



## A hőátadás fokozásának passzív módszerei

*A hőátadás nagyon sok gyakorlati folyamatban döntő szerepet játszik: fűtés, hevítés, hűtés, párolgatók, hőcserélők, légkondicionálás stb. A nagyobb hőátadási tényező kisebb hőátadó felületek alkalmazását teszi lehetővé, ezzel anyagmegtakarítást és kisebb méreteket lehet elérni. A hőcserélőkben a leggyakoribb elem a csővezeték, amelyben áramolva adja át a folyadék a hőt a cső falán kívüli közegnek. A csövekben különféle betéteket elhelyezve a hőátadás fokozható, ennek viszont a nagyobb nyomásesés és áramoltatási energiaigény az ára. Az optimális megoldást lamináris áramlásnál a csavart szalag, turbulens áramlásnál a huzaltekercs behelyezése eredményezi. Az összeállítás elemzi az egyes megoldások előnyeit és hátrányait és a jellemző tényezőket, mérőszámokat (Nusselt-szám, Reynolds-szám, Prandtl-szám).*

---

Tárgyszavak: hőcserélő; hőátadás; passzív; csavart szalag; huzaltekercs.

---

A hőcserélők, hőleadók az élet számtalan területén megtalálhatóak a lakástól (pl. központi melegvízellátás többlakásos házban) a személygépkocsin át (hűtő) az ipari létesítményekig (pl. bejövő levegő előmelegítése kazánoknál, hulladék hő visszanyerése stb.). Sok esetben a méretek korlátozottak, illetve a felhasznált anyagmennyiséget mind a takarékoság, mind a tömeg lehető legkisebb értéken tartása miatt

korlátozni kell. Ez a hőátadási tényező növelésével érhető el, amit viszont a fizikai (tömegszállítási és hőtani) folyamatok határoznak meg. Bármennyire is elterjedt és hétköznapi eszközökről van szó, tervezésük és méretezésük nem egyszerű feladat, mivel a tömegáramlás lehet lamináris és turbulens is, a hőátadás leírása pedig igen bonyolult és erős kölcsönhatásban van a tömegáramlással. A kísérleti ta-

pasztalatok azt mutatták, hogy ha a cső belsejébe különféle akadályokat, betéteket helyeznek el, az jelentősen képes javítani a hőátadást. Mivel a betétek valamilyen mértékben akadályozzák az áramlást, hatásukra a nyomásesés, és emiatt az áramoltatási energiaigény nő. Tipikus optimumkeresési feladat ez, és jelentős tudományos, valamint gyakorlati kísérleti kutatómunkát végeztek el számos kutatóhelyen a jelenségek vizsgálata és elemzése céljából. A cél egyértelmű: a lehető legkisebb energia-vesztéssel a lehető legnagyobb javulást elérni a hőátadásban. Mivel az alkalmazott betétek igen egyszerűek, jó esély van arra, hogy minimális ráfordítással jelentős termikus javulást lehessen elérni.

## A folyamatokat leíró számok

A folyamatokat különféle, általában dimenzió nélküli viszonyszámokkal lehet leírni, amelyek felfedezőjük, az áramlástan nagy tudósainak nevét viselik.

A **Nusselt-számot** a  $h \cdot d/k$  képlet írja le, ahol  $h$  a konvektív hőátadási tényező,  $d$  a cső átmérője és  $k$  a hővezetési tényező. Minél nagyobb ez a szám, annál jobb a hőátadás.

A **Prandtl-szám** az impulzus molekuláris diffuzivitásának ( $\nu$  [görög nő], kinematikai

viszkozitás) és a hő molekuláris diffuzivitásának ( $\alpha$ ) hányadosa. Ez tulajdonképpen az áramló folyadék mechanikai és hőtani viselkedését veti össze.

A **Reynolds-szám** az áramló anyagban fellépő tehetetlenségi erők és belső súrlódási erők hányadosa:  $v \cdot d/\nu$ , ahol  $v$  az áramlási sebesség,  $d$  a cső átmérője és  $\nu$  (görög nő) a kinematikai viszkozitás.

## Betétek, áramlások

Habár a hőátadás fokozásának vannak aktív módszerei is, amelyek külső energiaforrás alkalmazásával működnek, ezek felépítése bonyolult, megvalósításuk drága, és az általuk elérhető javulás nem áll arányban a ráfordításokkal. Ezért a továbbiak a passzív módszerekkel foglalkoznak.

Általánosságban úgy lehet megfogalmazni a jelenséget, hogy a cső belsejébe valamilyen akadályt helyezve az csökkenti az áramlás számára rendelkezésre álló keresztmetszetet, ami a nyomásesés növekedését okozza. Általában az áramlási sebesség csökken, a fő áram mellett másodlagos áramlás is kialakul, amely hasznos a hőátadás szempontjából, mert megkeveri a csőben áramló folyadékot, ez növeli a hőmérsékleti gradienst és ezáltal a hőátadást.

