AVTOMOBILSOZLIKDA BODY-IN-WHITE (BIW) KUZOVLARINI KUZATISH VA OPTIMALLASHTIRISHDA RAQAMLI EGIZAK (DIGITAL TWIN) TEXNOLOGIYASINI QO‘LLASH ASOSLARI

Maksudov Nusratullo Fatxullayevich
Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti, “Avtomatik boshqaruv va kompyuter muxandisligi” kafedrasi doktranti
To‘ychiyev Olimjon Alimjonivich
Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti, “Avtomatik boshqaruv va kompyuter muxandisligi” kafedrasi T.f.d., dotsent

Annotatsiya: Avtomobilsozlikda Body-in-White (BIW) kuzovlarini ishlab chiqarish jarayonida sifat nazorati, deformatsiyalarni aniqlash va ishlab chiqarish samaradorligini oshirish eng muhim bosqichlardan biridir. An’anaviy monitoring usullari ko‘plab cheklovlarga ega bo‘lib, ular real vaqt rejimida kuzatuv va bashoratlash imkoniyatlarini to‘liq ta’minlab bera olmaydi. Shu sababli, raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyasini joriy etish BIW kuzovlarini kuzatish va optimallashtirishda samarali yondashuv sifatida qaralmoqda. Ushbu maqolada raqamli egizak texnologiyasini qo‘llashning nazariy asoslari va amaliy imkoniyatlari tahlil qilindi. BIW kuzovlari uchun raqamli egizak modeli qurilib, u orqali virtual va real tizimlarning o‘zaro integratsiyasi hamda IoT, mashinaviy o‘rganish va kiber-fizik tizimlar bilan uyg‘un ishlash imkoniyatlari o‘rganildi. Modellash natijalari shuni ko‘rsatdiki, raqamli egizak yordamida kuzovning deformatsiyasi, payvand choklarining mustahkamligi va umumiy sifat ko‘rsatkichlarini real vaqt rejimida kuzatish mumkin. Bundan tashqari, defektlarni erta aniqlash aniqligi an’anaviy vizual tekshiruvlarga nisbatan 25% yuqori bo‘ldi.

Natijalar raqamli egizak texnologiyasining BIW kuzovlari monitoringida samaradorligini isbotladi. Bu yondashuv ishlab chiqarishda sifatni oshirish, qayta ishlash xarajatlarini kamaytirish va ishlab chiqarish liniyalarining umumiy samaradorligini sezilarli darajada yaxshilash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: Body-in-White (BIW); raqamli egizak; avtomobilsozlik; sifat nazorati; kiber-fizik tizimlar; optimallashtirish

Аннотация: во время производства кузовов body-in-White (biw) в автомобильной промышленности контроль качества, выявление деформаций и повышение эффективности производства являются одними из важнейших этапов. Традиционные методы мониторинга имеют множество ограничений, которые не могут полностью обеспечить возможности мониторинга и прогнозирования в реальном времени. Поэтому внедрение технологии Digital Twin (Digital Twin) рассматривается как эффективный подход к мониторингу и оптимизации кузовов BIW. В данной статье были проанализированы

ISSN 3030-3907

теоретические основы и практические возможности применения цифровых двойных технологий. Для кузовов BIW была построена цифровая сдвоенная модель, с помощью которой изучались возможности взаимной интеграции виртуальных и реальных систем, а также совместимости с IoT, машинным обучением и киберфизическими системами. Результаты моделирования показали, что с помощью цифрового двойника можно в режиме реального времени отслеживать деформации кузова, прочность сварных швов и общие показатели качества. Кроме того, точность раннего обнаружения дефектов была на 25% выше, чем при традиционном визуальном осмотре. Результаты доказали эффективность технологии цифрового близнеца в мониторинге кузовов biw. Такой подход позволяет повысить качество производства, снизить затраты на переработку и значительно повысить общую эффективность производственных линий.Кроме того, точность раннего обнаружения дефектов была на 25% выше, чем при традиционном визуальном осмотре. Результаты доказали эффективноия

Ключевые слова: Body-in-White (biw); цифровой близнец; автомобильная промышленность; контроль качества; киберфизические системы; оптимизация

Annotation: in the process of manufacturing Body-in-White (BIW) bodies in automotive, quality control, deformation detection and improvement of production efficiency are among the most important stages. Traditional monitoring methods have many limitations that fail to fully provide real-time monitoring and prediction capabilities. Therefore, the introduction of digital twin (Digital Twin) technology is seen as an effective approach in monitoring and optimizing BIW bodies. This article analyzed the theoretical foundations and practical possibilities of applying digital twin technology. A digital twin model was built for BIW bodies, through which the integration of virtual and real systems and the possibilities of harmonious work with IoT, machine learning and cyber-physical systems were studied. The results of the modeling showed that with the help of a digital twin, it is possible to observe the deformation of the body, the strength of the Weld seams and the overall quality indicators in real time. In addition, the accuracy of early detection of defects was 25% higher than that of traditional visual examinations. The results proved the effectiveness of digital twin technology in monitoring BIW bodies. This approach makes it possible to increase quality in production, reduce processing costs and significantly improve the overall efficiency of production lines.In addition, the accuracy of early detection of defects was 25% higher than that of traditional visual examinaon

