

Ж.З. Сарсенова¹, Ю. Онуралп²

¹*Қарағандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан*
(E-mail: zhsarsenova@ttu.edu.kz)

²*Istanbul Technical University, г. Стамбул, Турция*
(E-mail: yucel@itu.edu.tr)

Аддитивті өндіріс үшін металл ұнтақтарын жасау технологиялары

Аддитивті өндіріс немесе 3D басып шығару, мысалы, аэроғарыш өнеркәсібінде бөлшектерді болашақта өндіру мен жөндеуге қатысты назар аударды және күтуді арттырды. Компоненттерге арналған металл қорытпаларын тұндыру үшін әртүрлі әдістер қолданылған. Бұл тұрақтылық тұрғысынан үлкен артықшылықтар бере алады, атап айтқанда, жеңіл салмақ түсірудің жаңа мүмкіндіктері. Дегенмен, пайдалану кезеңінен тыс тұрақтылық артықшылықтары туралы шешілмейтін сұрақтар бар. Бұл мақалада INCONEL 718 көмегімен өндірілген мәліметтер үшін материал мен өндірістің өмірлік циклінің кезеңдері зерттелді. ARCAM A2X электронды сәулені балқыту жүйесінен алынған энергия өлшемдері ұсынылған және шикізаттың нақтыланған энергиясы мен жанама СО₂-шығарындыларымен, сондай-ақ дәстүрлі шегеруші өндіріспен салыстырылған. Металл ұнтағы өндірісі де, қоспаларды өндіру процесінің өзі де жалпы энергияны пайдалану мен шығарындыларға айтарлықтай үлес қосатыны анықталды. Эшбидің тұрақты дамуды бағалаудың 5 қадамдық әдісі қосымша өндірістің экономикалық және әлеуметтік салдарын қысқаша талқылау үшін қолданылады.

Түйін сөздер: Аддитив, өндіріс, EBM.