A betétek, akadályok sokfélék lehetnek:

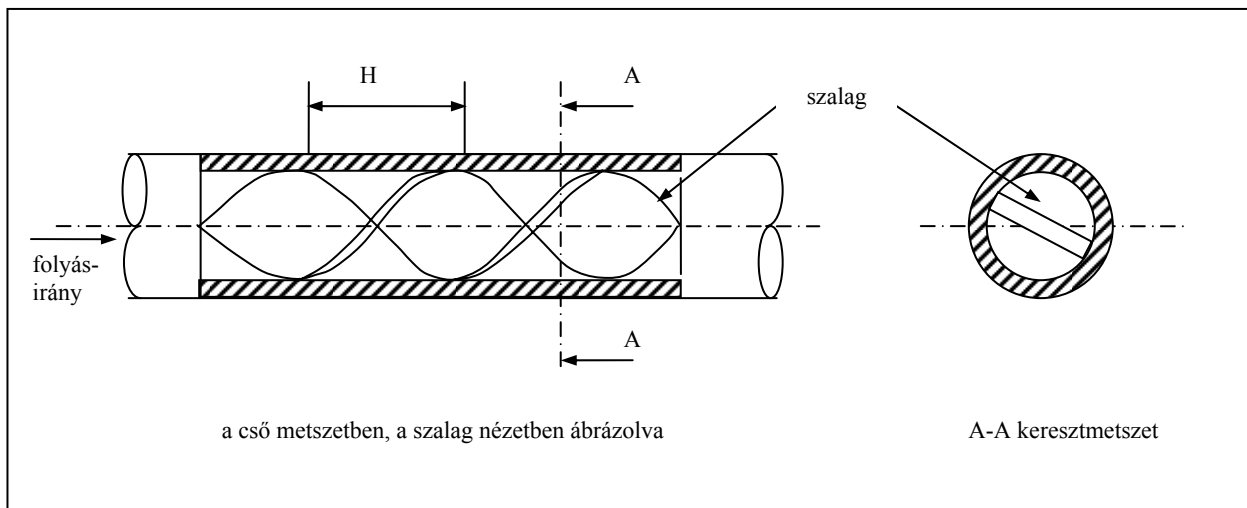
- csavart szalag,
- spirális huzaltekercs,
- bordák,
- háló.

A betétek mellett szóba jöhet még a cső belső felének megmunkálása is, például érdesítés kaparással, hornyolás stb. Ezek a megoldások viszonylag drágák az elérhető hatáshoz képest. A bordák és hálók behelyezésére ugyanez mondható el, a hálók ezen felül kedveznek a szilárd részecskék lerakódásának is, ami szintén hátrányos. A vizsgálatok eredményeként a *csavart szalag és a spirális huzaltekercs* kecsgetnek viszonylag jó eredmények mellett egyszerű és olcsó technikai kivitelezhetőséggel.

## Sokféle változat

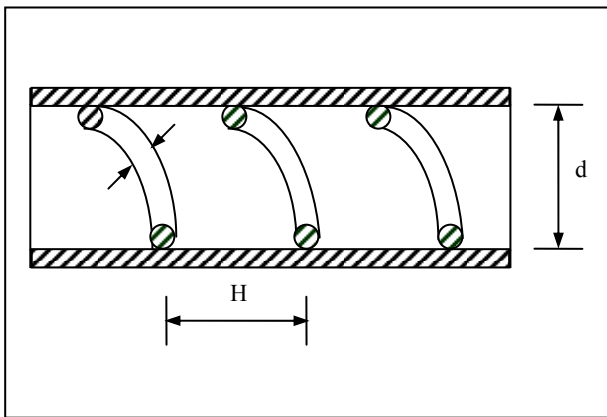
A *csavart szalag* esetén a cső belsejébe egy megcsavart lemezt helyeznek el (1. ábra). Bármennyire is egyszerű megoldásnak néz ki elsőre, számos változatát dolgozták ki és vizsgálták a kutatók:

- egyenletes menetemelkedés a cső egész hosszában,
- egyenletes menetemelkedés, csak a cső egy részében van szalag,
- egyenletes menetemelkedés, több szakaszban van szalag,
- változó menetemelkedés a cső egész hosszában: általában nő az áramlás irányában,
- változó menetemelkedés több szakaszban: általában nő az áramlás irányában.



1. ábra Csavart szalag elhelyezése kör keresztmetszetű csőben

A *huzaltekercs* esetén (2. ábra) a cső belső felszínére huzalt fektetnek spirális alakban. A csavart szalag esetén felsorolt összes kialakítási változatot itt is meg lehet valósítani. A huzaltekercs jellegénél fogva csak a cső falának közvetlen közelében fejt ki hatását, a cső belsőjében zajló áramlásra alig van, vagy egyáltalán nincs hatása.



