін атап өткен жөн, бұл разрядтың термиялық және химиялық әсеріне байланысты ішінара қайта бөлінген кристалдық құрылымды растайды.

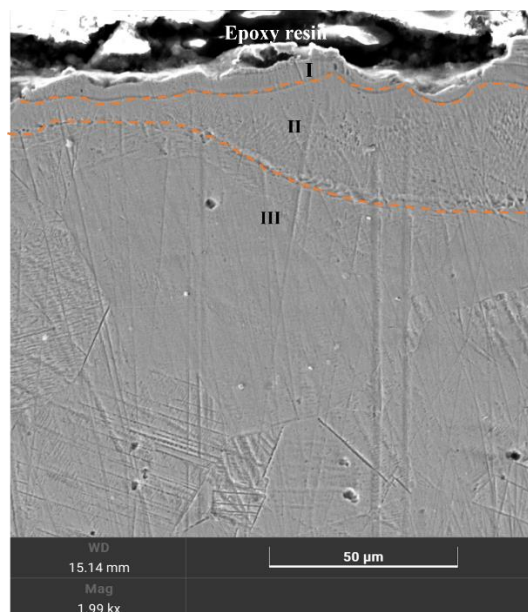


Сурет 3 –12Х18Н10Т аустенитті тот баспайтын болаттың беткі қабатының диффрактограммасы

12Х18Н10Т болаттың 4 көлденең қимасының растрлық электронды кескінінде ЕРА-дан кейін үш тән аймақ айқын байқалады. Бірінші аймақ (I) – қалыңдығы шамамен 7-8 мкм болатын ақ нитридті қабат. Рентгендік фазалық талдауға сәйкес, бұл аймақта хром нитридінің (CrN) және темір нитридінің (FeN) фазалары қалыптасады, бұл сәйкесінше (110), (222) және (202) жазықтықтарындағы рентгенограммадағы шағылысулардан көрінеді. Бұл аймақтың қалыптасуы плазмадағы азоттың белсенді түрлерінің жоғары концентрациясымен байланысты, бұл N_2^+ интенсив (427,7 нм) және N I (819,8 нм) қарқынды сызықтары тіркелген эмиссиялық спектрмен расталады. Төменде қалыңдығы шамамен 8-12 мкм болатын өтпелі аймақ (II) орналасқан, ол азоттың біртіндеп төмендеуімен және аустенитте ($\text{FeN}_{0.0499}$) азоттың қатты ерітіндісінің пайда болуымен сипатталады, бұрмаланған торы бар γ -фазаның сәйкес рефлекстері бойынша анықталған. Ақырында, үшінші аймақ (III)-бұл бастапқы аустениттік құрылымды сақтайтын материалдың қанықпаған бөлігі, ол ұшақтардан рентгенограммада γ -Fe тән биіктердің болуымен расталады (111), (200), (311) және (222). Осылайша, беттік қабаттың байқалған көп қабатты құрылымы беттің азотпен тиімді қанығуын және фазалар мен қасиеттердің айқын градиентімен қорғаныс жабынының қалыптасуын растайды.

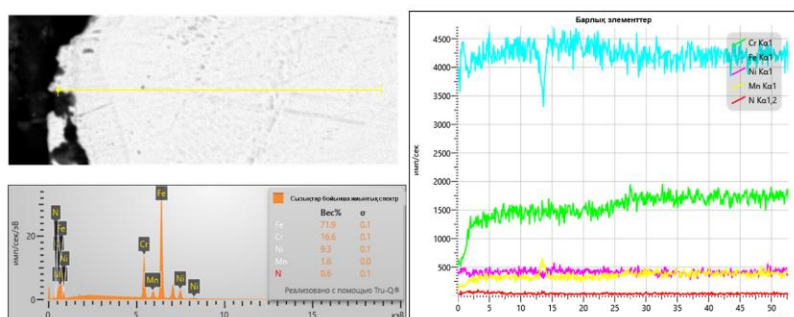
12Х18Н10Т Болаттың беткі қабаттарындағы элементтердің таралуын бағалау үшін ЕРА-дан кейін үлгінің көлденең қимасында сызықтық EDX талдауы жүргізілді. Берілген микрограф өңделген аймақты бетінен ~50 мкм тереңдікке кесіп өтетін талдау сызығын көрсетеді. Тиісті графикте негізгі элементтердің рентгендік сызықтарының қарқындылығы көрсетілген: Fe, Cr, Ni, Mn және N. Сонымен қатар композицияны жергілікті сандық талдау үшін екі аймақ бөлінді (сурет 4).