Кіріспе

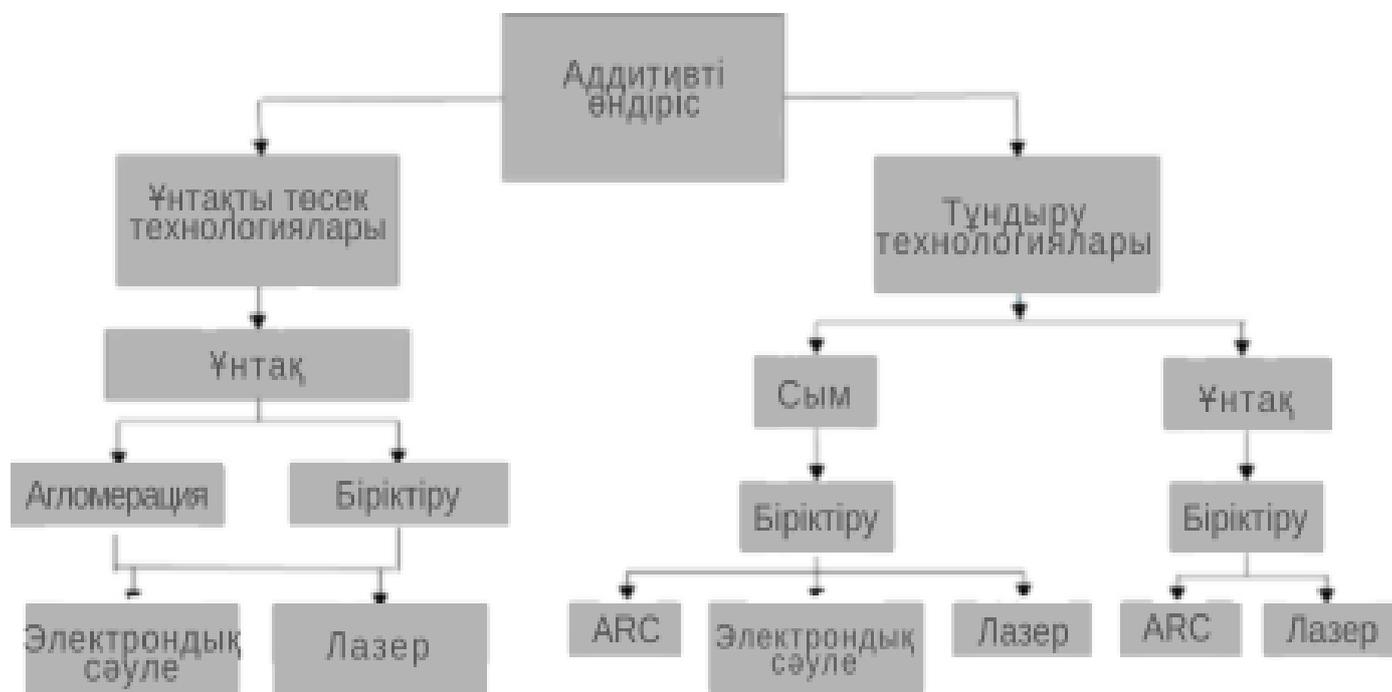
Аддитивті өндірісті (AM) енгізу тұрақты дамудың барлық үш өлшеміне әсер ететін өнеркәсіптік өндірістің көптеген салаларын бұзушы өзгерістерді қамтамасыз етеді деп күтілуде; экономикалық, әлеуметтік және экологиялық. AM қазірдің өзінде техникалық қызмет көрсету құнын төмендету және кейбір өнімдердегі бөлшектердің санын азайту үшін қолданылады [1]. Жаңа геометриялар мен жеңілдетілген құрамдас бөліктер 2025 жылға қарай өндірістегі шығындарды жүздеген миллиард АҚШ долларына төмендетеді [2]. Бұл көптеген өнімдерді жеткізу тізбегін өзгерте отырып, цифрланған, икемді және жергілікті бөлшектерді өндіруге мүмкіндік береді. Көлік және аэроғарыш секторларындағы жеңіл салмақ отын шығынын, демек, СО₂ шығарындыларын азайтса да, Париж келісімі сияқты парниктік газдарды азайту бойынша халықаралық мақсаттарды орындау үшін жалғыз бұл жеткіліксіз болады. Керісінше, бұл эмиссиялық мақсаттар енді сәтсіздікке ұшырауы мүмкін [3]. Демек, айтарлықтай қысқартулар қазбадан жаңартылатын отынға көшуді талап етеді. Егер бұлай болса, өнімнің өмірлік циклінің материалдары мен өндірістік фазаларынан энергияны пайдалану мен шығарындылардың маңызы артады. Сондай-ақ, өндірушілер бәсекеге қабілеттілік ретінде өндірісте жасыл тіркелгі деректерін пайдаланатын жағдайды елестетуге болады. Демек, AM тұрақтылыққа қалай әсер ететінін зерттеу маңызды.

Брундтланд анықтаған тұрақты даму үш негізгі өлшем бойынша түсіндірілді: экономика, қоғам және қоршаған орта. Бұл үш Р терминологиясын шабыттандырды: People, Planet және Profit (немесе өркендеу) және үштік қорытынды есеп [4]. Технологиялар мен процестердің тұрақты дамуын бағалаудың прагматикалық әдісін, ең алдымен, білім беру контекстінде Эшби мен әріптестері ұсынған [5]. Бұл әдістемеді тұрақтылықтың үш өлшемі бөлек және активтерге ұқсас қарастырылады. Пайданы білдіретін қаржылық капитал, планетаны бейнелейтін табиғи капитал және адамдарды бейнелейтін адам капиталы. AM осы үш астанаға қалай әсер ететінін бағалау үшін қолайлы әзірleme болып көрінеді.

Бұл мақалада аэроғарыштық және көліктік қолданбаларға қатысты аддитивті өндіріс процестеріне қысқаша салыстырмалы шолу берілген. Тек металл ұнтақтарымен өндіру қарастырылады. Мысал ретінде Электрондық сәулені балқыту жүйесінен энергия өлшемдері берілген және тұрақтылыққа салдары талқыланады.

