

# EICuRe – Electroforming Cu Recycling

*Dr.rer.nat. Kateřina Bartošová<sup>1</sup>, prof. Ing. Karel Dušek, Ph.D.<sup>1</sup>, doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.<sup>2</sup>,  
Ing. Bc. Marek Neruda, Ph.D.<sup>1</sup>, Ing. Petr Veselý, Ph.D.<sup>1</sup>, Ing. Vojtěch Vigner, Ph.D.<sup>1</sup>,  
Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.<sup>1</sup>, Ing. Radek Tuček<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická,*

<sup>2</sup>*Electroforming, s.r.o.*

*e-mail:bartok10@fel.cvut.cz*

## **Souhrn**

*EICuRe je elektrochemický systém, který přemění měděný granulát, což je standardní produkt recyklace kabelového měděného odpadu, do podoby měděné fólie využitelné například pro výrobu kompozitních střešních krytin. Patentované řešení horizontálně usazené rotující válcové katody umožňuje elektrolyticky nanášet měď z anodových košů navržených pro přímé plnění granulátem. Nad hladinou elektrolytu je měděná fólie kontinuálně odvíjena.*

**Klíčová slova:** *electroforming, elektrodepozice, recyklace mědi, měděné fólie, kabelový odpad*

## **Summary**

*EICuRe is an electrochemical system that converts copper granules, a standard product of recycled copper cable waste, into copper foil that can be used, for example, in the production of composite roofing materials. The patented design of a horizontally mounted rotating cylindrical cathode enables the electrolytic deposition of copper from anode baskets designed for direct filling with granules. The copper foil is continuously unwound above the electrolyte surface.*

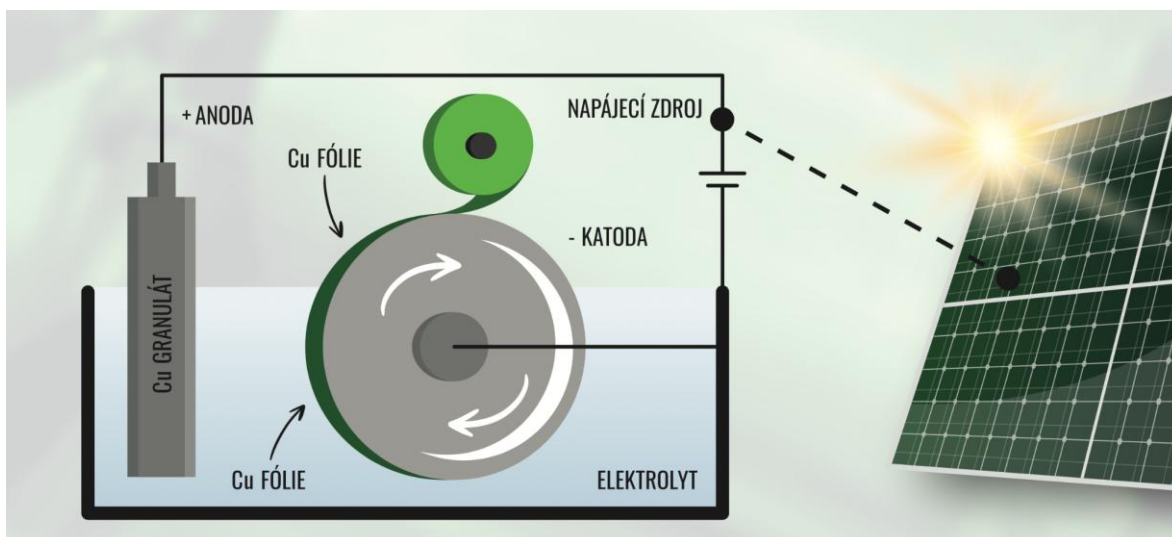
**Keywords:** *electroforming, electrodeposition, copper recycling, copper foil, cable waste*

