

Металлургия, жаңа материалдар технологиясы

DOI: <https://doi.org/10.53002/091>

FOAMING OF THE METAL UNDER STUDY USING X-RAY FLUOROSCOPY

Abzhanova L.K.

Almaty University of energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan

**Corresponding author e-mail: l.abzhanova@aes.kz*

Author information:

Abzhanova Laulasyn Kasylganovna, Almaty University of energy and Communications named after G. Daukeev, Aktau, Kazakhstan, e-mail: l.abzhanova@aes.kz

Abstract — Metal foam is produced using titanium hydride as a foaming agent. Carbonates produce aluminum foam with a thin and homogeneous cell structure. However, foams produced using carbonates show a pronounced shrinkage, which is clearly different from the one in which titanium hydride is used. For practical use, it is very important to clarify the shrinkage of the foam and establish a method of its prevention. In this study, cell structures were observed to study the shrinkage of aluminum foam produced using carbonates. Foam cells are associated with each other with maximum expansion produced using dolomite as a foaming agent. It was believed that the foaming gas was expelled to the outside through the connected cells. Cell formation at different sites has been thought to be effective in preventing contractions caused by cell bonding. Several inclusions of dolomite and magnesium carbonate with different decomposition temperatures were used. The foam in the case with many inclusions maintained a density of 0.66 to 973 K, when the foam produced with dolomite shrank. Repeated addition of carbonates has been tested to be effective in preventing shrinkage.

Keywords — aluminum foam, carbonates, shrinkage, materials science, cell structure, dolomite, magnesium carbonate, gas formation, thermal decomposition, titanium hydride, expansion, density, microstructure, foaming mechanism, aluminum alloy, structural materials, lightweight materials, mechanical properties.

РЕНТГЕН РЕНТГЕНОСКОПИЯСЫ АРҚЫЛЫ ЗЕРТТЕЛГЕН МЕТАЛДЫҢ КӨБІКТЕНУІ

Абжанова Л.К.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы Энергетикалық және Байланыс Университеті, Алматы, Қазақстан

**Автор-корреспондент e-mail: l.abzhanova@aes.kz*

Автор туралы ақпарат:

Абжанова Лауласын Касылгановна, Ғ.Дәукеев атындағы Алматы Энергетикалық және Байланыс Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: l.abzhanova@aes.kz

Аңдатпа — Металл көбік түзілуін және эволюциясын in-situ зерттеу үшін рентгендік рентгеноскопияны қолдану қарастырылады. Таңдалған нәтижелер металдың көбіктенуі үшін диагностикалық құрал ретінде рентгендік рентгеноскопияның күшін көрсетеді. Көбік нуклеациясының және эволюциясының, дренаждың дамуының, термиялық байланыс мәселелерінің, зеңді толтырудың, жасуша қабырғасының жарылуының және т.б. сапалы талдаулар берілген. Бұған қоса, біріктіру жылдамдығын, тығыздықты бөлуді және т.б. беретін көбік кеңеюінің суреттер сериясына негізделген сандық талдау арнайы бағдарламалық құрал арқылы орындалады. Бұл әдістер металдардың көбіктену әрекетін түсінуге және көбік беру әдістерін де, көбік сапасын да жақсартуға көмектеседі.

Түйін сөздер — металл көбік, рентген, рентгеноскопия, синхротрондық сәулелену.

ВСПЕНИВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО МЕТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕНТГЕНОСКОПИИ

Абжанова Л.К.

Алматинский университет энергетики и связи им.Г. Даукеева, Алматы, Казахстан

**Автор-корреспондент e-mail: l.abzhanova@aes.kz*

Информация об авторе:

Абжанова Лауласын Касылгановна, Алматинский университет энергетики и связи им.Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, e-mail: l.abzhanova@aes.kz

Аннотация — Для изучения образования и эволюции металлической пены рассматривается использование рентгеновской рентгеноскопии. Выбранные результаты показывают силу рентгеновской рентгеноскопии как диагностического инструмента для вспенивания металла. Представлены качественные анализы зарождения и эволюции пены, развития дренажа, проблем с термической связью, заполнения плесени, разрыва клеточной стенки и многого другого. Кроме того, количественный анализ, основанный на серии изображений расширения пены, обеспечивающих скорость слияния, распределение плотности и т. д., выполняется с помощью специального программного обеспечения. Эти методы помогают понять пенообразующее поведение металлов и улучшить как методы пенообразования, так и качество пены.