Методология

ASTM 7 түрлі АМ процесінің санаттарын анықтады: ұнтақ қабатын біріктіру, тікелей энергияны тұндыру, материалды экструзия, фотополимерлеу, байланыстырғыш ағыны, материалды ағындылау және паракты ламинациялау [6]. Олардың ішінде экструзия, фотополимеризация және материалды ағындылау металдарға қолданылмайды. Металл бөлшектеріне арналған ең танымал үш арнайы әдіс - селективті лазерлік балқыту (SLM), электронды сәулемен балқыту (EBM) және тікелей энергияны тұндыру (DED). Осы үшеуі, сондай-ақ Байланыстырғыш Jetting барлығы шикізат ретінде металл ұнтақтарымен жұмыс істей алады. Ұнтақ қабаты технологиялары және тұндыру технологияларына бөлу төмендегі 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. Кейбір негізгі қоспаларды өндіру технологияларының схемалық шолуы.

Зерттеу нәтижелері

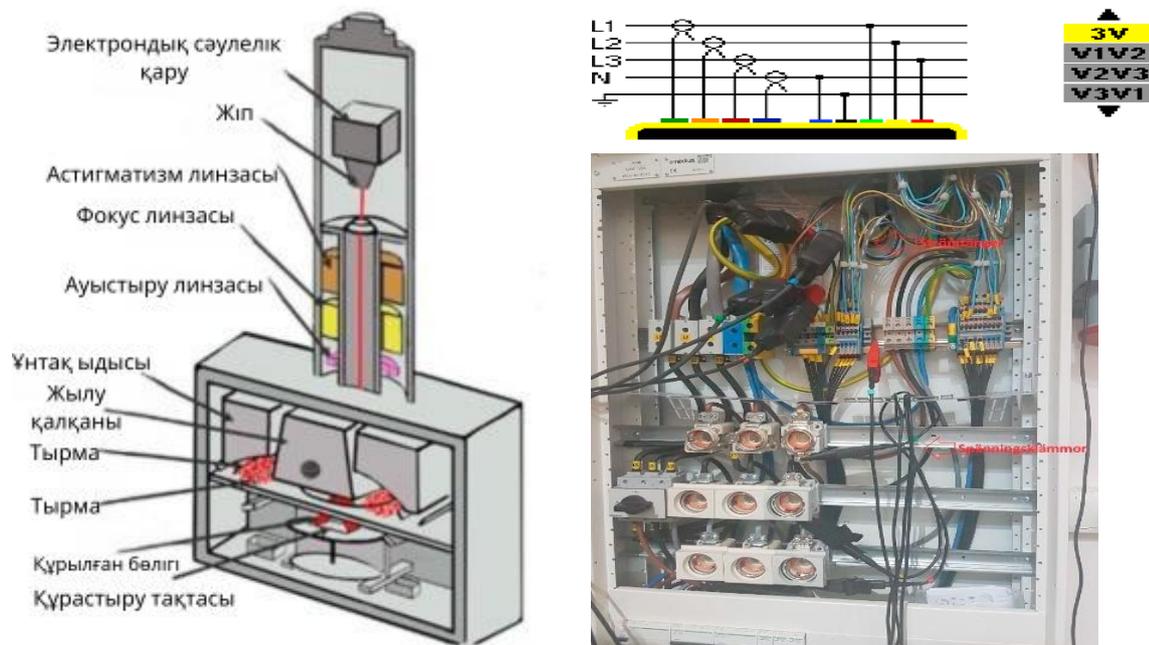
Қайта өңделген шикізат пен ұнтақтың маңыздылығы келесі бөлімде қысқаша талқыланады. Тың материалдан ұнтақ АМ процесі арқылы өндірілген бөлшекті өндіруге дейінгі энергияны пайдалану тізімі мыналарды қамтиды:

- 1) Тау-кен өндіруден шикізатқа дейінгі материалдық өндіріс, соның ішінде көлік және т.б.
- 2) Ұнтақты өндіру, мысалы, балқытуды қоса, шикізатты атомизациялау арқылы
- 3) АМ жүйесіндегі металл ұнтағын балқыту/балқыту үшін берілетін энергия