2. ábra Spirális huzaltekercs elhelyezése kör keresztmetszetű csőben

Szót kell ejteni az áramlás két alaptípusáról is, ezek a lamináris és a turbulens áramlás. A lamináris esetben az áramlás nyugodt, egyenletes, szabályos rétegek alakulnak ki, állandó jellemzőkkel. Turbulens áramlás esetén az áramlási kép nem ilyen nyugodt, örvények, keveredések alakulnak ki. A turbulenciák sok áramlási feladatnál nem kívánatosak, a hőcserélők azonban kivételt képeznek: itt a turbulencia kifejezetten hasznos, mert a keveredés és a másodlagos áramlások javítják a

hőleadást. Sok vizsgálat irányult arra, hogy a cső keresztmetszete mentén hogyan vesznek részt az anyagrétegek a hőleadásban. Az adódott, hogy a fontos szerepet betöltő termikus ellenállásban lamináris áramlás esetén a cső falától távolabb eső rétegek is szerepet játszanak, vagyis egy vastag külső réteg viselkedése határozza meg a folyamatokat. A turbulens áramlásnál ezzel szemben csak egy, a cső falával érintkező vékony réteg játszik szerepet. Ebből az következik, hogy a vékony huzallal operáló huzaltekercses módszer csak turbulens áramlásnál hatásos, míg a csavart szalag a lamináris áramlás esetén alkalmazható jó eredménnyel.

## Tapasztalatok csavart szalagos betétekkel lamináris áramlásnál

A sokféle lehetséges elrendezés közül számos kísérlet és elméleti számítás bizonyította, hogy egy a teljes csőhossznál rövidebb szakaszon elhelyezett csavart szalag is kielégítő mértékben javítja lamináris áramlás esetén a hőátadási viszonyokat. A betétet értelemszerűen az áramlás iránya felől a csőszakasz elején kell elhelyezni. A szalag által az áramló kötegben keltett örvények a további csőszakaszban lassan ülnék el, és ez növeli a hőátadást. A rövid betét a nyomásesés, és így a szivattyú teljesít

ményének csak kismértékű növekedését okozza. A hatás viszkózus közegeknél, nagy Prandtl-szám esetén (kb. 200 és 500 között) jelentkezik jelentős mértékben. A kísérletek eredményei szerint a csőszakasz fele hosszán elhelyezett csavart szalag adja az optimális megoldást (vízszintes helyzetű csővezeték és egyenletes hőáramlás esetén).

Érdekes módon a több rövidebb csavart szalagdarab egymás utáni, egyenlő távolságokra való elhelyezése nem javítja, hanem rontja a viszonyokat: a súrlódás nő, az áramlás mentén elhelyezett újabb szalagdarabok lerontják az örvények kialakulásának lehetőségét.

A szalagok menetemelkedése is változtatható tényező: a vizsgálatok azt mutatták, hogy a kisebb menetemelkedésnek (sűrűbb menetnek) nagyobb hatása van, mint a nagyobbaknak. Az is fontos szerepet játszik, hogy a behelyezett lemez mennyire szorosan illeszkedik a cső falához. Olyan konstrukció is megvalósítható ugyanis, hogy nagy rész van a cső belső fala és a lemez széle között. A kísérletek azt mutatták, hogy a szoros illesztés hatékonyabb hőtani szempontból. Üzemeltetési szempontból ugyanakkor a laza illesztés kedvezőbb, mivel könnyebb a szalag eltávolítása a szükséges rendszeres tisztítás céljából.

## **Tapasztalatok csavart szalagos betétekkel turbulens áramlásnál**

A turbulens áramlás esetén a csavart szalagos betéteknek kisebb a hatásuk, mivel az általuk keltett örvények az áramlásban eleve, betét nélkül is jelenlevő örvényekhez adódnak, sőt azok hatását esetleg le is ronthatják. Ehhez járul az a jelenség is, hogy a hőátadást ebben az esetben főleg a cső fala mentén elhelyezkedő határréteg folyamatai határozzák meg.

Több vizsgálat is kimutatta, hogy a turbulens áramlás esetén is a kisebb menetemelkedésnek (sűrűbb menetnek) nagyobb hatása van, mint a nagyobbaknak, mivel ez többlet-örvényeket kelt a határrétegben. A szalagdarab hosszát illetően is számos vizsgálat zajlott le, eredményük az volt, hogy turbulens áramlás esetén egyetlen rövidebb, a csőszakasz 25–45%-ára kiterjedő csavart szalagos betét javítja a legjobban a hőátadást.