Ключевые слова — металлическая пена, рентген, рентгеноскопия, синхротронное излучение.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Зерттеу барысында металл көбігінің түзілуі мен эволюциясын нақты уақыт режимінде бақылау үшін рентгендік рентгеноскопия әдісінің мүмкіндіктері талданды. Синхротрондық рентгендік сәулеленуді қолдану арқылы көбік нуклеациясы, көпіршіктердің өсуі, бірігуі, дренаждың дамуы және жасуша қабырғаларының бұзылу процестері жоғары кеңістіктік және уақыттық ажыратымдылықпен бақыланды. Сандық кескіндерді өңдеу нәтижесінде көбіктің кеңею кинетикасы, тығыздықтың таралуы және көпіршіктердің бірігу жылдамдығы анықталды. Алынған нәтижелер рентгендік рентгеноскопияның металл көбіктерінің құрылымдық қалыптасу механизмдерін зерттеудегі тиімді диагностикалық әдіс екенін көрсетті.

КІРІСПЕ

Қатты металдан жасалған көбіктер әр түрлі қолдану үшін перспективалы материалдар болып табылады [1,2]. Олардың құрылымы барлық көбік сияқты күрделі болғандықтан, оларды зерттеу қиын. Металл көбік түзілуін, эволюциясын және тұрақтануын түсіну үшін біз оларды сұйық күйде қатайғанға дейін және қату кезінде зерттеуіміз керек, өйткені бұл кезеңдегі процестер қатты көбіктің соңғы құрылымы мен қасиеттеріне әсер етеді [3,4].

Фотондарға немесе нейтрондарға негізделген радиографиялық бейнелеу әдістері үлгілердің ішкі құрылымын байқауға мүмкіндік береді [5]. Қолайлы уақыт рұқсатымен нақты уақыт

режимінде жазылған рентгенографиялар сериясы рентгеноскопия деп аталады. Көбіктерде рентгеноскопия кеңею, макроскопиялық кеуектер құрылымының эволюциясы, тығыздықтың таралуы, бірігу оқиғалары және т.б. сияқты in-situ әртүрлі процестерді зерттеуге мүмкіндік береді. Біз рентгендік рентгеноскопияға назар аударамыз, өйткені бұл әдіс ең жақсы кеңістіктік және уақытша рұқсаттарды және металдық матрица мен газ-контраст арасындағы оңтайлы контрастты ұсынады. Біз 2000 жылы алғашқы хабарланған әрекеттерден бастап соңғы әзірлемелерге дейін металдың көбіктенуін бақылау үшін рентгендік бейнелеудің эволюциясын ұсынады [6].

Зерттеудің маңыздылығы. Металл көбіктері төмен тығыздығы, жоғары меншікті беріктігі және энергияны тиімді жұту қабілетінің арқасында авиацияда, автомобиль жасауда, құрылыс пен энергетикада кеңінен қолданылатын перспективалы материалдардың бірі болып табылады. Алайда олардың құрылымы көбіктену процесінде қалыптасатындықтан, көбік түзілу механизмдерін дәстүрлі әдістермен толық зерттеу мүмкін емес. Осыған байланысты рентгендік рентгеноскопияны пайдалану металл көбігінің түзілуін нақты уақыт режимінде бақылауға, көпіршіктердің пайда болуы мен эволюциясын, жасушалардың бірігуін және дренаж процестерін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл көбік түзілу технологияларын жетілдіруге, материал құрылымының біркелкілігін арттыруға және дайын өнімнің механикалық қасиеттерін жақсартуға ғылыми негіз қалайды.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы металл көбігінің қалыптасу және эволюция процестерін жоғары жылдамдықты синхротрондық рентгендік рентгеноскопия көмегімен кешенді талдауда жатыр. Көбіктену процесінің әртүрлі кезеңдерінде көпіршіктердің нуклеациясы, өсуі, бірігуі және жасуша қабырғаларының бұзылуы жоғары дәлдікпен бақыланып, олардың уақыт бойынша өзгеру заңдылықтары анықталды. Сонымен қатар рентгендік бейнелерді сандық өңдеу арқылы көбіктің кеңею жылдамдығы, тығыздықтың таралуы және құрылымдық өзгерістер бағаланып, рентгендік рентгеноскопияның металл көбіктерінің қалыптасу механизмдерін зерттеудегі диагностикалық мүмкіндіктері ғылыми тұрғыдан негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Металл көбігінің түзілуі мен эволюциясын in-situ бақылау үшін рентгендік рентгеноскопия әдісі қолданылды. Зерттеу бірнеше кезеңнен тұрды.