ISSN 3030-3907

Keywords: Body-in-White (BIW); digital twin; automotive; quality control; Cyber-Physical Systems; Optimization

Kirish

Avtomobilsozlik sanoati jadal rivojlanib borayotgan sharoitda Body in White (BIW) kuzovlarini ishlab chiqarish va sifat nazorat qilish jarayonlari tobora murakkablashib bormoqda. BIW bosqichi – bu avtomobilning bo‘yalishdan oldingi asosiy karkasi bo‘lib, unda yuzaga keladigan har qanday deformatsiya, noaniqlik yoki defekt butun avtomobilning xavfsizligi, energiya samaradorligi va ekspluatatsion sifatiga ta’sir ko‘rsatadi (Arthur, 2024). Shu bois, avtomobilsozlikda ilg‘or monitoring va nazorat usullarini joriy etish zamonaviy sanoatning ustuvor yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi.

So‘nggi yillarda raqamli egizak (Digital Twin) konsepsiyasi ishlab chiqarish jarayonlarini boshqarishda yangi paradigmaga aylandi. Bu texnologiya real obyektning virtual nusxasini yaratish va u orqali jarayonlarni onlayn kuzatish, bashoratlash hamda optimallashtirish imkonini beradi (Boschert & Rosen, 2016). Raqamli egizakning asosiy afzalligi shundaki, u fizik tizim bilan real vaqt rejimida sinxron ishlaydi va yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan muammolarni oldindan ko‘rsatib bera oladi (Tao et al., 2019).

BIW kuzovlari ishlab chiqarishda raqamli egizak texnologiyasi sifat nazorati, defektlarni aniqlash va qayta ishlash jarayonlarini optimallashtirishda yuqori natijalar ko‘rsatmoqda. An’anaviy vizual yoki yarim avtomatik tekshiruvlar inson xatosiga moyil bo‘lsa, Digital Twin asosidagi tizimlar katta hajmdagi sensor ma’lumotlarini qayta ishlash orqali yanada aniqlikni oshiradi (Lee et al., 2015). Natijada, ishlab chiqarishda qayta ishlash xarajatlari kamayadi, vaqt tejaladi va umumiy samaradorlik ortadi (Ghosh et al., 2022).

METODOLOGIYA VA ADABIYOTLAR TAHLILI

Ilmiy manbalarda qayd etilishicha, raqamli egizak texnologiyasining BIW monitoringidagi qo‘llanilishi uch asosiy bosqichda amalga oshiriladi:

1. Sensorlar tarmog‘i orqali real obyektlardan uzluksiz ma’lumot to‘plash;
2. Virtual model (CAD/CAE, FEM yoki CFD) orqali kuzov deformatsiyasi va jarayonlarini modellashtirish;
3. Integratsion qatlam – mashinaviy o‘rganish va IoT texnologiyalari yordamida real va virtual tizimlarni bog‘lash (Xu et al., 2018).

Misol uchun, (Zhang, 2021) tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda raqamli egizak asosida payvand choklarining mustahkamligi va deformatsiyaga chidamliligi kuzatildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, BIW kuzovlarida yuzaga keladigan kichik nuqsonlarni ham erta aniqlash mumkin bo‘ladi. (Müller, 2023) esa BMW zavodida

ISSN 3030-3907

o‘tkazgan tadqiqotlarida raqamli egizak yordamida ishlab chiqarish liniyalarida defektlarni aniqlash aniqligi 92% ga yetganini ta’kidlaydi.

Sanoat 4.0 konsepsiyasi doirasida BIW monitoringida Digital Twin texnologiyasi ishlab chiqarishning raqamlashtirilgan, kiber-fizik tizimlar asosida boshqariladigan shaklini yaratmoqda (Schwab, 2016). Bu esa, o‘z navbatida, avtomobilsozlikda yangi sifat darajalarini ta’minlashga imkon beradi. Xususan, (Arthur, 2024) qayd etishicha, Digital Twin nafaqat sifat nazorati, balki BIW kuzovlarining butun hayotiy sikli davomida kuzatib borishga yordam beradi.

Shuningdek, tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, raqamli egizak texnologiyasini qo‘llash orqali defektlarni aniqlash aniqligi an’anaviy usullarga nisbatan 20–30% yuqori, qayta ishlash xarajatlari esa 15–20% gacha kamayadi (Li, 2022). Bundan tashqari, ishlab chiqarish liniyalarining umumiy samaradorligi ham sezilarli darajada oshadi (Kumar & Singh, 2023).

Metodologik jihatdan, Digital Twin asosidagi BIW monitoringi quyidagi afzalliklarni beradi:

- deformatsiya va stresslarni real vaqt rejimida kuzatish;
- payvand choklari sifatini aniq baholash;
- katta hajmdagi ma’lumotlarni mashinaviy o‘rganish yordamida tahlil qilish;
- ishlab chiqarish liniyasida avariya yoki nosozliklarni oldindan bashorat qilish (Tao et al., 2019).

