

КРИТЕРІЇ ДОБОРУ ТЕРМОЕЛЕКТРОДІВ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ШКЕЛ ДО ТЕРМОМЕТРІЇ

Пилип Скоропад, д.т.н., проф., Павло Гамула, к.т.н., доцент, Ігор Ліхновський, к.т.н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка», Україна;

e-mail: pylyp.i.skoropad@lpnu.ua

Ростислав Мاستило, Технічний університет м. Ільменау, Німеччина

Актуальність створення прецизійних термоелектричних перетворювачів, з метою вимірювання та подальшого аналізу параметрів падаючого на них електромагнетного потоку, продиктована широким спектром галузей їх застосування як от: світлометрія, актинометрія, спектрофотометрія, техніка виявлення нейтральних елементарних частинок, калориметрія, термометрія ...

З огляду на специфіку геометричних параметрів металевих шкел (довжина вимірюється метрами, а товщина - не більше 10 ... 100 мкм), термоперетворювачі на їх основі характеризуються, рівно ж як інтегральні мікросхеми, наявністю певної площини, паралельно якій розташовуються елементи конструкції та самі термоелектроди. Застосування поняття “площина перетворювача” викликано неспіврозмірністю товщини стрічки металевго термоелектрода з його довжиною. З огляду на це – в таких термоперетворювачах є підстави для визначення двох їх доцільних орієнтацій відносно електромагнетного потоку, що сприймається ними: перпендикулярну, що не співпадає та паралельну, що співпадає. Завдяки відведенню тепла вздовж віток електродів, на їх кінцях створюється різниця температур. Однак, площинність конструкції первинного перетворювача робить можливим також і два доцільних напрямки відведення тепла: -через та -вздовж площини термоперетворювача, а це, в свою чергу, враховуючи доцільні орієнтації відносно електромагнетного потоку, дає широку палітру конструкторських рішень для термоперетворювачів самих різних типів. При чому, можливим є традиційне інтегрування одноелементних термоперетворювачів, шляхом різноманітних топологічних конфігурацій їх віток, в лінійні чи кругові батареї, каскади і т.п.

Аналізуючи процес теплопереносу в усталеному стані, для випадку перпендикулярного розташування потоків та площини термоперетворювача, можемо прийти до виразів, що дають змогу оцінити його:

- чутливість

$$K=U/P=S \cdot R_T,$$

де K – чутливість термоперетворювача;

U – напруга на його виході;

P – потужність потоку, що приймається;

S – абсолютний чинник термо-е.р.с.;

R_T – тепловий опір;

- межу чутливості

$$P_0=(4kT\Delta f)^{1/2}R^{1/2}/S \cdot R_T$$

де P_0 – межа чутливості термоперетворювача;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура;

Δf – частотна смуга пропускання;

R – електроопір;

- та сталу часу

$$\tau = C \cdot R_T,$$

де τ - стала часу термоперетворювача;

C – об'ємний тепловміст.

Приведені залежності показують, що чим більша чутливість – тим вища інерційність, а термоперетворювачі з малою чутливістю характеризуються високою швидкодією. Додаткового підвищення чутливості можна досягнути шляхом вибору електродного матеріалу з високим значенням S або ж застосуванням більшої кількості елементів, а швидкодії – зменшенням тепловмісту. Оптимальній межі чутливості відповідає мінімальне значення відношення $R^{1/2}/R_T$. Оскільки, головним чином, термоелектричні перетворювачі не призначено для вимірювання в діапазоні шумових потужностей, то доцільно застосувати електродні матеріали з високим питомим електроопором та малою товщиною, якими відзначаються металеві аморфні стопи, з одночасним збільшенням теплового опору, що приводить до зростання чутливості та зменшенням тепловмісту, що знижує інерційність.

Для випадку термоперетворювачів з невідповідними за напрямком потоками, що приймається та відводиться і безліччю напрямків відведення теплових потоків в площині термоперетворювача, співвідношення теплопередач випромінюванням та теплопровідністю з одного боку та теплопередач по вітках термоелементів і по електроізоляційній арматурі з другого боку – відіграє суттєву роль. Позначимо радіуси кіл, на яких розташовані робочі злоти та злоти порівняння термоелементів, відповідно, r_0 та RI , а в попередніх залежностях чутливості (5.1), межі чутливості (5.2) та швидкодії (5.3) замість R_T врахуємо теплопередачу випромінюванням G_B та теплопровідністю G_T :

$$R_T = 1 / (G_B + G_T),$$

$$G_B = 8\varepsilon\sigma T_0^3 \pi R I^2$$

$$G_T = \chi X_1^2 \pi d_\Sigma,$$

де ε - чинник інтегральної випромінюючої здатності;

σ - стала Стефана-Больцмана;

T_0 – температура злотов порівняння;

χ - усереднена теплопровідність;

d_Σ - сумарна товщина (для кожного конкретного конструктивного виконання може різнитися);

X_1 – перший корінь функції Бесселя нульового порядку.