Бірінші кезеңде тәжірибеге арналған металл преформалары дайындалды. Алдын ала белгілі құрамдас бөліктері бар ұнтақ немесе суспензия негізіндегі преформалар белгілі бір температуралық режимде көбіктенуге қабілетті болуы тиіс. Үлгілердің геометриясы, массасы және бастапқы тығыздығы кейінгі сандық талдау үшін тіркелді.

Екінші кезеңде рентгендік рентгеноскопияға арналған эксперименттік құрылым жинақталды. Үлгілер жоғары температуралы пешке немесе жергілікті қыздыру модуліне орналастырылып, синхротрондық рентгендік сәулемен қатарластыра бағытталды. Радиографиялық түсірілім үшін CMOS немесе sCMOS типті жылдам детекторлар, сондай-ақ LuAG:Ce немесе YAG:Ce сцинтилляторлары қолданылды. Эксперимент рентген сәулесінің энергиясын, кадр жиілігін және көру өрісін оңтайландыру арқылы жүргізілді. Экспозиция уақыты процестің динамикасына байланысты 1 мкс–10 мс аралығында таңдалды.

Үшінші кезеңде нақты уақыт режимінде түсірілген рентгенографиялық бейнелер сериясы жинақталды. Бейнелерден көбік нуклеациясы, көпіршіктердің өсуі, бірігуі, дренаждың басталуы мен дамуы, жасуша қабырғаларының локалды бұзылуы сияқты құбылыстар тіркелді. Сонымен бірге көлемдік өзгерістер мен көбіктің кеңею кинетикасын көрсететін макропараметрлер бақыланды.

Төртінші кезеңде алынған деректер сандық өңдеуден өтті. Арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы көпіршіктердің саны,

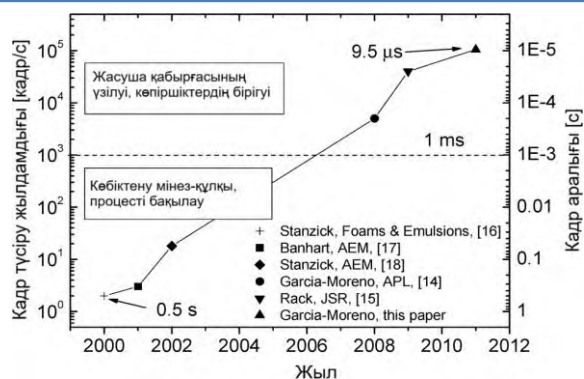
олардың орташа диаметрі, көлемдік тығыздықтың таралуы, бірігу оқиғаларының жиілігі және кеңею жылдамдығы сияқты көрсеткіштер анықталды. Уақыт қатарлары негізінде процестердің кинетикалық сипаттамалары есептеліп, металл көбігінің қалыптасу механизмдері талданды.

Осы кешенді әдістеме рентгендік рентгеноскопияны металл көбіктерінің физика-химиялық эволюциясын түсіну үшін жоғары дәлдікті құрал ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

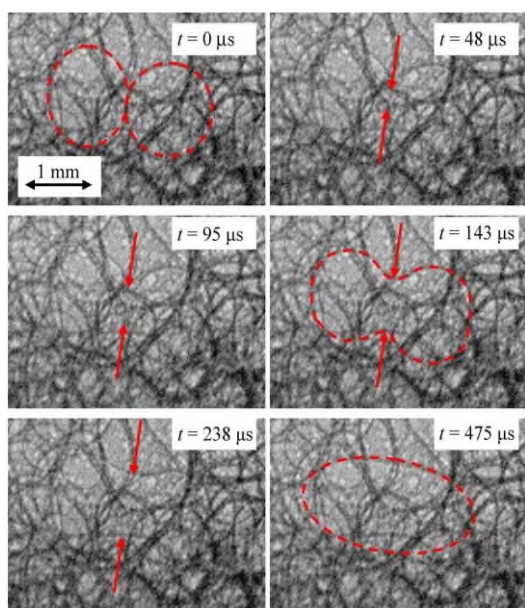
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Үшінші буындағы синхротронды жарық көздері кеңістікте де, уақытта да микро-ашықтығы бар радиографияны орындау үшін жеткілікті жоғары полихроматикалық рентген-дік фотон ағынының тығыздығын береді [7]. Бейнелеу аппаратурасының, әсіресе CMOS сенсорлары саласында қарқынды дамуы және олардың үздіксіз жетілдірілген сезімталдығы қазір айтарлықтай (кемінде 10×20 мм²) көру өрісі үшін экспозиция уақыты 1 мкс-қа дейін төмен түсіру жылдамдығымен ерекше жоғары жазуға мүмкіндік береді. Рентген сәулелерінің кірістірілген фазалық контрастын оңтайландырылған пайдалану (рентгендік синхротрондық сәуленің когеренттілік қасиеттеріне байланысты) біздің ұялы материалымыз үшін ең жақсы контрастты алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, LuAG:Ce немесе YAG:Ce кристалдары сияқты радиациялық қатты, бірақ жоғары сезімтал және тиімді монокристалды сцинтилляторлар қолданылады. 1-ші суретте әдебиетте [8,9] және соңғы нәтижелерде хабарланғандай, өткен жылдарда қол жеткізілген рентгендік синхротронды радиоскопияның уақыт ажыратымдылығының жақсаруы көрсетілген.