Бетіне жақын (профильдің бастапқы нүктесі, жоғарғы аймақ) азоттың жоғарылауы байқалады – 2.42 ат.%, сондай-ақ темірдің салыстырмалы түрде төмендеген мөлшері (70.00 ат.%) және хромның жоғарылауы (17.36 ат.%). Мұндай химиялық көрініс рентгендік фазалық талдау нәтижелері бойынша анықталған CrN және Fe_3N фазаларын қамтитын нитридтік аймақтың қалыптасуын растайды. Никель концентрациясы 8.62 ат құрайды.%, бұл бастапқы мазмұнға жақын, оның көрсетілген жағдайларда азоттауға инерттілігін көрсетеді.



Сурет 4 – 12X18H10T аустенитті тот баспайтын болаттың ара-дан кейінгі көлденең қимасы, РЭМ x2000 үлкейту. I-нитридті аймақ; II-өтпелі аймақ; III-бастапқы құрылым

Материалға терең енген сайын азот концентрациясы айтарлықтай төмендейді және ~50 мкм қашықтықта 0.62 ат. % құрайды, ал темір мен никельдің мөлшері 71.86 және 9.30 ат. % дейін артады тиісінше. Осылайша, қанықтылықтың диффузиялық механизміне сәйкес келетін тереңдікте азоттың таралу градиенті айқын көрінеді. Хром мен марганец шамамен 16-17 және ~1.6 ат. % деңгейінде тұрақты деңгейде сақталады сәйкесінше, бұл элементтердің нитридтік аймақтан тыс химиялық түрлендірулерге шектеулі қатысуын көрсетеді (сурет 5).



Сурет 5 – 12X18H10T аустенитті тот баспайтын болаттан жасалған энергия дисперсиялық рентгендік спектроскопия (EDX) электролитті-плазмалық азоттаудан кейін

Элементтердің таралуының жалпы көрінісі микроқұрылымдық бақылауларға сәйкес келеді және азотталған қабаттың үш аймақтық құрылымын растайды:

- жоғары азотты беттік нитридті аймақ;
- γ -Fe қатты ерітінді түріндегі азотпен өтпелі аймақ;
- және елеулі өзгерістерге ұшырамаған негізгі матрица.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, катодтық электролиттік-плазмалық азоттау (ЭПА) әдісімен аустенитті тот баспайтын 12X18H10T болатын 550 °C температурада 10 минут бойы Na_2CO_3 , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ және NH_4Cl құрамды сулы электролитте өңдеу нәтижесінде күрделі көпқабатты азотталған құрылым түзіледі. Эмиссиялық спектрлік талдау плазмада азоттың белсенді формаларының (N_2^+ , N I), сондай-ақ сутек пен оттектің болуын растады, бұл беттің тиімді түрде азотпен қанығуына ықпал етеді. На сызығының ені бойынша есептелген электрондық тығыздық шамамен $8.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ құрады, бұл өңдеу аймағындағы иондалу дәрежесінің жоғары екенін көрсетеді.

Рентгенофазалық талдау нәтижесінде беткі аймақта CrN және Fe₃N нитридтік фазаларының, сондай-ақ аустениттік торда азоттың қатты ерітіндісі FeN_{0.0499} түзілуі анықталды. Бұл құрылымдық өзгерістер тереңдік бойынша фазалардың градиентті таралуымен сипатталады, оны микроструктуралық бақылаулар мен энергия-дисперсиялық талдау (EDS) нәтижелері растады: азоттың концентрациясы беттік қабатта ең жоғары мәнге ие болып, тереңдікке қарай біртіндеп азаяды.