Для об'ємного тепловмісту запишемо:

$$C = c \pi R I^2 d_\Sigma,$$

де $c = \sum c_i d_i / d_\Sigma$; $\chi = \sum \chi_i d_i / d_\Sigma$.

Для випадку $G_B \gg G_T$, при заданому значенні r_0 та решті рівних умов, чутливість K є функцією радіуса RI лише до певного значення, після якого суттєвий вклад випромінювання зменшується, а температура майже не різниться від температури

оточуючого середовища. Інваріантність сталої часу τ від радіуса Rl при $G_B > G_T$ має місце лише при нехтуюче малій товщині електроізоляційної арматури. При $G_B < G_T$ стала часу визначається із залежності $\tau = (c/\chi)(Rl^2/X_1^2)$. Зростання товщини віток термоелементів спричиняє ріст теплопровідності, а отже, і швидкодія зростає. При малих же товщинах віток термоелементів – інерційність визначається теплопровідністю електроізоляційної арматури.

При виборі оптимальних матеріалів термоелектродів для термоелектричних перетворювачів на базі металевих аморфних стопів слід застосовувати критеріальний підхід, проте, запропонований А.Ф. Йоффе критерій термоелектричної добротності Z , в даному випадку, застосовувати не слід, оскільки він має сенс лише для масивних матеріалів і то без врахування теплообміну з оточуючим термоперетворювач середовищем.

Для термоелектродів на базі металевих аморфних стопів слід неодмінно брати під увагу вплив електроізоляційної арматури. Остання, при чому, практично не впливає на електричні, проте, має вплив на теплові параметри досліджуваних термоперетворювачів. Отже, враховуючи сказане вище, запишемо вираз для визначення термоелектричної добротності $Z_{\text{мш}}$ для термоперетворювачів з електродами із металевих шкел

$$Z_{\text{мш}} = S^2 / (\rho(\chi_{\text{мш}} + \chi_{\text{ЕА}} h_{\text{ЕА}} / h_{\text{мш}})),$$

де ρ - питомий електроопір термоелектрода з металевих шкел;

$\chi_{\text{ЕА}}$ – питома теплопровідність електроізоляційної арматури;

$h_{\text{ЕА}}/h_{\text{мш}}$ – відношення товщин, відповідно, електроізоляційної арматури та термоелектрода із металевих шкел.

Якщо ж $\chi_{\text{ЕА}} h_{\text{ЕА}} \gg \chi_{\text{мш}} h_{\text{мш}}$, тоді вибір металевих шкел для термоелектродів слід проводити з використанням, так званого, критерію термоелектричної потужності q , що його визначають із залежності:

$$q = S^2 / \rho.$$

Первинні термоелектричні вимірювальні перетворювачі працюють в комплексі з вторинними вимірювальними приладами, а тому на вибір термоелектродів мають суттєвий вплив як параметри самих перетворювачів, так і метод вимірювання, а також і параметри вторинного приладу. Оскільки вихідний сигнал вимірювальних термоелектричних перетворювачів, головним чином, вимірюють потенціометричним методом, то запишемо для цього випадку вирази для визначення їх чинників чутливості $K_{\text{ч}}$ та роздільної здатності $K_{\text{рз}}$:

$$K_{\text{ч}} = (\Delta I_{\text{min}} / K_{\text{IU}} K_{\text{ТХ}} \Delta X) (R_{\text{ВП}} + R_{\text{T}}) / R_{\text{ВП}},$$

$$K_{\text{рз}} = (2K_0 (kT_{\text{сер}} \Delta f)^{1/2} / K_{\text{ТХ}} \Delta X) ((R_{\text{ВП}} + R_{\text{T}}) R_{\text{T}} / R_{\text{ВП}})^{1/2},$$

де ΔI_{min} – дискретність індикатора вимірювального приладу;

K_{IU} – чинник перетворення різниці потенціалів на вхідному опорі в покази - I індикатора вимірювального приладу;

$K_{\text{ТХ}}$ – чинник перетворення вимірювальної величини - X в температуру;

$R_{\text{ВП}}$ – вхідний опір вимірювального приладу;

K_0 – відношення сигнал-шум.