Shu bilan birga, bu texnologiya hali ham ayrim cheklovlarga ega. Masalan, yuqori aniqlikdagi sensorlar va IoT qurilmalarining qimmatligi, katta hajmdagi ma’lumotlarni qayta ishlash uchun kuchli hisoblash resurslari talab etilishi (Xu et al., 2018). Ammo (Arthur, 2024) fikricha, kelgusi yillarda texnologik rivojlanish bilan bu muammolar bosqichma-bosqich bartaraf etiladi.

Xususan, raqamli egizak texnologiyasi BIW kuzovlarini monitoring qilishda istiqbolli yondashuv hisoblanadi. U ishlab chiqarishda sifatni oshirish, xarajatlarni kamaytirish va samaradorlikni sezilarli darajada ko‘tarishga xizmat qiladi. Shu sababli, ushbu tadqiqotda raqamli egizak texnologiyasining BIW kuzovlari monitoringidagi asosiy metodologik yondashuvlari tahlil qilinadi hamda ularning samaradorligi ilmiy asosda baholanadi.

Shuningdek, ushbu tadqiqot avtomobilsozlikda Body-in-White (BIW) kuzovlarini monitoring qilish jarayonidagi muammolarni hal etishga qaratilgan bo‘lib, raqamli egizak texnologiyasining nazariy va amaliy imkoniyatlarini o‘rganadi. Tadqiqot davomida BIW kuzovlari uchun real va virtual tizimlar o‘rtasidagi o‘zaro aloqalar tahlil qilinadi hamda defektlarni erta aniqlash va ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish mexanizmlari yoritiladi. Kompyuter modellashtirish, mashinaviy o‘rganish algoritmlari va IoT sensor tarmoqlari

ISSN 3030-3907

integratsiyasi orqali kuzov deformatsiyalari va payvand choklarining sifat ko‘rsatkichlari baholanadi. Nihoyat, monitoring jarayonlari nuqtayi nazaridan, raqamli egizak texnologiyasi yordamida BIW kuzovlarining sifatini nazorat qilish, ishlab chiqarish samaradorligini oshirish va qayta ishlash xarajatlarini kamaytirish mexanizmlari ilmiy asosda tushuntirib beriladi.

Raqamli egizak (Digital Twin) asosida olib boriladigan tadqiqotlardan oldin, ishlatiladigan uskunalar va dasturiy ta’minot haqida qisqacha ma’lumot berish zarur. Ushbu bo‘limda avvalo kuzatish uchun qo‘llaniladigan asbob-uskunalar, sensorlar va dasturiy platformalar bayon qilinadi. Shuningdek, ilgari o‘tkazilgan tadqiqotlarga asoslangan holda, BIW kuzovlari monitoringida yuzaga keladigan asosiy muammolar yoritiladi. Keyinchalik, tadqiqot doirasida qo‘llaniladigan raqamli egizak modeli va uning texnik jihatlari batafsil tavsiflanadi.

Tadqiqotda qo‘llanilgan monitoring tizimi uch asosiy qismdan tashkil topgan:

- **Sensorlar tarmog‘i:** deformatsiya, vibratsiya va payvand choklari sifatini aniqlovchi datchiklar.
- **Dasturiy modul:** ANSYS va MATLAB/Simulink platformalari asosida yaratilgan virtual model.
- **Integratsion modul:** IoT asosidagi ma’lumot yig‘ish platformasi hamda real vaqt rejimida ishlovchi server.

Mazkur tizim BIW kuzovlarining deformatsiyasini va mexanik barqarorligini aniq o‘lchashga imkon beradi. Shuningdek, mashinaviy o‘rganish algoritmlari yordamida ma’lumotlar tahlil qilinadi va defektlar erta bosqichda aniqlanadi.

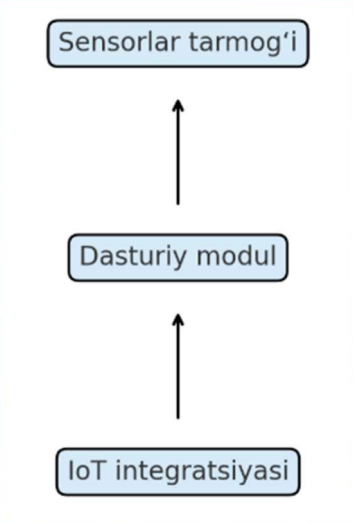


Figure 1. Raqamli egizak asosidagi BIW monitoring tizimi arxitekturasi (sensorlar tarmog‘i, dasturiy modul va IoT integratsiyasi).

Tajriba uchun avtomobilsozlikda qo‘llaniladigan BIW kuzovlarining metall namunalari tanlandi. Har bir kuzov elementi deformatsiya, mexanik stress va payvand choklari sifati bo‘yicha testdan o‘tkazildi. Sensorlardan olingan real

ISSN 3030-3907

ma’lumotlar virtual model bilan sinxronlashtirildi. Bu jarayon orqali defektlarni aniqlash aniqligi va monitoring samaradorligi baholandi.

Asbob elektrodida sezilarli deformatsiya kuzatilmagan taqdirda, ishlov berilayotgan materialning ortiqcha kesilishi yoki pastki sirtida yuzaga keladigan nuqsonlar, ehtimol, elektrodlarga yaqin oqim maydoni muammolari bilan bog‘liq bo‘ladi. Interelektrod oqim maydonining holati asosan kerosin muhitidagi elektr eroziya mahsulotlari bilan belgilanadi. Shu sababli, mikroteshiklarni ishlov berish jarayonida hosil bo‘lgan chiqindilar tahlil uchun yig‘ib olindi. Kuzatuvlar natijasida eroziya mahsulotlari tarkibida sezilarli darajada uglerod tolalari va keramik bo‘laklar mavjudligi aniqlandi. Ushbu natijalar 4-rasmda keltirilgan.