ЭПА процесі 12X18H10T болатында айқын аймақтық құрылым қалыптастыруда жоғары тиімділік көрсетті, ол беткі нитридтік қабаттан, өтпелі аймақтан және сақталған аустениттік матрицадан тұрады. Микротверділіктің таралуы 550 °C-тағы ЭПА өңдеуден кейін бетке жақын аймақта шамамен 480 HV дейін жетіп, 15 мкм тереңдіктен кейін 180–220 HV дейін күрт төмендейтінін көрсетті. Бұл қатайтылған аймақтың бар екенін және оның матрицамен айқын шекара арқылы бөлінетінін, яғни фазалық градиенттілікті дәлелдейді.

«Шар-диск» сұлбасы бойынша жүргізілген трибологиялық сынақтар үйкеліс коэффициентінің бастапқы күймен салыстырғанда 20%-дан астам төмендегенін көрсетті. Азотталған үлгілерде үйкеліс коэффициенті шамамен 0,6 деңгейінде тұрақтанса, бастапқы үлгілерде ол ~0,8 құрады. Бұл нәтиже қатты нитридтік фазалардың түзілуімен және адгезиялық әсердің төмендеуімен түсіндіріледі.

Алдағы зерттеулерде беттің алдын ала механикалық активтендіруінің азотталған қабаттың құрылымына, фазалық құрамына және қасиеттеріне әсері зерттеліп, оның біртектілігін, тығыздығын және пайдалану сипаттамаларын арттыру көзделіп отыр.

Әдебиеттер тізімі

1. Corrosion performance of cold deformed austenitic stainless steels for biomedical applications / M. Talha et al // Corrosion Reviews. – 2019. – Vol. 37, № 4. – P. 283-306. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0004>.
2. Narayan R.J. Medical application of stainless steels / R.J. Narayan // ASM Handbook. – 2012. – Vol. 23. – P. 199-210. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v23.9781627081986>.
3. Borgioli F. From austenitic stainless steel to expanded austenite-S phase: formation, characteristics and properties of an elusive metastable phase / F. Borgioli // Metals. – 2020. – Vol. 10, № 2. – P. 187. <https://doi.org/10.3390/met10020187>.
4. Borgioli F. Advances in low-temperature nitriding and carburizing of stainless steels and metallic materials: formation and properties / F. Borgioli, S. Adachi, T. Lindner // Metals. – 2024. – Vol. 14, № 10. – P. 1179. <https://doi.org/10.3390/met14101179>.
5. Enhanced plasma nitriding efficiency and properties by severe plastic deformation pretreatment for 316L austenitic stainless steel / Y. Lu et al // J. Mater. Res. Technol. – 2021. – Vol. 15. – P. 1742-1746. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.082>.
6. Enhancement of wear resistance by sand blasting-assisted rapid plasma nitriding for 304 austenitic stainless steel / D. Li et al // Surf. Eng. – 2020. – Vol. 36. – P. 524-530. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1641953>.
7. Stability of expanded austenite by gas nitriding process on austenitic stainless-steel material under low temperature conditions / T.L. Deepak et al // Mater. Today Proc. – 2020. – Vol. 27. – P. 1681-1684. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.571>.
8. Hannula S.P. Surface structure and properties of ion-nitrided austenitic stainless steels / S.P. Hannula, P. Nenonen, J.P. Hirvonen // Thin Solid Films. – 1989. – Vol. 181. – P. 343-350. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90502-6](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90502-6).
9. Borgioli F. Influence of surface morphology and roughness on water wetting properties of low temperature nitrided austenitic stainless steels / F. Borgioli, E. Galvanetto, T. Bacci // Mater. Charact. – 2014. – Vol. 95. – P. 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.07.006>.
10. Wang L. Effect of nitriding time on the nitrided layer of AISI 304 austenitic stainless steel / L. Wang, S. Ji, J. Sun // Surf. Coat. Technol. – 2006. – Vol. 200. – P. 5067-5070. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.05.036>.
11. Effect of alloying elements and low temperature plasma nitriding on corrosion resistance of stainless steel / Y. Liu et al // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 6575. <https://doi.org/10.3390/ma15196575>.
12. The wear and corrosion properties of stainless steel nitrided by low-pressure plasma-arc source ion nitriding at low temperatures / W. Liang et al // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 130. – P. 304-308. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00713-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00713-1).