Бірінші нүкте оның рудаларынан немесе шикізаттарынан дайындамаларды немесе құймаларды жасау үшін қажетті энергияны білдіреді. Ол CES Selector [7] деректері арқылы қарастырылды, ол INCONEL 718 суперқорытпасының көлемді қорының және CO₂ ізінің өрнектелген қуатын бағалауды қамтамасыз етеді. Бұл деректер базасы аэроғарыш өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын белгіленген деректерден тұрады [8]. Ол Life Cycle Assessment дерекқорлары (ILCD, Ecoinvent), өнеркәсіптік қауымдастықтардың (Дүниежүзілік болат қауымдастығы, Еуропалық алюминий қауымдастығы, т.б.) жалпыға қолжетімді экологиялық есептердің анықтамалық құжаттары, сондай-ақ ғылыми жарияланымдар сияқты жаңартылған және сенімді дереккөздерге кеңес беру арқылы әзірленді.

Екінші тармақ бойынша INCONEL 718 бойынша сандық деректер әдебиетте табылмады, сондықтан ұқсас суперқорытпадан (NISTELLE 625) жарияланған мәндер пайдаланылды [9]. Соңында, үшінші нүкте келесі бөлімде сипатталған құрылымды салу кезінде бір тәжірибелік өлшеу арқылы бағаланды.

Эксперименттік деректер ARCAM A2X Electron Beam Balting жүйесін пайдалана отырып, 5 күндік үздіксіз құрастыру барысында жиналды. Бұл 2а-суретте көрсетілген. 2б-суретте энергияны өлшеу зондтарының қосылуы көрсетілген.

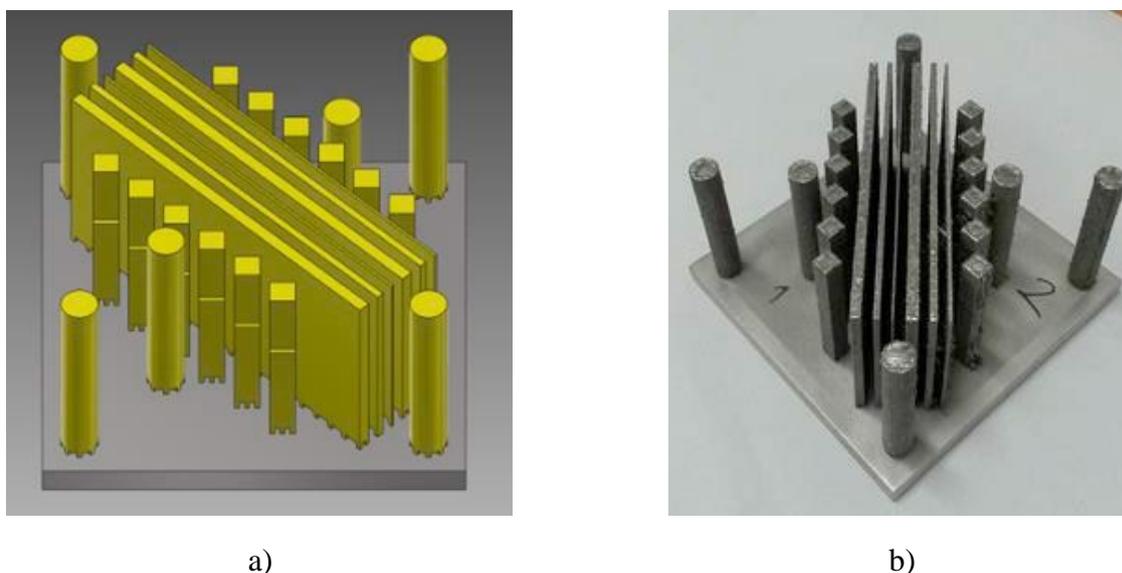


Сурет 2. (а) – ДМ негізіндегі АМ технологиясының схемалық суреті; (б) – кіріс энергия өлшемдеріне арналған зондтар.