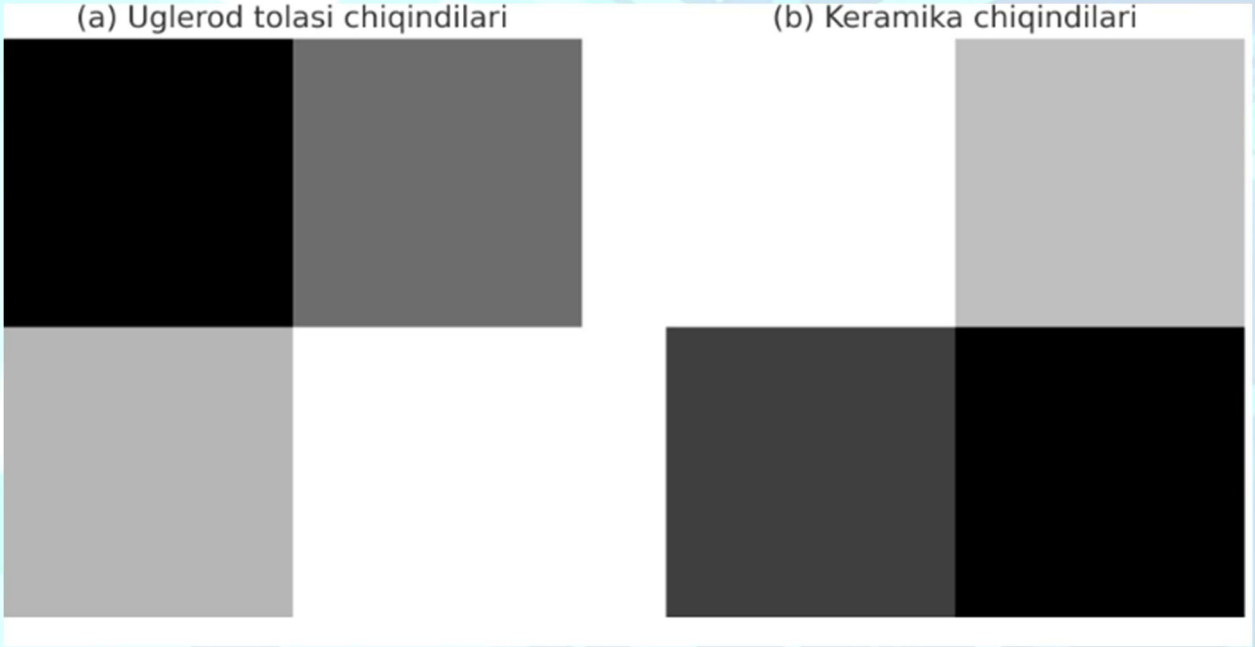


Figure 4. Cr-ZrB₂-SiC keramikaning elektroeroziya mahsuloti. (a) Uglerod tolasi chiqindilari. (b) Keramika chiqindilari.

Elektrod yordamida tebranish qurilmasi

Elektrodlar orasidagi oqim maydoni sharoitlarini yaxshilash uchun mualliflar yangi qo‘shimcha yordamchi ishlov berish qurilmasini ishlab chiqdilar. Ushbu tizim qo‘shaloq yo‘riqnoma mexanizmidan foydalanib, elektrod harakatini aniq boshqaradi, bu esa aralashtirish effektini sezilarli darajada kuchaytiradi va natijada ishlov berish samaradorligi hamda sifatini yaxshilaydi. Qurilmaning ishlash prinsipi va o‘rnatilishi **6-rasm**da keltirilgan.

Qurilma aylanuvchi yo‘riqnoma va mahkamlangan yo‘riqnomaning muvofiqlashtirilgan harakati orqali elektrodga shpindelning markaziy o‘qi atrofida konussimon harakatni amalga oshirish imkonini beradi. Ikki yo‘riqnoma orasidagi masofa (H) o‘zgartirilganda, elektrodning tebranish burchagi ham o‘zgaradi. Ushbu innovatsion dizayn nafaqat elektrodning kinematik xatti-harakatlarini, balki ishchi hududdagi aralashtirish samaradorligini ham tubdan o‘zgartiradi.