13. Flis J. Effect of low-temperature plasma nitriding on corrosion of 304L stainless steel in sulfate and chloride solutions / J. Flis, M. Kuczynska // J. Electrochem. Soc. – 2004. – Vol. 151. – P. B573. <https://doi.org/10.1149/1.1801352>.
14. Plasma electrolytic polishing effect on steel's surface roughness after cathodic saturation with nitrogen and carbon / S.A. Kusmanov et al // Surf. Eng. Appl. Electrochem. – 2021. – Vol. 57. – P. 513-518. <https://doi.org/10.3103/S1068375521050069>.
15. Kozhanova R.S. Interaction model of low-temperature plasma with a steel surface during electrolyte plasma nitriding in an electrolyte based on carbamide / R.S. Kozhanova, B.K. Rakhadilov, W. Wieleba // Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser. – 2020. – Vol. 100. – P. 39-48. <https://doi.org/10.31489/2020ph4/39-48>.
16. Generation of a nonequilibrium plasma in heterophase atmospheric-pressure gas-liquid media and demonstration of its sterilization ability / Y.S. Akishev et al // Plasma Phys. Rep. – 2006. – Vol. 32. – P. 1052-1061. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>.
17. Barinov Y.A. Discharge with a liquid nonmetallic cathode (tap water) in atmospheric-pressure air flow / Y.A. Barinov, S.M. Shkol'nik // Technical Physics. – 2016. – Vol. 61. – P. 1760-1763. <https://doi.org/10.1134/S1063784216110049>.
18. Certain features of multichannel discharge in a tube under atmospheric pressure / G.N.T.E. Samitova et al // High Temperature. – 2011. – Vol. 49. – P. 762-765. <https://doi.org/10.1134/S0018151X11050208>.
19. Spectral diagnostics of plasma discharge between a metal cathode and liquid anode / A.F. Gaisin et al // High Temperature. – 2017. – Vol. 55. – P. 457-460. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17030087>.
20. Plasma-liquid recycling of metallic powder for 3D printing / A.F. Gaisin et al // Fiz. Khim. Obrab. Mater. – 2023. – № 1. – P. 37-44.
21. Electrical discharge between a metal cathode and a liquid non-metal anode / R.R. Kayumov et al // Plasma Phys. Rep. – 2024. – Vol. 50. – P. 115-121.
22. Electrolytic plasma nitriding of medium-carbon steel 45 for performance enhancement / Z. Satbayeva et al // Crystals. – 2024. – Vol. 14. – P. 895. <https://doi.org/10.3390/cryst14100895>.
23. NIST Atomic Spectra Database [Electronic resource]. – URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html (accessed: 22.03.2025).
24. Kielkopf J.F. Broadening of hydrogen lines / J.F. Kielkopf // J. Opt. Soc. Am. – 1973. – Vol. 63. – P. 987. <https://doi.org/10.1364/JOSA.63.000987>.
25. Kasabov G.A. Spectroscopic Tables for Low-Temperature Plasma / G.A. Kasabov, V.V. Eliseev. – Moscow: Atomizdat, 1973. – 240 p.

Алғыс

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP19579513).

А. Мәуліт^{1,*}, З.А. Сатбаева¹, Р.С. Кожанова^{1,2}, Д.Р. Байжан², А.С. Рүстемов¹

¹ТОО «Plasma Science»,
 Восточно-Казахстанский область, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7Г

²Шәкәрім университет,
 Область Абай, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
 *e-mail: maulit.almas@gmail.com