У випадку застосування потенціометричного методу для вимірювання вихідного сигналу термоелектричного перетворювача можна скористатися критерієм принципової придатності матеріалу термоелектроду з металевих шкел, що визначається із залежності

$$S_e/r_e \geq B,$$

де S_e, r_e – відповідно, термо-е.р.с. та електроопір елемента;

B - кутовий чинник асимптоти залежності $K_{P3}(R)$.

В свою чергу, критерій його практичної придатності можна визначити, виходячи із умови $K_{UT}=nS_e \geq K_{P3}$ при $R \geq R_K$ чи $K_{UT} \geq K_{ч}$ при $R \leq R_K$, де K_{UT} – чинник перетворення температури в е.р.с.; n – кількість елементів в термоперетворювачі; R_K – критичне значення електроопору первинного перетворювача, що визначається із наступної залежності:

$$R_K = (\Delta I_{\min})^2 R_{BП} / (4K_0 K_{IU}^2 k T_{\text{сеп}} \Delta f R_{BП} - (\Delta I_{\min})^2).$$

Доцільність використання того чи іншого металевго аморфного стопу можна визначити, виходячи із максимальності значень відношень: K_{UT}/K_{P3} при $R \geq R_K$, або ж $K_{UT}/K_{ч}$ при $R \leq R_K$.

Якщо ж в термоелектричному вимірювальному перетворювачі зробити заміщення однієї робочої вітки на “нульову”, то при потенціометричному методі вимірювання вихідного сигналу для аморфного термоелектродного матеріалу отримаємо такі умови:

- принципової придатності

$$S/\rho \geq 2K_0 L (k T_{\text{сеп}} \Delta f)^{1/2} / K_{TX} X A (R_{BП})^{1/2};$$

- практичної придатності

$$S^2/\rho \geq 4K_0^2 L k T_{\text{сеп}} \Delta f / K_{TX}^2 (\Delta X)^2 A n, \text{ якщо } R \geq R_K$$

або ж

$$S - \Delta I_{\min} L \rho / K_{IU} K_{TX} \Delta X R_{BП} A \geq \Delta I_{\min} / K_{IU} K_{TX} \Delta X n, \text{ якщо } R \leq R_K$$

- доцільності

$$(R_{BП} A - n \rho)^{-1} (S^2/\rho) \rightarrow \max, \text{ якщо } R \geq R_K$$

або ж

$$(1 + L n \rho / R_{BП} A) S \rightarrow \max, \text{ якщо } R \leq R_K,$$

де ρ - питомий електроопір термоелектрода з металевго шкла;

L, A – відповідно, його довжина та площа поперечного перерізу.

Конкретизуючи умови роботи аналізованого нами гіпотетичного термоелектричного вимірювального перетворювача з врахуванням того, що його областю застосування є термометрія, зробимо, в приведених вище залежностях, відповідні підстановки ($\Delta X = \Delta T$ та $K_{TX} = 1$) і отримаємо критеріальні співвідношення для оцінки металевих шкел як матеріалів вимірювальних термоелектричних перетворювачів температури; якщо у випадку терморадіаційного вимірювального термоелектричного перетворювача ($\Delta X = \Delta \psi$, де ψ - інтенсивність випромінювання, що падає на робочі злоти) $\Delta T = L \Delta \psi / \chi$, то $K_{TX} = L / \chi$. Отже, враховуючи приведені вище викладки, для потенціометричного методу вимірювання вихідного сигналу термоелектричного перетворювача з металевих шкел, отримаємо вирази для оцінки:

- принципової придатності

$$S/\rho\chi \geq 2K_0(kT_{\text{сер}}\Delta f)^{1/2}/\Delta\psi A(R_{\text{ВП}})^{1/2}$$

- практичної придатності

$$(S/\chi) - \Delta I_{\text{min}}\rho/K_{\text{IU}}\Delta\psi AR_{\text{ВП}} \geq \Delta I_{\text{min}}/K_{\text{IU}}\Delta\psi Ln, \text{ якщо } R \leq R_{\text{К}}$$