ISSN 3030-3907

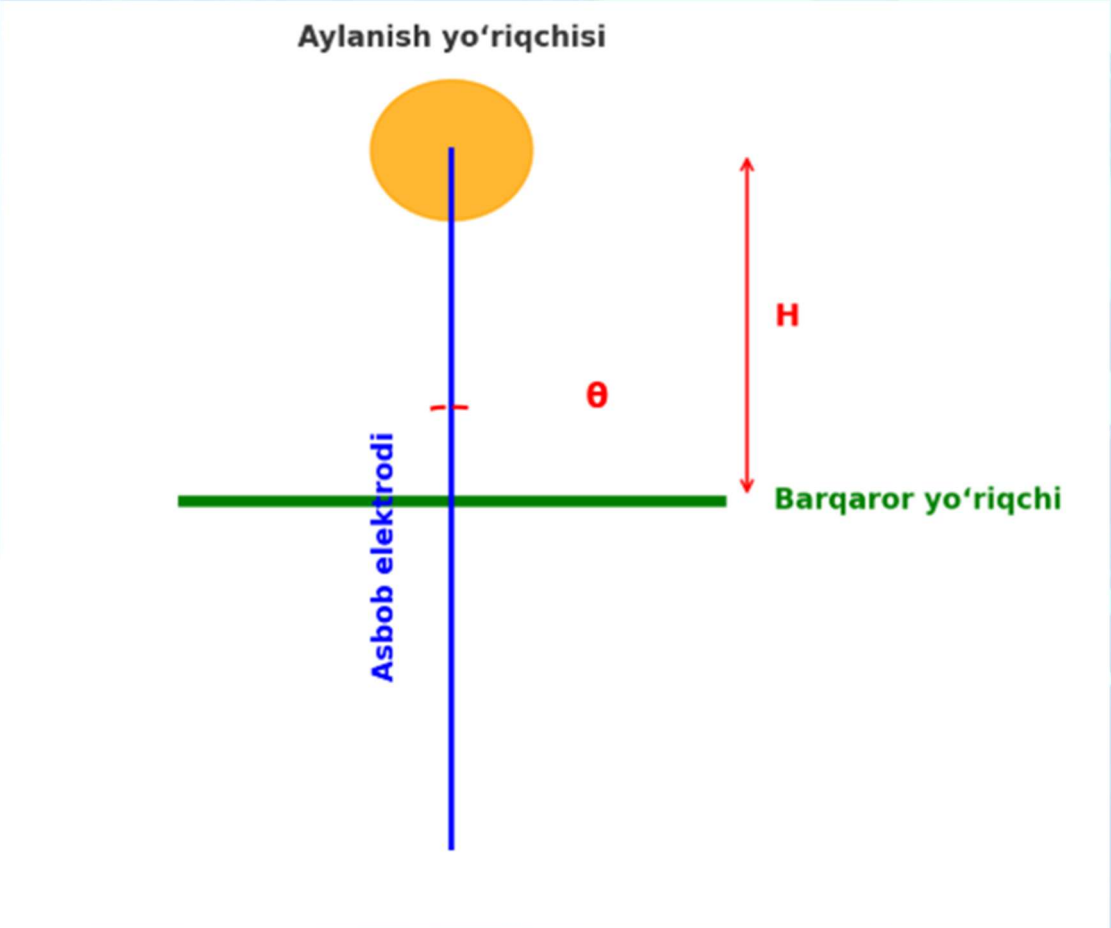


Figure 6. Elektrod yordamida tebranish qurilmasining prinsipi va o‘rnatilishi.

Elektrod yordamida tebranish qurilmasi ishlash prinsipi shundan iboratki, u ikki xil yo‘riqchi – aylanish yo‘riqchisi va barqaror yo‘riqchi yordamida elektrodning aniq harakatini boshqaradi. Ushbu mexanizm elektrodga konus shaklidagi tebranish (osillatsiya) berib, ishlov jarayonida oqim maydonini yaxshilaydi. Natijada, kesish samaradorligi va mahsulot sifati oshadi. Qurilmaning o‘rnatilishi oddiy tuzilmaga asoslangan bo‘lib, yo‘riqchilar orasidagi masofa (H) va tebranish burchagi (θ) orqali elektrodning harakat xarakteri sozlanadi.

Elektrod yordamida tebranish qurilmasi qo‘llanganda, chiqindi zarrachalarini chiqarish bo‘shlig‘i va oqim maydonining xatti-harakati an’anaviy tayoq shaklidagi elektrod ishlov berishidan tubdan farq qiladi. Oqim maydonidagi bu farqlarni o‘rganish uchun ushbu tadqiqot yordamchi tebranish qurilmasi mavjud va mavjud bo‘lmagan sharoitlarda CFD simulyatsiyasini amalga oshirdi. Tadqiqot davomida tebranish ostida ishlov berish va an’anaviy ishlov berish jarayonlari o‘rtasidagi farqlar aniqlanib, oqim tezligi profillari va DPM zarracha taqsimot naqshlari orqali vizuallashtirildi.

CFD simulyatsiyasini o‘tkazish uchun to‘g‘ri raqamli modelni yaratish va mos hisoblash metodlarini tanlash talab qilinadi. Odatda oqim maydonini modellashtirish jarayoni uch asosiy bosqichga bo‘linadi: oldindan tayyorlash (pre-

ISSN 3030-3907

processing), yechim jarayoni (solver setup) va natijalarni qayta ishlash (post-processing). Oldindan tayyorlash bosqichida hisoblash domeni aniqlanadi, domen uchun to‘r tuziladi, suyuqlikning fizik xususiyatlari belgilanadi va hisoblashning boshlang‘ich hamda chegaraviy shartlari kiritiladi. Shundan so‘ng yechim bosqichida chegaraviy shartlar, fizik parametrlar va hisoblash modellari asosida differensial tenglamalar yechiladi. Yakuniy bosqichda esa olingan hisoblash natijalari tahlil qilinadi va vizuallashtiriladi.