Қоспаларды өндіру процесінде энергияны пайдалану СА көмегімен өлшенді. 8335 Энергия анализаторы. Бұл құрал үш фазаның кернеуі мен тогын, сондай-ақ белсенді және реактивті қуатты бақылайды. Деректер компьютерде сақталады және Power Analyzer Transfer 1 және 2 бағдарламалық құралымен (PAT1 және PAT2) талданады. Белгісіздік 1% шегінде. Дегенмен, токқа арналған жанаспайтын зондтар (MN88) максимум 5% белгісіздікке ие деп айтылады. Негізгі энергия тұтынушылары: жоғары вольтты құрылғы, вакуумдық сорғылар, жылу алмастырғыш және салқындату жабдықтары, тырмалау және сатыға арналған қозғалтқыштар, PLC және дисплей блогын қоса алғанда, ЭБМ тапаншасы. ЕБ/Жоғары вольтты құрылғы басым болатын жалпы энергия шығыны ғана өлшенді.

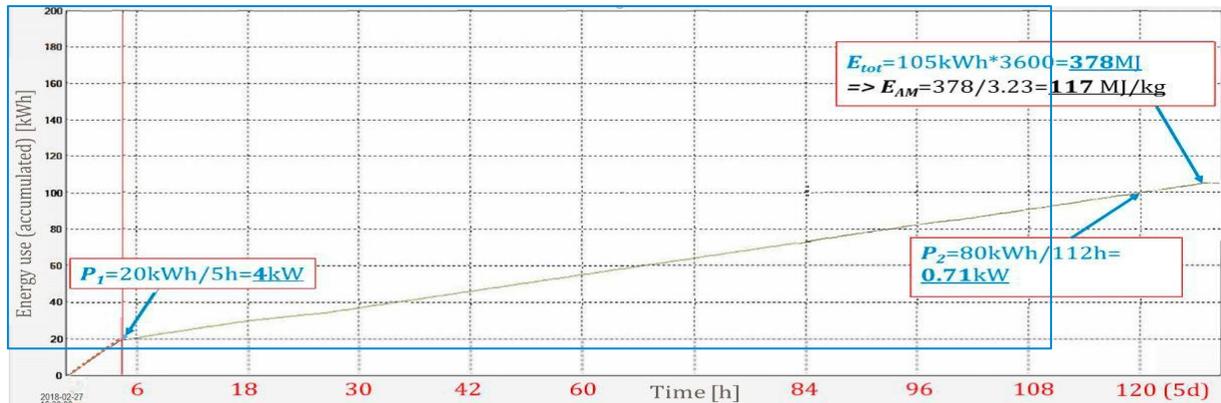
CES Selector дерекқорында бағаланған INCONEL 718 көлемді энергиясының жинақталған энергиясы 291-321 МДж/кг құрайды [7]. АМ процесіне арналған INCONEL 718 ұнтағын алу үшін атомизацияға арналған энергия жоғарыда айтылғандай әдебиетте табылған жоқ. Жақындау ретінде NISTELLE 625 мәнін қарастыруға болады, ол Fe азырақ, бірақ Cr мөлшері ұқсас Ni негізіндегі қорытпа болып табылады. Ол атомизация сатысы үшін 55,6 МДж/кг береді [9].

Өндірілген бөлшектердің геометриясы және толық 5 күндік құрастыру кезіндегі энергия өлшемдерінің нәтижелері сәйкесінше 3 және 4-суретте көрсетілген. Бөлшектің көлемі 392,5 см³, массасы 3,23 кг.



Сурет 3. (а) бөлшектің АЖЖ моделі; (б) ЕВМ депозитке салған Inconel 718 түпкілікгі құрастыру.

Нәтижелер құрылысқа барлығы 378 МДж энергия жұмсалғанын көрсетеді, бұл бөлшекте 117 МДж/кг меншікті энергияға сәйкес келеді. Шамамен 5 сағатқа созылатын бастапқы кезең шамамен 4 кВт орташа қуатты пайдалануды көрсетеді. Одан кейін 112 сағаттық кезең басталады, ол азырақ қуатты қажет ететін балқыту сәулесін көрсетеді. Бұл кезеңнің орташа қуаты диаграммадан 0,71 кВт-қа бағаланады.



Сурет 4. ЭБМ негізіндегі қоспаларды өндіру жүйесі шығаратын белсенді қуат нәтижесінде жинақталған энергияны пайдалану.