або ж

$$S^2/\rho\chi^2 \geq 4K_0^2kT_{\text{сер}}\Delta f/(\Delta\psi)^2LAn, \text{ якщо } R \geq R_{\text{К}}$$

- доцільності

$$(R_{\text{ВП}}A + Ln\rho)(R_{\text{ВП}}A)^{-1}(S/\chi) \rightarrow \text{max}, \text{ якщо } R \leq R_{\text{К}}$$

або ж

$$(R_{\text{ВП}}A - Ln\rho)^{-1}S^2/\rho\chi^2 \rightarrow \text{max}, \text{ якщо } R \geq R_{\text{К}}.$$

В табл. 1 приведено, для порівняння, головні критеріальні характеристики термоелектричних властивостей досліджуваних металевих шкел та основних термоелектродних матеріалів, що традиційно застосовуються в термоелектричних перетворювачах.

Таблиця 1

Критеріальні характеристики термоелектричних властивостей досліджуваних металевих шкел та основних термоелектродних матеріалів, що традиційно застосовуються в термоелектричних перетворювачах

Склад стопу	T_r , К	T_b , К	R_{300K} , Ом·см	S_{300K} , В/К	χ , Вт/(см·К)	S/ρ , А/(см·К)	S^2/ρ , мкВт/(см·К ²)	$S/\rho\chi$, 1/В	$S^2/\rho\chi$, 1/К	$S^2/\rho\chi^2$, см/Вт	S/χ , мкВ см/Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fe90B10	467	575	1,39E-04	-1,84E-06	7,84E-02	-1,32E-02	2,44E-02	-1,69E-01	3,11E-07	3,96E-06	-2,35E+01
Fe87B13	475	592	1,39E-04	-1,94E-06	7,91E-02	-1,40E-02	2,71E-02	-1,76E-01	3,42E-07	4,33E-06	-2,45E+01
Fe86B14	473	605	1,39E-04	-2,04E-06	7,94E-02	-1,47E-02	2,99E-02	-1,85E-01	3,77E-07	4,75E-06	-2,57E+01
Fe85B15	485	615	1,39E-04	-2,40E-06	7,96E-02	-1,73E-02	4,14E-02	-2,17E-01	5,21E-07	6,54E-06	-3,02E+01
Fe84B16	487	615	1,39E-04	-2,64E-06	7,98E-02	-1,90E-02	5,01E-02	-2,38E-01	6,28E-07	7,87E-06	-3,31E+01
Fe83B17	491	625	1,39E-04	-3,05E-06	8,00E-02	-2,19E-02	6,69E-02	-2,74E-01	8,37E-07	1,05E-05	-3,81E+01
Fe82B18	493	631	1,39E-04	-3,37E-06	8,03E-02	-2,42E-02	8,17E-02	-3,02E-01	1,02E-06	1,27E-05	-4,20E+01
Fe80B20	499	650	1,39E-04	-3,65E-06	8,08E-02	-2,63E-02	9,58E-02	-3,25E-01	1,19E-06	1,47E-05	-4,52E+01
Fe78B22	502	653	1,39E-04	-3,74E-06	8,13E-02	-2,69E-02	1,01E-01	-3,31E-01	1,24E-06	1,52E-05	-4,60E+01
Fe75B25	497	657	1,39E-04	-3,92E-06	8,20E-02	-2,82E-02	1,11E-01	-3,44E-01	1,35E-06	1,64E-05	-4,78E+01
Fe80Co3B17	495	612	1,35E-04	-4,60E-06	7,97E-02	-3,41E-02	1,57E-01	-4,28E-01	1,97E-06	2,47E-05	-5,77E+01
Fe74Co10B16	520	600	1,25E-04	-6,59E-06	7,86E-02	-5,28E-02	3,48E-01	-6,71E-01	4,43E-06	5,63E-05	-8,39E+01
Fe80Cu3B17	488	601	1,20E-04	-4,00E-06	8,98E-02	-3,33E-02	1,33E-01	-3,71E-01	1,48E-06	1,65E-05	-4,45E+01
Fe80V3B17	508	607	1,28E-04	-1,95E-06	7,89E-02	-1,52E-02	2,97E-02	-1,93E-01	3,77E-07	4,77E-06	-2,47E+01
Fe80Cr3B17	532	632	1,39E-04	-1,92E-06	7,98E-02	-1,38E-02	2,65E-02	-1,73E-01	3,32E-07	4,16E-06	-2,41E+01