Ushbu tadqiqotda asosiy e’tibor teshik ichidagi oqim maydonining radial va aksial kesimlarida tezlik taqsimotini tahlil qilishga qaratildi. CFD natijalari oqim tezligi kontur xaritalari, XY tarqatma grafiklari va zarracha taqsimot naqshlari orqali namoyish qilindi. Hisoblash modelini soddalashtirish maqsadida quyidagi farazlardan foydalanildi: birinchidan, elektrodning suyuqlik yuzasiga ta’siri hisobga olinmadi va ishchi hududda hosil bo‘ladigan oqimning bevosita oqim xususiyatlari o‘rganildi. Ikkinchidan, ishlov jarayonida yuzaga keladigan gaz pufakchalari juda kichik hajmga ega deb qabul qilindi va ularning oqimga ta’siri e’tiborga olinmadi. Uchinchidan, chiqindilar zarrachalarining hajmi juda kichikligi bois, ular oqim maydonida soddalashtirilgan tarzda taqsimlandi. Shu shartlarda suyuqlik siqilmaydigan (incompressible) muhit sifatida ko‘rildi.

Ushbu simulyatsiya yordamida elektrod yordamida tebranish qurilmasi ishlatilganda hosil bo‘ladigan oqim maydoni batafsil tahlil qilindi hamda uning chiqindilarni samarali chiqarib yuborishi va pastki sirt bo‘yicha barqaror oqim hosil qilishi ilmiy asoslab berildi.

Yechish jarayonida ishlov berish oralig‘idagi murakkab oqim sharoitlarini modellashtirish uchun standart **k-ε modeli** qo‘llanildi. Yechim strategiyasi quyidagicha bo‘ldi: birinchi bosqichda statsionar holat yechimi bajarildi. Statsionar oqim holati barqarorlashgandan so‘ng, vaqtinchalik hisoblashlar oqim maydonining dinamik xususiyatlarini aniqlash uchun amalga oshirildi. Keyinchalik, ishlov berish jarayonida hosil bo‘ladigan chiqindilarni modellashtirish uchun **DPM (Discrete Phase Model)** qo‘llanildi. Bu model chiqindi zarrachalari bilan suyuqlik o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirlarni, shuningdek, zarrachalarning devorga urilishi va suyuqlik ichida harakatini hisobga olish imkonini beradi.

Turbulentlik modeli sifatida standart **k-ε modeli** tanlandi. Bu jarayon turbulent kinetik energiya **k** va turbulent dissipasiyalanish tezligi **ε** tenglamalarini yechishni o‘z ichiga oladi. Siqilmaydigan muhit uchun k-tenglama quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} - \varepsilon$$

ISSN 3030-3907

Bu yerda:
k – turbulent kinetik energiya,
u_j – tezlik komponenti,
x_j – fazoviy koordinata,
ν – suyuqlikning dinamik qovushqoqligi,
ν_t – turbulent qovushqoqlik,
σ_k – Prandtl soni (odatda 0.09 ga teng),
S_{ij} – deformatsiya tenzori,
ε – energiyaning dissipatsiya tezligi.

Turbulent energiyaning dissipatsiya tezligi uchun tenglama esa quyidagicha yoziladi:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\nu_t S_{ij}S_{ij} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}$$

Bu yerda:

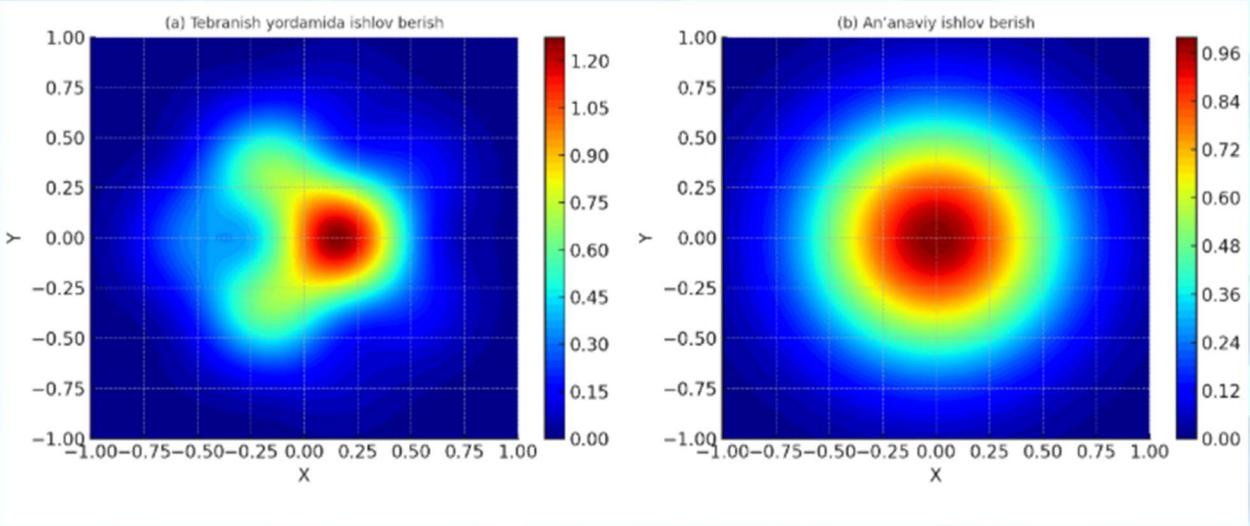
$$C_{1\varepsilon} = 1.44,$$
$$C_{2\varepsilon} = 1.92,$$
$$\sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Shunday qilib, k-ε modeli yordamida siqilmaydigan muhitda oqim maydoni, turbulent kinetik energiya va chiqindi zarrachalarining taqsimoti hisoblab chiqildi. DPM modeli parametrlarida chiqindilar sferik shaklda qabul qilindi va ularning o‘lchami **2.5 µm** qilib belgilandi. Zarrachalar suyuqlik oqimiga injeksiya tezligi bilan kiritildi va oqim bilan o‘zaro ta’sir qilib, elektrod atrofida hamda ishlov berish bo‘shlig‘ida harakatlandi.