Сұйық көбіктердегі металл қабықшаларды немесе жасуша қабырғаларын тұрақтандыру металл көбік ғылымындағы негізгі мәселе болып табылады, бірақ әлі де толық түсінілмеген. Неғұрлым тұрақты пленкалар аз біріктіруді білдіреді, сондықтан біркелкі өлшемді үлестірумен кішірек көпіршіктер, бұл өте қажет. Жарылу сипатын зерттеу үшін бір уақытта жоғары кеңістіктік және жоғары уақыттық ажыратымдылыққа сұраныс болған эксперименттер жүргізілді. Әрбір кадр үшін 40 000 кадр/с және экспозиция уақыты 25 мкс болатын екі көршілес көпіршіктердің бірігуін байқауға болады [10].



Сурет 1 – Металдың көбіктенуін визуализациялау үшін қолданылатын in-situ синхротронды рентгендік рентгеноскопияның уақыт ажыратымдылығының эволюциясы.



Сурет 2 – In-situ жылдам синхротронды рентгендік радиоскопиялық талдаудан алынған AlSi10 + 0,5 масса% TiH₂ көбікінің 640 °C кезіндегі рентгенограммалар сериясы (Еуропалық синхротрондық сәулелену қондырғысының (ESRF) ID19 сәуле сызығында алынған деректер). 9,5 мкс кадр аралығымен (105 кф/с) өлшенген екі көпіршіктің бірігуін байқауға болады. Үзік сызықтар көпіршіктердің контурын көрсетеді, ал көрсеткілер сәйкес жасуша қабырғасының жарылғанын көрсетеді.

Соңғы эксперименттер 9,5 мкс кадр аралығымен және 20 мкм тиімді пиксел өлшемімен 105 000 кадр/сек жазу жылдамдығымен жүргізілді. Қысқа экспозиция уақыты мен кескіндердің шектеулі динамикасына байланысты мұндай кескіндердің контрасты төмен болғанымен, 2-ші суретте екі көпіршіктің бірігуі ~475 мкс-те аяқталатыны және қабықтың жарылуы ~380 мкс-қа созылатыны анық көрінеді, егер үзілудің соңы оның түзу нүктесіне айналатын жердегі көпіршікті одан бұрынғы нүкте ретінде қарастырсақ, дөнес.

Бұл эксперименттерде қабықтың жарылу уақытында оның тұтқырлығы емес, сұйықтықтың инерциясы басым болатынын көрсетуге болады, өйткені жарылу өте жылдам болды [10]. Сондықтан, $\eta = 0,4$ Па·с жоғары болатын тиімді тұтқырлық арқылы тұрақтандыру осы жерде зерттелген түрдегі металл көбіктеріне қолданылмайтынын көрсетуге болады. Көпіршік мөлшері мен қорытпаның құрамы сияқты басқа факторлар жарылу уақытына әсер етуі мүмкін және болашақта зерттелетін болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Рентген рентгеноскопиясы дамып келе жатқан металл көбіктерін жердегі зерттеудің қуатты құралы болып табылады. Синхротрондық және зертханалық қондырғылар көбік түзілуін жергілікті бақылауға мүмкіндік береді. 20 мкм-ге дейінгі тиімді пиксель өлшемімен жоғары кеңістіктік ажыратымдылық және қазіргі уақытта 10 мкс дейінгі ең жақсы қол жеткізуге болатын уақыт ажыратымдылығы жасуша қабырғасының жыртылуы мен көпіршікті бірігуін анықтауға және талдауға мүмкіндік береді. Алюминий көбікті сэндвич панельдеріндегі қатаюдың кеңеюі және көпіршіктердің туралануы сияқты жаңа әсерлер табылды. Микрогравитациялық тәжірибелер микрогравитация жағдайында балқыманың көбікке сінуін бақылау және сандық анықтау үшін рентгендік рентгеноскопияны қолданды және гравитацияның біріктіруге күтпеген әлсіз әсерін анықтады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС

Автор ескертулері мен ұсыныстары осы жұмысты жетілдіруге ықпал еткен барлық мамандарға алғысын білдіреді.