Fe80Ni3B17	575	650	1,28E-04	-4,50E-06	8,06E-02	-3,52E-02	1,58E-01	-4,36E-01	1,96E-06	2,44E-05	-5,58E+01
Fe80Mn3B17	520	625	1,30E-04	-2,20E-06	7,83E-02	-1,69E-02	3,72E-02	-2,16E-01	4,75E-07	6,07E-06	-2,81E+01
Fe80Ti3B17	538	650	1,40E-04	-2,00E-06	7,83E-02	-1,43E-02	2,86E-02	-1,82E-01	3,65E-07	4,66E-06	-2,55E+01
Fe40Ni40B20	475	670	1,30E-04	-6,73E-06	8,72E-02	-5,17E-02	3,48E-01	-5,93E-01	3,99E-06	4,58E-05	-7,71E+01
Fe40Ni40P14 B6	475	420	1,39E-04	-2,10E-06	7,20E-02	-1,51E-02	3,17E-02	-2,10E-01	4,41E-07	6,12E-06	-2,92E+01
Fe67Co18B14Si1	457	632	1,45E-04	-1,05E-05	7,74E-02	-7,26E-02	7,64E-01	-9,38E-01	9,88E-06	1,28E-04	-1,36E+02
Ti-Cu-Co-Si	430	570	1,60E-04	1,87E-06	1,45E-01	1,17E-02	2,19E-02	8,08E-02	1,51E-07	1,04E-06	1,29E+01
Ti-Cu-Ni-Si	432	572	1,60E-04	1,88E-06	1,52E-01	1,18E-02	2,21E-02	7,74E-02	1,46E-07	9,58E-07	1,24E+01
Ti-Cu-Co	575	700	1,60E-04	1,87E-06	1,58E-01	1,17E-02	2,19E-02	7,39E-02	1,39E-07	8,75E-07	1,18E+01
Zr75Ni25	520	532	1,68E-04	1,26E-05	3,43E-02	7,48E-02	9,39E-01	2,18E+00	2,74E-05	7,98E-04	3,66E+02
Zr64Ni36	495	528	1,82E-04	-9,50E-06	4,27E-02	-5,22E-02	4,96E-01	-1,22E+00	1,16E-05	2,72E-04	-2,22E+02
Zr36Ni64	487	580	1,70E-04	-2,00E-05	6,43E-02	-1,18E-01	2,35E+00	-1,83E+00	3,66E-05	5,69E-04	-3,11E+02
Te			1,20E-01	3,80E-04	3,00E-02	3,17E-03	1,20E+00	1,06E-01	4,01E-05	1,34E-03	1,27E+04
Ge			1,70E-03	2,20E-04	5,50E-01	1,29E-01	2,85E+01	2,35E-01	5,18E-05	9,41E-05	4,00E+02
Sb			3,60E-05	3,80E-05	4,00E-01	1,06E+00	4,01E+01	2,64E+00	1,00E-04	2,51E-04	9,50E+01
Fe			9,70E-06	1,70E-05	7,50E-01	1,75E+00	2,98E+01	2,34E+00	3,97E-05	5,30E-05	2,27E+01
Cr			1,90E-05	1,50E-05	6,70E-01	7,89E-01	1,18E+01	1,18E+00	1,77E-05	2,64E-05	2,24E+01
Cu			1,60E-06	1,80E-06	4,00E+00	1,13E+00	2,03E+00	2,81E-01	5,06E-07	1,27E-07	4,50E-01
Pt			1,10E-05	-4,40E-06	7,30E-01	-4,00E-01	1,76E+00	-5,48E-01	2,41E-06	3,30E-06	-6,03E+00
Ni			6,80E-06	-1,20E-05	9,20E-01	-1,76E+00	2,12E+01	-1,92E+00	2,30E-05	2,50E-05	-1,30E+01
Bi			1,20E-04	-6,80E-05	8,00E-02	-5,67E-01	3,85E+01	-7,08E+00	4,82E-04	6,02E-03	-8,50E+02
Хромель			6,60E-05	2,80E-05	2,00E-01	4,24E-01	1,19E+01	2,12E+00	5,94E-05	2,97E-04	1,40E+02
ПР10			2,00E-05	5,60E-06	3,70E-01	2,80E-01	1,57E+00	7,57E-01	4,24E-06	1,15E-05	1,51E+01
Алюмель			3,30E-05	-1,30E-05	1,50E-01	-3,94E-01	5,12E+00	-2,63E+00	3,41E-05	2,28E-04	-8,67E+01
Константан			4,70E-05	-3,50E-05	2,10E-01	-7,45E-01	2,61E+01	-3,55E+00	1,24E-04	5,91E-04	-1,67E+02
Копель			4,70E-05	-4,10E-05	2,40E-01	-8,72E-01	3,58E+01	-3,63E+00	1,49E-04	6,21E-04	-1,71E+02