## **Úvod**

Měď je důležitá, cenná a stále více využívaná surovina. Kromě tradičního použití, například jako střešní krytina, je stále více spotřebovávána pro výrobu elektroniky a baterií. 20. léta 21. století budou pravděpodobně obdobím nejvýraznějšího růstu objemu celosvětové poptávky po mědi v historii [1] a cena mědi neustále stoupá [2]. Stále většího významu proto nabývá získávání mědi recyklací z měděného šrotu [3], kdy lze průmyslovými procesy znovuzískat čistou měď, která má vlastnosti srovnatelné s mědí primární (nedochází k degradaci materiálu). Právě tyto trendy a výzvy současnosti byly motivací pro vývoj představovaného řešení, při kterém byly využity znalosti i praktické zkušenosti v oblasti materiálů a výrobních procesů v elektronice (FEL ČVUT) a v oblasti galvaniky a elektroformování (Electroforming, s.r.o.). Záměrem bylo recyklovat měděný granulát přímo do podoby konečného produktu.

## **Představení patentovaného řešení**

Principem systému EICuRe je elektrodepozice mědi do podoby měděné fólie. Mezi hlavní inovace tohoto řešení patří, že měď je v tomto systému elektrochemicky odebírána přímo z měděného granulátu v anodovém koši a poté ukládána na katodu. Oproti tomu v průmyslu je pro elektrolytickou výrobu měděných fólií využívána buď rozpustná měděná anoda, nebo častěji, zejména pro kontinuální výrobu, nerozpustná anoda. Schéma celého procesu je znázorněno na Obrázku 1.

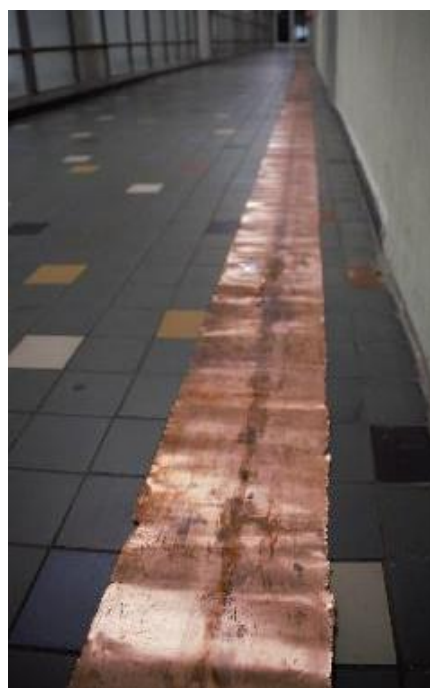


**Obrázek 1. Schématické zobrazení systému EICuRe.**

Byla úspěšně testována katoda z nerezové oceli. V první fázi vývoje byly vyráběny kusové vzorky fólie (Obrázek 2). Výhodné je provedení katody ve formě katodového válce, kdy měděná fólie může být kontinuálně deponována a odvíjena na zásobní válec a je tedy produkován „nekonečný“ pás fólie (Obrázek 3). Byl vytvořen poloprovozní elektrolyzér (Obrázky 4 a 5), který umožňuje elektroformování vstupního materiálu v podobě měděného granulátu (výstup recyklace kabelových měděných odpadů) na výstupní materiál v podobě měděné fólie, kterou je dále možné upravit podle potřeby. Výhodné je též využít pro výrobu ekologické zdroje napájení, zejména solární energii. Řešení je chráněno patentem ÚPV č. 310165 a je výstupem řešení projektu SS01020524 TAČT.



**Obrázek 2. Kusový vzorek fólie.**



**Obrázek 3. „Nekonečný“ pás fólie z kontinuální výroby.**



**Obrázky 4 a 5. Poloprovodní výroba měděné fólie systémem EICuRe.**

### **Vlastnosti vyrobených měděných fólií**

K vyhodnocení kvality provozovaného technologického postupu elektroformování a výsledných vlastností měděných fólií byla zkušební tělesa podrobována tahovým zkouškám, měření tvrdosti a analýze povrchu. Základní vlastnosti vyrobených vzorků měděné fólie jsou shrnuty v následujících tabulkách (Tabulky 1, 2 a 3).