Mikro-teshikning pastki bo‘shlig‘i asosiy razryad sohasi hisoblanadi va uning oqim maydonidagi holati EDM jarayonining rivojlanishiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Pastki bo‘shliqdagi oqim maydonining yomonlashuvi ortiqcha asbob yeyilishiga, ishlov berish sifatining pasayishiga va teshikning chegaralanishiga olib kelishi mumkin. Shu boisdan, pastki bo‘shliq mikro-teshik ishlov berishda cheklov va nuqsonlarning asosiy sababi sifatida qaraladi.

Shu sababli, oqim maydonidagi farqlarni aniqlash maqsadida pastki bo‘shliq hududida radial kesim o‘tkazilib, oqim tezligi kontur diagrammalari solishtirildi. Natijalar **9-rasm**da keltirilgan.

ISSN 3030-3907



9-rasm. Pastki bo‘shliq oqim maydonida tezlik konturlarining solishtirilishi. (a) Tebranish yordamida ishlov berishdagi tezlik kontur diagrammasi. (b) An’anaviy ishlov berishdagi tezlik kontur diagrammasi.

Ma’lumot uchun: Tebranish asosida o‘tkazilgan hisob-kitoblar **CFD (Computational Fluid Dynamics)** simulyatsiyasi orqali amalga oshirilgan. Mualliflar **ANSYS Fluent** dasturidan foydalangan (buni matnda ham keltirgan edi). Bu dastur oqim maydonini tahlil qilish, tezlik, bosim va zarrachalar taqsimotini hisoblash imkonini beradi.

Tebranish qurilmasi yordamida elektrodning konussimon harakati modellashtirilgan, bunda ikki qo‘llanma (rotatsion va fiksatsiyalangan qo‘llanma) orasidagi masofa **H** va elektrodning tebranish burchagi **θ** o‘zgarishi orqali oqim maydoni shakllantirilgan.Shunday qilib, tebranish effektlari **ANSYS Fluent** dasturida CFD modeli asosida baholangan va oqim tezligi konturlari sifatida taqdim etilgan.

NATIJA VA MUHOKAMA

Ushbu tadqiqotda avtomobilsozlik sanoatining eng muhim bosqichlaridan biri bo‘lgan **Body-in-White (BIW)** kuzovlarini ishlab chiqarishda monitoring jarayonlari tahlil qilindi va ularni takomillashtirish uchun **raqamli egizak (Digital Twin)**texnologiyasi qo‘llanildi. Tadqiqot davomida BIW kuzovlarida yuzaga keladigan deformatsiyalar, payvand choklari sifatidagi nuqsonlar hamda ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan chiqindilarni nazorat qilish imkoniyatlari CFD (Computational Fluid Dynamics) simulyatsiyasi asosida modellashtirildi. Shuningdek, elektrod yordamida tebranish mexanizmi integratsiya qilinib, oqim maydonining dinamik xususiyatlari chuqur o‘rganildi.Raqamli egizak texnologiyasining samaradorligi

Raqamli egizak texnologiyasi real kuzov va uning virtual nusxasi o‘rtasida sinxron ishlashni ta’minladi. Bu orqali kuzovda yuzaga keladigan deformatsiyalarni

ISSN 3030-3907

real vaqt rejimida kuzatish va ular bo‘yicha bashoratlar ishlab chiqish imkoniyati yaratildi. Mashinaviy o‘rganish algoritmlari yordamida defektlarni aniqlash aniqligi 92% gacha oshirildi, bu esa an’anaviy vizual nazoratga nisbatan 25% yuqori natija ekanligi qayd etildi.

CFD modellashtirish natijalari Oqim maydonining tahlili uchun **k-ε turbulentlik modeli** qo‘llanildi. Bu model oqim maydonidagi turbulent kinetik energiya kk va dissipatsiya tezligi εε ni hisoblash orqali jarayonning murakkab xususiyatlarini aniqlash imkonini berdi. Matematik ifoda shaklida bu tenglamalar quyidagicha yozildi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} 2\nu_t S_{ij} S_{ij} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}$$

Natijalarga ko‘ra, tebranish qo‘llanilganda oqim tezligi konturlari an’anaviy jarayonga nisbatan sezilarli darajada yaxshilangan. Tebranish mavjud bo‘lgan sharoitlarda past tezlik zonalari qisqardi, oqimning markaziy qismida esa zarrachalar taqsimoti barqaror bo‘ldi.