Авторлық құқық © 2025 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Lu, W.; Zhang, N.; Ding, Z.; Hu, Q.; Li, J. “Recent Progress on Apparatus Development and In Situ Observation of Metal Solidification Processes via Synchrotron Radiation X-ray Imaging: A Review.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65959-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65959-4)
- [2] Garcia-Moreno, F. “X-ray Tomography and Tomoscopy on Metals: A Review.” *Advanced Engineering Materials*. 2023, 25, 2201355. <https://doi.org/10.1002/adem.202201355>
- [3] Nguyen-Thi, H.; Reinhart, G.; “Garcia-Moreno, F.; et al. In-situ X-ray Monitoring of Solidification and Related Processes of Metal Alloys.” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2023.
- [4] Rack, A.; Di Michiel, M.; Garcia-Moreno, F.; et al. “Recent Developments in MHz Radioscopy: Towards the Ultimate Temporal Resolution Using Storage Ring-Based Light Sources.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2024, 1058, 168812. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168812>
- [5] Zhang, N.; Lu, W.; Ding, Z.; Li, J. “Synchrotron Radiation X-ray Imaging for In-situ Observation of Metallic Materials: Recent Advances and Future Perspectives.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479.
- [6] Zhang, X.; Li, Y.; Wang, H.; et al. “Investigation of the Interfacial Fusion of Welded Aluminum Foam Sandwich Panels by Synchrotron Radioscopy.” *Materials Research Letters*. 2023.
- [7] Garcia-Moreno, F.; Mukherjee, M.; Jiménez, C.; et al. “X-ray Tomoscopy for Time-Resolved Investigation of Metallic Foams.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [8] Rack, A. “MHz Radioscopy Using Hard Synchrotron Radiation: Instrumentation and Applications.” *Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory*. 2024.
- [9] Garcia-Moreno, F. “Advances in Time-Resolved Synchrotron Imaging of Metallic Materials.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [10] Hou, B.; Chen, Q.; Yi, L.; et al. “Materials Innovation and Electrical Engineering in X-ray Detection.” *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024, 1, 639–655.

REFERENCES

- [1] Lu, W.; Zhang, N.; Ding, Z.; Hu, Q.; Li, J. “Recent Progress on Apparatus Development and In Situ Observation of Metal Solidification Processes via Synchrotron Radiation X-ray Imaging: A Review.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65959-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65959-4)
- [2] Garcia-Moreno, F. “X-ray Tomography and Tomoscopy on Metals: A Review.” *Advanced Engineering Materials*. 2023, 25, 2201355. <https://doi.org/10.1002/adem.202201355>
- [3] Nguyen-Thi, H.; Reinhart, G.; “Garcia-Moreno, F.; et al. In-situ X-ray Monitoring of Solidification and Related Processes of Metal Alloys.” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2023.
- [4] Rack, A.; Di Michiel, M.; Garcia-Moreno, F.; et al. “Recent Developments in MHz Radioscopy: Towards the Ultimate Temporal Resolution Using Storage Ring-Based Light Sources.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2024, 1058, 168812. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168812>
- [5] Zhang, N.; Lu, W.; Ding, Z.; Li, J. “Synchrotron Radiation X-ray Imaging for In-situ Observation of Metallic Materials: Recent Advances and Future Perspectives.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022, 32(8), 2451–2479.
- [6] Zhang, X.; Li, Y.; Wang, H.; et al. “Investigation of the Interfacial Fusion of Welded Aluminum Foam Sandwich Panels by Synchrotron Radioscopy.” *Materials Research Letters*. 2023.
- [7] Garcia-Moreno, F.; Mukherjee, M.; Jiménez, C.; et al. “X-ray Tomoscopy for Time-Resolved Investigation of Metallic Foams.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [8] Rack, A. “MHz Radioscopy Using Hard Synchrotron Radiation: Instrumentation and Applications.” *Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory*. 2024.
- [9] Garcia-Moreno, F. “Advances in Time-Resolved Synchrotron Imaging of Metallic Materials.” *Advanced Engineering Materials*. 2023.
- [10] Hou, B.; Chen, Q.; Yi, L.; et al. “Materials Innovation and Electrical Engineering in X-ray Detection.” *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024, 1, 639–655.