**Tabulka 1. Mechanické vlastnosti vyrobené fólie.**

	Průměrná hodnota	Metoda	Směr měření vůči směru výroby
<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	386 ± 11	ISO 6892-1	kolmo
	389 ± 44	ISO 6892-1	rovnoběžně
<b>Modul pružnosti v tahu [GPa]</b>	27,4 ± 1,0	ISO 6892-1	kolmo
	25,3 ± 1,7	ISO 6892-1	rovnoběžně
<b>Tažnost při přetrhu [%]</b>	2,2 ± 0,2	ISO 6892-1	kolmo
	5,6 ± 0,7	ISO 6892-1	rovnoběžně
<b>Tvrdost – Vickers (HV 0,1) vrchní strana fólie</b>	176 ± 9	ISO 6507-1	
<b>Tvrdost – Vickers (HV 0,1) spodní strana fólie</b>	187 ± 9	ISO 6507-1	

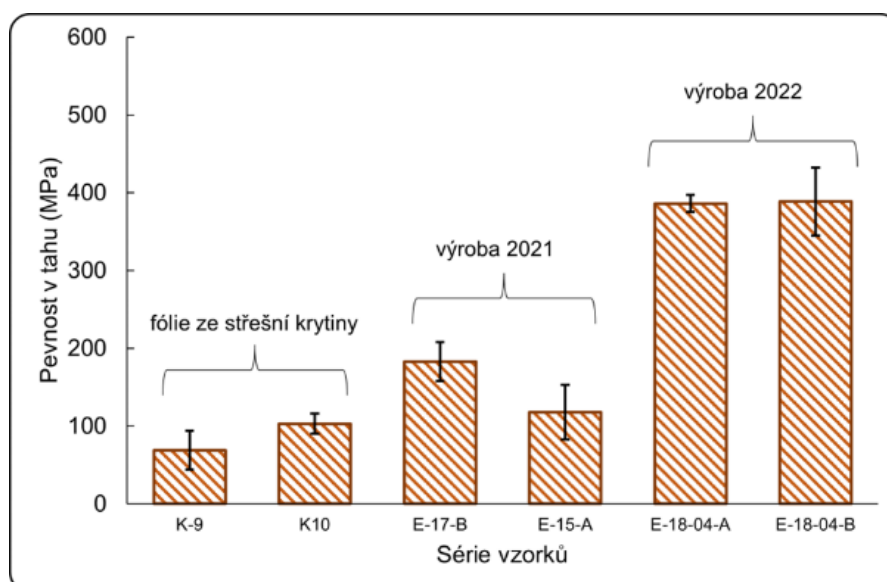
**Tabulka 2. Povrchová drsnost vyrobené fólie.**

	Průměrná hodnota	Metoda	Strana fólie
Průměrná aritmetická úchylka profilu R, [ $\mu\text{m}$ ]	1,4 $\pm$ 0,2	ISO 4287	vrchní
	2,4 $\pm$ 0,2	ISO 2487	spodní
Největší výška profilu R, [ $\mu\text{m}$ ]	8,1 $\pm$ 1,3	ISO 4287	vrchní
	17,5 $\pm$ 1,2	ISO 4287	spodní
Poměr aspektu textury S <sub>v</sub> , [-]	0,68 $\pm$ 0,14	ISO 25178-2:2012	vrchní
	0,84 $\pm$ 0,05	ISO 25178-2:2012	spodní

**Tabulka 3. Elektrické vlastnosti vyrobené fólie.**

	Průměrná hodnota	Metoda	Směr měření vůči rotaci katodového válce
Rezistivita [ $\Omega\text{m}$ ]	2,1 $\cdot$ 10 <sup>-8</sup> $\pm$ 8,4 $\cdot$ 10 <sup>-10</sup>	DIN/IEC 468	rovnoběžně
Konduktivita [S/m]	4,8 $\cdot$ 10 <sup>7</sup> $\pm$ 1,9 $\cdot$ 10 <sup>6</sup>	DIN/IEC 468	rovnoběžně