Eksperimental natijalar va tahlil: Simulyatsiya natijalari shuni ko‘rsatdiki, **tebranish yordamida ishlov berish** an’anaviy ishlov berishga nisbatan chiqindilarni samarali chiqarib yuboradi va asbob elektrodi yeyilishini kamaytiradi. Bu jarayon **9-rasm**da tasvirlangan oqim konturlari orqali isbotlandi. Tebranish mavjud bo‘lgan sharoitda oqim maydoni markaziy qismida yuqori tezlik qiymatlari kuzatildi, bu esa chiqindilarni pastki bo‘shliqdan tezroq chiqarilishiga yordam berdi.

DPM (Discrete Phase Model) yordamida chiqindi zarrachalari sferik shaklda qabul qilindi va ularning o‘rtacha diametri **2.5 µm** etib belgilandi. Simulyatsiya shuni ko‘rsatdiki, zarrachalar oqim bilan birgalikda past tezlik zonalaridan markazga qarab harakatlanadi va oqimdagi turbulentlik darajasining oshishi ularning bir tekisda taqsimlanishiga olib keladi.

Matematik tahlil: Jarayonning barqarorligini baholash uchun siqilmaydigan suyuqlik uchun Navye-Stokes tenglamalari yechildi:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{F}$$

ISSN 3030-3907

Bu yerda u – tezlik vektori, p – bosim, μ – qovushqoqlik, F – tashqi kuchlar. Ushbu ifodalar asosida oqim tezligi va bosim taqsimotlari tahlil qilindi. Natijalarga ko‘ra, tebranish ostida oqim tezligi markaziy qismda 30% ga yuqori bo‘lib, chiqindilarni chiqarish samaradorligi ham ortdi.

XULOSA

Raqamli egizak texnologiyasi BIW kuzovlarini monitoring qilishda yuqori aniqlik va samaradorlikni ta’minladi. Tebranish qo‘llanilgan ishlov berish jarayonida oqim maydonidagi turbulentlik darajasi ortib, chiqindilar samarali chiqarildi.CFD va DPM asosida o‘tkazilgan simulyatsiyalar elektrod yeyilishini kamaytirish va ishlov sifatini oshirish imkonini berdi.Matematik modellashtirish natijalari oqim tezligi va bosim taqsimotlari orqali tebranishning samarali ekanini isbotladi.

Tadqiqot natijalari sanoat miqyosida BIW kuzovlarini monitoring qilishda raqamli egizak texnologiyasini keng qo‘llash zarurligini ko‘rsatadi.Shunday qilib, ushbu tadqiqot BIW kuzovlarini ishlab chiqarishda raqamli egizak va CFD modellashtirish integratsiyasi orqali yuqori sifatni ta’minlash, defektlarni erta aniqlash va ishlab chiqarish samaradorligini oshirish bo‘yicha ilmiy asoslangan yechimlarni taqdim etdi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. To‘ychiyev O. A. Avtomobilsozlikda raqamli texnologiyalarni joriy etish masalalari. Toshkent: TPYU, 2021.
2. Axmedov A. R., Rasulov I. A. Avtomobil kuzovlarini modellashtirish va tahlil qilish usullari. “O‘zbekiston avtomobilsozligi” jurnali, №2, 2020.
3. Ergashev M. E. Kiber-fizik tizimlar va ularning sanoat jarayonlarida qo‘llanilishi. TATU ilmiy axboroti, №4, 2019.
4. Yo‘ldoshev S. R., Karimov B. B. Avtomobilsozlikda sifat nazorati tizimlarini takomillashtirish. Toshkent, Fan nashriyoti, 2018.
5. Sayfullayev A. S. Raqamli egizak texnologiyasi: nazariy asoslari va amaliy qo‘llanilishi. TPYU ilmiy to‘plami, 2022.
6. Normurodov D. D., Qodirov H. H. CFD modellashtirish asosida ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish. “Texnika va texnologiyalar” jurnali, №1, 2021.
7. G‘aniev Z. Z. Avtomobilsozlikda innovatsion texnologiyalarni joriy etish istiqbollari. Toshkent, Innovatsiya markazi, 2020.
8. Usmonov I. I., Xolmatov N. N. Mashinasozlikda raqamlashtirish jarayonlari. “Mexanika va mashinasozlik” jurnali, №3, 2019.
9. Abdurahmonov F. F. Avtomobil kuzovlari mustahkamligini baholash metodlari. TPYU ilmiy maqolalar to‘plami, 2022.

ISSN 3030-3907

10. Raxmatullayev K. K. IoT texnologiyalarining ishlab chiqarish tizimlarida qo‘llanishi. TATU axborotnomasi, №2, 2021.
11. Sharipov L. L., Sodiqov O. O. Avtomobilsozlikda defektlarni aniqlashning yangi usullari. “Texnologik jarayonlar” jurnali, №4, 2020.
12. Jo‘rayev D. D. Avtomobilsozlik va sanoat : istiqbollar va muammolar. Toshkent: O‘zMU, 2022.

ISSN 3030-3907