Қоршаған орта үшін ең маңызды және, мүмкін, ең өзекті мәселелердің бірі - жаһандық жылыну және атмосферадағы парниктік газдардың шоғырлануы. Мазасыздықтың негізгі көзі өнеркәсіптік материалдар өндірісі, өндіріс және көлік жүйелері елеулі үлес қосатын энергияны пайдаланумен байланысты қазба CO₂ шығарындылары болып табылады. Осы АМ мысалындағы негізгі энергия үлесі шикізаттың іске қосылған энергиясы болып табылады. Бұл дерекқорда [7] есептелген шығарындыларға сәйкес келеді, бастапқы INCONEL 718 бір кг үшін 16,6-18,3 кг CO₂, АМ процестері бұл ізді екі есе дерлік арттырады деп күтілуде. Қайта өңделген көлемді INCONEL 718 таза материалмен салыстырғанда CO₂ шығарындыларын шамамен 80%-ға азайтады [7], бұл дәстүрлі және қосымша өндіріс арқылы жасалған екі өнімге де пайдалы болады. Сол дерекқорға сәйкес, ағымдағы өнеркәсіптік жеткізілімде қайта өңделген фракция шамамен 30% құрайды [7].

АМ өнімдеріндегі меншікті энергияның төмендеуі шығындардың да, шығарындылардың да төмендеуіне әкелуі мүмкін болса да, CO₂ шығарындыларын энергия қоспасының қазба құрамдас бөлігін реттеу, яғни энергия жеткізушіні өзгерту немесе өндіріс орнын ауыстыру арқылы да азайтуға болады. Металл ұнтағын АМ процесінде қайта өңдеуге болатын болса ғана, қосымша өндірістің толық таза пішінді пайдасын жүзеге асыруға болады. Атомизация арқылы материалды қысқарту немесе қайта өндіру бұл артықшылықты азайтады. Сондықтан АМ процесінде пайдаланылмаған ұнтақты қайта өңдеу оның тұрақты жұмысының кілті болып табылады. SLM сияқты балама АМ технологиялары орташа алғанда салыстырмалы немесе одан да көп энергия тұтынатын ЕВМ [6].

Қорытынды

Бұл мысал металл ұнтағын қоспалар өндірісінің кейбір маңызды ерекшеліктерін суреттеп берді және оның тұрақтылығын бағалады. Суперқорытпалардың АМ үшін жоғары жалпы энергия тұтынуы табылды, бірақ оны азайтудың әмбебап тәсілі жоқ:

1) Шығындар мен шығарындыларды азайтуға мүмкіндік беретін өнімдердің салмағын азайту мүмкіндіктері бар. Huang және т.б. құрастырған жеңіл металдан жасалған ұшақ компоненттерін зерттеу. рефте [6] кәдімгімен салыстырғанда аддитивті өндірістің салмақтық артықшылықтары нақты геометрияларға байланысты айтарлықтай өзгеретінін көрсетті.

2) Ұнтақтарды өндіру үшін айтарлықтай энергия қажет, сондықтан оларды қалпына келтіру маңызды. Қалдықтарды азайтуға болады

субтрактивті өндіріспен салыстырғанда, бірақ бұл әрбір нақты жағдайға өте тәуелді. АМ өнімді қайта өндіру және техникалық қызмет көрсетудің жаңа мүмкіндіктері арқылы ресурстарды пайдалануды азайтуға ықпал ете алады.

3) Қосымша өндіріс кезінде уақыт пен энергия шығынына байланысты жаппай өндіріс әлі өміршең емес, өйткені

мысалмен көрсетілген. Қысқа мерзімде мамандандырылған геометриялар мен шағын көлемді өндіріс неғұрлым мүмкін болады.