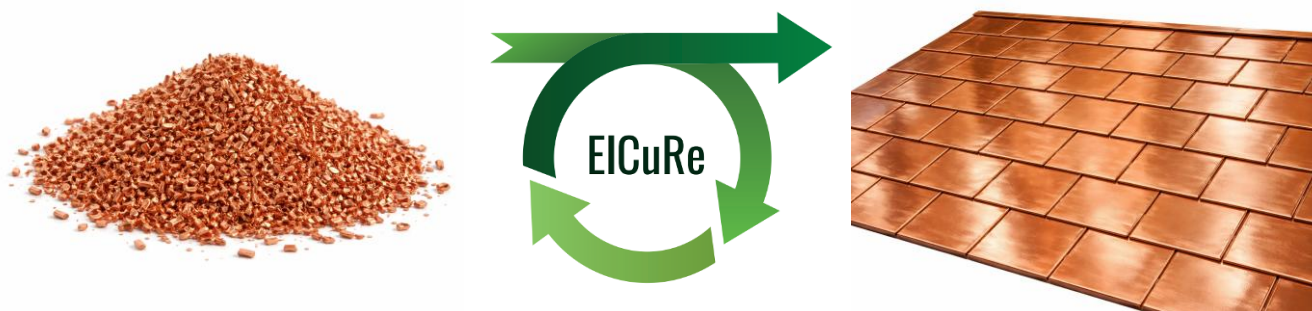
Při porovnání s tabulkovými hodnotami [4] je patrné, že elektrolyticky vyrobená měděná fólie je mechanicky pevnější než tažená žíhaná měď, má nižší tažnost, vyšší modul pružnosti (je tužší) a vyšší tvrdost. To je dáno rozdílnou mikrostrukturou, která je ovlivněna výrobním procesem. Pevnost v tahu byla porovnána též s komerční měděnou fólií ze střešní krytiny, protože právě podobná aplikace se pro naši fólii nabízí. Fólie vyrobená systémem EICuRe dosahuje oproti tomuto komerčnímu vzorku vyšší pevnosti (Obrázek 6).



**Obrázek 6. Pevnost v tahu vzorků vyrobené fólie – porovnání kontinuální výroby poloprovozním elektrolyzérem v roce 2022, kusové výroby v roce 2021 a komerčních vzorků fólie ze střešní krytiny.**

## Využití

Systém EICuRe umožňuje efektivní recyklaci měděného granulátu přímo do podoby konečného produktu. Vyvinutý systém slouží zejména k výrobě kontinuálních pásů měděné fólie, které mohou být dále podle potřeby řezány či sekány, např. do podoby páskových vodičů. Možností je ale i modifikace pro výrobu drátů, komponentů pro baterie (elektrodový materiál) nebo dalších průmyslových a stavebních prvků. Výhodné může být propojení systému EICuRe s výrobou konečného produktu – například lisování na plastový podklad. Příkladem je využití vyrobené fólie jako povrchové vrstvy plastové střešní krytiny (Obrázek 7). Toto konkrétní řešení je chráněno užitným vzorem ÚPV č. 37309.



**Obrázek 7. Příklad využití systému EICuRe pro výrobu střešní krytiny (ilustrační obrázky).**

Systém umožňuje implementaci průmyslu 4.0 – automatizace, robotizace, digitální továrna. Efektivitu výroby lze dále zlepšit využitím paralelních linek, dynamického řízení výrobního výkonu, obnovitelných zdrojů energie nebo přebytků v síti.

## Poděkování

Prezentované řešení je výsledkem projektu **ERIC - Elektrochemický systém pro recyklaci průmyslového měděného kabelového odpadu** (SS01020524) podpořeného programem Prostředí pro život Ministerstva životního prostředí. Poskytovatelem podpory je TAČR.

## Literatura

- [1] Goldman Sachs, Copper is the new oil, Dostupné z: <https://www.goldmansachs.com/pdfs/insights/pages/gs-research/copper-is-the-new-oil/report.pdf>
- [2] Trading Economics, Copper, Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/commodity/copper>
- [3] Recycling International, Copper scrap demand set to rise in 2026, Dostupné z: <https://recyclinginternational.com/markets/non-ferrous-metals-recycling-markets/copper-scrap-demand-set-to-rise-in-2026/62080/>
- [4] Matweb, Material property data. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9aeb83845c04c1db5126fada6f76f7e&ckck=1>