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ АУСТЕНИТНОЙ-НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Аннотация: В настоящей работе проведено исследования спектральных характеристик электрического разряда в процессе электролитно-плазменном азотировании, структурные и фазовые изменения, происходящие в аустенитной нержавеющей стали. Обработка проводилась в электролите, содержащем 10% кальцинированного сода (Na_2CO_3), 20% карбамид ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) и 3% аммоний хлорид (NH_4Cl) при температуре 550 °С в течение 10 минут. Эмиссионная спектроскопия показала присутствие активных форм азота (N_2^+ , N I), водорода ($\text{H}\alpha$) и кислорода (O I) в составе плазмы. Расчёт электронной плотности на основе уширения линии $\text{H}\alpha$ серий Бальмера дал значение порядка $8.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Рентгенофазовый анализ выявил формирование нитридных фаз CrN и Fe_3N , а также твёрдого раствора азота в $\gamma\text{-Fe}$. Микроструктурные исследования с помощью РЭМ

показали наличие трёхчленной структуры азотированного слоя: нитридной зоны, переходной области и исходный аустенитной матрицы. Энергодисперсионный рентгеновский анализ подтвердил наличие концентрационного градиента азота по глубине.

Ключевые слова: электролитно-плазменное азотирование, электрический разряд, эмиссионная спектроскопия, электронная плотность, нитридный слой, поверхностная модификация.

A. Maulit^{1,*}, Z.A. Satbayeva¹, R. Kozhanova^{1,2}, D. Baizhan², A. Rustemov¹

¹«Plasma Science» LLP,

East Kazakhstan region, Ust-Kamenogorsk, Gogol str., 7G

²Shakarim University,

Abai region, Semey, Glinka str., 20 A

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

THE EFFECT OF THE ELECTROLYTE COMPOSITION ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 45 AFTER CATHODIC ELECTROLYTE-PLASMA NITRIDING

Annotation: In the present work, a study was conducted on the spectral characteristics of the electric discharge during the electrolytic plasma nitriding process, as well as the structural and phase changes occurring in austenitic stainless steel. The treatment was carried out in an electrolyte containing 10% soda ash (Na_2CO_3), 20% carbamide ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), and 3% ammonium chloride (NH_4Cl) at a temperature of 550 °C for 10 minutes. Emission spectroscopy revealed the presence of active nitrogen species (N_2^+ , N I), hydrogen ($\text{H}\alpha$), and oxygen (O I) in the plasma composition. The calculation of electron density based on the broadening of the $\text{H}\alpha$ line from the Balmer series yielded a value of approximately $8.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. X-ray phase analysis revealed the formation of nitride phases CrN and Fe_3N , as well as a solid solution of nitrogen in $\gamma\text{-Fe}$. Microstructural investigations using SEM revealed a three-layer structure of the nitrided layer: a nitride zone, a transition region, and the original austenitic matrix. Energy-dispersive X-ray analysis confirmed the presence of a nitrogen concentration gradient with depth.

Key words: electrolytic plasma nitriding; electric discharge; emission spectroscopy; electron density; nitride layer; surface modification.

Сведения об авторах

Алмасбек Маулит* – докторант, Шәкәрім университет, научный сотрудник ТОО «PlasmaScience»; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Зарина Аскарбековна Сатбаева – доктор PhD, Science professor исследовательский школы физических и химических наук, Шәкәрім университет, г. Семей, ведущий научный сотрудник ТОО «PlasmaScience»; e-mail: zarinavkgu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Рауан Сабырбековна Кожанова – докторант, Шәкәрім университет, старший научный сотрудник, ТОО «PlasmaScience»; e-mail: kozhanovars@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-3002>.

Дарын Рашидұлы Байжан – докторант, Шәкәрім университет; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9105-3129>.

Ануар Саятбекұлы Рүстемов – студент специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, ВКТУ им. Д.Серикбаева, инженер ТОО «PlasmaScience»; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com.

Авторлар туралы мәліметтер

Мәуліт Алмасбек* – Шәкәрім университеті, «PlasmaScience» ЖШС, ғылыми қызыметкері; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Зарина Аскарбековна Сатбаева – PhD докторы, физика және химия ғылымдарының ғылыми мектебі Science professor, Шәкәрім университеті, Семей қ. «PlasmaScience» ЖШС, жетекші ғылыми қызыметкері; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Рауан Сабырбековна Кожанова – Шәкәрім университеті докторанты, «PlasmaScience» ЖШС, аға ғылыми қызметкер; e-mail: kozhanovars@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-3002>.

Дарын Рашидұлы Байжан – Шәкәрім университеті докторанты; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9105-3129>.