1. S. Ford, M., Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production*, 137 (2016) 1573-1587.
2. M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, C. Visser, A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy*, 74 (C) (2014) 158-167.
3. A. E. Raftery, A. Zimmer, D. M. W. Frierson, R. Startz, P. Liu, Less than 2° warming by 2100 unlikely, *Nature Climate Change* 7 (2017) 637.
4. J. Elkington, "Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development," *California management review*, vol. 36, pp. 90-100, 1994.
5. M. F. Ashby, *Materials and Sustainable Development*, Butterworth-Heinemann, (Oxford, 2015).
6. K. Kellens, M. Baumann, T. G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J. R. Duflou, *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing*, *International Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) S49-S68.
7. CES Selector 2018 software including the *MaterialUniverse* database by Granta Design Ltd., Cambridge (UK)
8. S. M. Arnold, D. Cebon, and M. Ashby, "Materials Selection for Aerospace Systems," (2012) NASA/TM—2012-217411, https://permanent.access.gpo.gov/gpo25016/20120001798_2012001776.pdf
9. J. L. Wilson, C. Piya, Y. C. Shin, F. Zhao, K. Ramani, Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production*, 80 (2014) 170-178.
10. A. E. Bonilla Hernández, T. Beno, C. Fredriksson, Energy and cost estimation of a feature-based machining operation on HRSA

Ж.З. Сарсенова, Ю. Онуралп

Технологии изготовления металлических порошков для аддитивного производства

Аддитивное производство или 3D-печать привлекли внимание и повысили ожидания в отношении будущего производства и ремонта деталей, например, в аэрокосмической промышленности. Для осаждения металлических сплавов для компонентов использовались различные методы. Это может дать большие преимущества с точки зрения устойчивости, в частности, новые возможности для легкого веса. Однако есть нерешенные вопросы о преимуществах стабильности вне периода использования. В этой статье были изучены материалы и этапы жизненного цикла производства для данных, полученных с помощью INCONEL 718. Представлены измерения энергии, полученные от системы электронного луча плавления ARCAM A2X, и сравниваются с уточненной энергией сырья и косвенными выбросами CO₂, а также с традиционным производством дедукции. Было обнаружено, что как производство металлического порошка, так и сам процесс производства добавок вносят значительный вклад в общее потребление энергии и выбросы. 5-ступенчатый метод оценки устойчивого развития Эшби используется для краткого обсуждения экономических и социальных последствий дополнительного производства.

Ключевые слова: аддитивный, производственный, ЕВМ.

Zh.Z. Sarsenova, Yu. Onuralp

Technologies for the manufacture of metal powders for additive manufacturing

Additive manufacturing or 3D printing, for example, has attracted attention and increased expectations in the aerospace industry regarding the future production and repair of parts. Various methods have been used to precipitate metal alloys for components. This can provide great advantages in terms of stability, in particular, new opportunities for light weight shooting. However, there are unsolvable questions about the benefits of sustainability beyond the use period. This article examined the stages of the material and production life cycle for the data produced using INCONEL 718. The energy measurements from the Arcam A2X electron beam fusion system are presented and compared with the refined energy and indirect CO₂-emissions of the raw material, as well as with traditional deductive production. It has been found that both metal powder production and the additive manufacturing process itself contribute significantly to overall energy use and emissions. Ashby's 5-step method for assessing sustainable development is used to briefly discuss the economic and social implications of additional production.

Keywords: additive, production, EBM.

References

1. S. Ford, M., Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production*, 137 (2016) 1573-1587.
2. M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, C. Visser, A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy*, 74 (C) (2014) 158-167.
3. A. E. Raftery, A. Zimmer, D. M. W. Frierson, R. Startz, P. Liu, Less than 2° warming by 2100 unlikely, *Nature Climate Change* 7 (2017) 637.
4. J. Elkington, "Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development," *California management review*, vol. 36, pp. 90-100, 1994.
5. M. F. Ashby, *Materials and Sustainable Development*, Butterworth-Heinemann, (Oxford, 2015).
6. K. Kellens, M. Baumers, T. G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J. R. Duflou, Environmental Dimensions of Additive Manufacturing, *International Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) S49-S68.
7. CES Selector 2018 software including the *MaterialUniverse* database by Granta Design Ltd., Cambridge (UK)
8. S. M. Arnold, D. Cebon, and M. Ashby, "Materials Selection for Aerospace Systems," (2012) NASA/TM—2012-217411, https://permanent.access.gpo.gov/gpo25016/20120001798_2012001776.pdf
9. J. L. Wilson, C. Piya, Y. C. Shin, F. Zhao, K. Ramani, Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production*, 80 (2014) 170-178.
10. A. E. Bonilla Hernández, T. Beno, C. Fredriksson, Energy and cost estimation of a feature-based machining operation on HRSA