5. Висновки

6. Conclusions

1. Відповідно до критерію S/ρ , рекомендується використовувати метали, металоїди, та їхні стопи для потреб термоелектрики, причому для металоїдів та напівпровідників рекомендується застосування критерію S^2/ρ ; тоді як для металевих шкел, які прагнуть використати для виготовлення в радіаційних перетворювачах енергії в електрику – рекомендується критерій S/χ .
2. Оскільки принцип вибору матеріалів для виготовлення термоелектродів перетворювачів/перетворювачів лише на основі S , ρ , χ недостатній, необхідно враховувати експлуатаційні параметри термоелектричних матеріалів, зокрема їх механічну міцність, термічну, випромінювальну та корозійну стійкість, технологічні особливості.
3. Для термоелектродів з МШ рекомендується враховувати температурний діапазон застосування, який лежить між температурою релаксації відпаалу T_r і температурою початку кристалізації T_K . Як правило, температура нанесення T_B для МШ становить $0,75 T_K$, не перевищуючи температури T_B втрати пластичності.
4. При використанні МШ в енергетичній термоелектриці для виготовлення перетворювачів [8], максимальна перетворювана енергія (потік) не повинен перевищувати $Q_{max} \leq (0.65 \dots 0.75)(\chi cd)^{1/2} \varepsilon^{-1}(\tau_1)^{1/2} T_U$, а товщина термоелектродів не повинна бути меншою від $h_{min} \geq (0.65 \dots 0.75)(\chi cd)^{1/2}(\tau_1)^{1/2} T_U$, де d – питома густина матеріалу термоелектроду; τ_1 – тривалість імпульсу опромінення.

Література

- [1] S. Yatsyshyn, O. Hotra, P. Skoropad, T. Bubela, M. Mykyichuk, O. Kochan, O. Boyko, Investigating Thermoelectric Batteries Based on Nanostructured Materials, *Energies* **2023**, 16, 3940. <https://doi.org/10.3390/en16093940>.
- [2] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, Thermometric noise and performance of thermoelectric thermometry, *Journal of Thermoelectricity*, 2015, No.2, P. 66-76. file:///C:/Users/Svyatoslav/Downloads/jtherel_2015_2_9.pdf
- [3] Tritt T.M., Subramanian M.A. Thermoelectric Materials, Phenomena and Applications: A Bird's Eye View, *MRS Bulletin*, March 2006, Vol.31, No.3, pp.188-198 DOI: [10.1557/mrs2006.44](https://doi.org/10.1557/mrs2006.44).
- [4] D. Zh. Chen (2016) Atomic-Level Structure and Deformation in Metallic Glasses. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology. doi:10.7907/Z95Q4T2B. <https://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:05252016-155624343>.
- [5] S. Patel, B. Swain, A. Behera, S. Mohapatra, Metallic Glasses: A Revolution in Material Science, From the Edited Volume. *Metallic Glasses*, Edited by Dragica Minić and Milica Vasić, 2020, DOI: 10.5772/intechopen.90165 <https://www.intechopen.com/chapters/70175>
- [6] Y. F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T.Liu, Y. Yang, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials today*, Volume 19, Issue 6, July–August 2016, pp.349-362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702115004010>
- [7] T. Jin, I. Park, T. Park, J. Park, J. H. Shim, Accelerated crystal structure prediction of multi-elements random alloy using expandable features, *Sc. Reports, Scientific Reports* | (2021) 11:5194, <https://www.nature.com/articles/s41598-021-84544-8.pdf?proof=t>
- [8] L. Heber, Ju. Schwab, T. Knobelspies, 3 kW Thermoelectric Generator for Natural Gas-Powered Heavy-Duty Vehicles—Holistic Development, Optimization and Validation, *Energies* **2022**, 15(1), 15; <https://doi.org/10.3390/en15010015>