Ануар Саятбекұлы Рүстемов – «Техникалық физика» мамандығының студенті, Д. Серікбаев ат. «ШҚТУ» КЕАҚ, «PlasmaScience» ЖШС инженері; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com.

Information about the authors

Almasbek Maulit* – PhD student of the Shakarim University, Researcher at PlasmaScience LLP; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Zarina Askarbekovna Satbayeva – PhD, Science Professor, Research School of Physical and Chemical Sciences, Shakarim University, Semey, Leading Researcher, PlasmaScience LLP; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Rauan Sabyrbekovna Kozhanova – Doctoral student of the Shakarim University, Senior Researcher, PlasmaScience LLP; e-mail: kozhanovars@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-3002>.

Daryn Rashiduly Baizhan – Doctoral student of the Shakarim University; e-mail: daryn.baizhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-3002>.

Anuar Sayatbekovich Rustemov – student of the specialty «Technical Physics», VKTU named after D. Serikbaev, Engineer of TOO «PlasmaScience»; e-mail: anuarrustemovv05@gmail.com.

Редакцияға енуі 05.06.2025

Өңдеуден кейін түсуі 06.10.2025

Жариялауға қабылданды 07.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-72](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-72)

IRSTI: 53.01.91



A.Z. Mutushev^{1,2}, A.B. Seisenova^{1,3}, O.S. Kapizov^{1,3}, D.K. Mukhanov^{4,*}, J.M. Gonzalez-Leal⁶

¹Scientific Center for New Technologies,

Almaty, Al-Farabi 7k, Nurlu Tau Business Center, Block 5A, 334b, 050059, Kazakhstan

²Department of Chemistry, Chemical Technology and Ecology,

Almaty Technological University; Almaty, Tole bi st., 100, 050012, Kazakhstan

³AlAkSan,

Al-Farabi 7k, Nurlu Tau Business Center, Block 5A, 334b, 050059, Kazakhstan

⁴Center for Advanced Science and Technology,

Akkainar Village, Zhambyl District, Almaty Region, Suranshy Batyr Street, 26, 040602, Kazakhstan

⁵Al-Farabi Kazakh National University,

71 al-Farabi Avenue, Almaty, 050040

⁶University of Cadiz,

11510-Puerto Real, Cadiz, Spain

*e-mail: dd_511@mail.ru ;

PROCESSING OF AGRICULTURAL AND FOOD BIOWASTE BY PYROLYSIS: COMPOSITION, PREPARATION, AND APPLICATION PROSPECTS

Abstract: *In the context of the increasing accumulation of agricultural and food bio-waste (grain husks, straw, corn stalks, etc.), the development of efficient and environmentally safe processing technologies is a highly relevant task. The study analyzes modern methods of biomass utilization, including composting, anaerobic digestion, biopolymer production, and the manufacture of construction materials. Pyrolysis has been selected as the primary processing technology, as it enables the production of a wide range of products – biochar, liquid and gaseous fuels – that can be potentially applied in agriculture, energy, and industry. The chemical composition of the initial bio-waste (cellulose, lignin, ash-forming elements) is characterized, and the methods of their preparation (drying, grinding, pretreatment) are discussed. The results of laboratory studies are presented, confirming the effectiveness of pyrolysis in producing valuable products. A comparative assessment with existing analogues has been carried out, along with an analysis of the environmental benefits (reduction of CO₂ and CH₄ emissions, decrease in landfilled waste volumes) and an economic evaluation of the prospects for industrial implementation. It is shown that bio-waste processing by pyrolysis has high practical significance for addressing resource conservation and environmental protection challenges. The study demonstrates the potential applications of the obtained products as organic fertilizers, energy sources, sorbents, and components of construction materials. Promising directions for further research are identified, including combined processing technologies and the expansion of the spectrum of target products.*

Key words: *biowaste, pyrolysis, biochar, renewable resources, recycling, eco-technologies, sustainable development.*

1. Introduction

Modern agriculture and the food industry generate vast amounts of biowaste each year, primarily in the form of plant residues such as straw, cereal husks, corn stalks, sunflower husks, and