A turbulens áramlásnál a szalag által keltett hősugárzás is szerepet játszik, mivel a szalag mint sugárzó felület által a cső falára sugárzott hő növeli a hőátadást. Ennek ellenére nem találtak jelentős különbséget ugyanolyan elrendezés esetén acélszalag és teflonszalag behelyezése között. Részben a sugárzási, részben az áramlási viszonyok befolyásolása miatt viszont a szalag felszínének érdessége jelentős szerepet játszhat, és az érdesítés javíthatja a hőleadást.

## **Tapasztalatok spirális huzaltekercs betétekkel lamináris áramlásnál**

Viszonylag kevés kutatást végeztek ezzel a kombinációval a korábban említett hátrányai miatt. Voltak ugyanakkor olyan eredmények is, amelyek szerint spirális huzaltekercs behelyezése javította a hőátadást, a csavart szalaghoz hasonlóan örvények keltésével. Különösen olyan elrendezések esetén jelentkezett ez a hatás, ahol a cső belépő keresztmetszeténél léptek fel a turbulenciák a tekercs hatására. A huzaltekercs csak kis növekedést okoz a nyomásesésben, ezért amennyiben el lehet a kívánt hatást érni vele, az csak nagyon kis energiabefektetéssel jár. Egyes speciális elrendezéseknél a spirális huzaltekercs behelyezése minden más betétnél jobb eredményeket hozott.

## **Tapasztalatok spirális huzaltekercs betétekkel turbulens áramlásnál**

A huzal vastagsága több vizsgálat szerint viszonylag kis hatással van a folyamatokra. A menetemelkedés változtatása ugyanakkor ellentétes hatásokat vált ki, ezért egymásnak ellentmondó kísérleti eredmények születtek. Hasonlóan nem egyértelmű annak a hatása,

hogy milyen távol helyezkedik el a huzaltekercs a cső falától: egyes elrendezésekben a közvetlenül a csőfalra helyezett huzal volt hatásosabb, más vizsgálatok szerint a viszonylag nagy térköz a menetek és a cső között adták az optimumot. Valószínűsíthető, hogy az áramlás eleve turbulens jellege miatt minden egyes elrendezésben más jellemzőjű huzaltekercs adja a legjobb megoldást, és az elméleti leírást is megnehezíti a turbulencia, ezért csak kísérleti úton lehet az optimumot megtalálni.

## **Egyéb betétek**

Számos kísérletet folytattak az eddig tárgyaltaktól eltérő geometriájú betétekkel is. Például 45°-os szögű *bordák* elhelyezése négyzetes keresztmetszetű légcsatornákban két egymással szemben fekvő falon 260–300%-kal növelte a hőátadási tényezőt. Természetesen a bordák számos geometriai elrendezése szóba jöhet, a vizsgálatok a 45°-os szöget mutatták optimálisnak. A bordák keresztmetszetének formája ugyanakkor nem játszott lényeges szerepet.

Hatékony a hőátadás szempontjából a csatorna belső felületének *érdesítése* és mélyedések, *hornyok* kialakítása is. Az érdesség mértéke, illetve a hornyoknak a csatorna belméretéhez viszonyított nagysága adott elrendezésnél op-

timumot mutat, vagyis az optimumnál kisebb és nagyobb mértékű beavatkozás egyaránt lerontja a hatást.

Az érdesítésnek és a hornyolásnak speciális kombinációja az az eljárás, amelynek során *félgömb alakú bemélyedéseket* hoztak létre a csatorna falában. Turbulens áramlásnál ez az elrendezés megfelelő geometria mellett gyakorlatilag nem befolyásolta az áramlást, viszont 30–40%-kal javította a hőátadást.

ris áramlásnál a csavart szalagos betét minden más betétfajtánál jobb eredményeket ad, elegendő a csőnek csak egy rövidebb szakaszán, a közeg belépése felőli csővégnél elhelyezni a szalagot. Turbulens áramlásnál a spirális huzaltekercs betétek adják a legjobb megoldást. Ez utóbbi esetben a betétek hatása kevésbé számítható és jósolható, ezért az optimális elrendezés csak kísérleti úton határozható meg.

**Összeállította: Kis Miklós**

## Összefoglalás

Egyszerű passzív módszerekkel, megfelelő betétek behelyezésével a hőcserélők hatékonysága jelentősen fokozható. A fizetendő ár viszonylag csekély: az egyszerűen gyártható és behelyezhető betétek költsége, valamint a nyomásesés és emiatt a szükséges szivattyúteljesítmény kismértékű növekedése. Laminá-

## Irodalom

- [1] Dewan, A.; Mahanta, P. stb.: Review of passive heat transfer augmentation techniques. = Journal of Power and Energy, 218. k. A rész, 7. sz. 2004. nov. p. 509–527.
- [2] Ujhidy, A.; Nemeth, J. stb.: Fluid flow in tubes with helical elements. = Chemical Engineering and Processing, 2003. 42. k. 1. sz. p. 1–7.