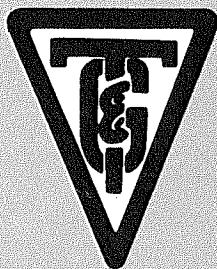




## HEGESZTÉS



A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

1 9 8 6  
ÁPRILIS

• BUDAPEST •

133—172 OLDAL  
XXXVIII. ÉVFOLYAM

4

# Hegesztett szerkezetek számítógépes optimális méretezése

DR. FARKAS JÓZSEF—DR. JÁRMAI KÁROLY—SZABÓ J. FERENC \*

A szerkezettervezés során előtérbe kerülnek a gazdaságosság (anyagtakarékoság, költségminimum) szempontjai. A tanulmány áttekinti a gazdaságos szerkezetek számítógépes tervezésének fő fázisait, az analízist, az optimalást és az értékelést. Kitér a hegesztett szerkezetek speciális követelményeire és a költségfüggvénnyel kapcsolatos szempontokra. A továbbfejlesztés teendői közül kiemeli a végelelemes analízis és az optimalás összekapcsolását, valamint a könnyen kezelhető, hozzáférhető, rugalmas szoftverrendszerek kifejlesztését. Végül áttekinti a Nehézipari Műszaki Egyetem Szállítóberendezések Tanszékén végzett fontosabb számításokat.

A szerkezettervezés fejlődése során lényeges előrelépést jelentett, hogy az analízist felváltotta a szerkezetszintézis, amely a biztonság mellett a gazdaságosságot is szem előtt tartja. E fejlődést elsősorban a matematikai feltételes függvényminimálási módszerek és a számítógépek nagyarányú alkalmazása tette lehetővé. Az optimális méretezés már meghatározott célfüggvény minimumát keresi megszabott korlátozások mellett. Az általában többváltozós, nemlineáris célfüggvény minimumkeresése nemlineáris korlátozások mellett rendszerint nem könnyű, de a legtöbb esetben a számítógépes módszerek révén a tervező jól használható eredményt kap.

## Általános szempontok

A gazdaságos szerkezetek tervezése során az anyagtakarékoság, a költségminimum, az energiaráfordítás csökkentésének szempontjait helyezük előtérbe. A tömegminimumra való méretezést a repülőgép-tervezés fejlesztette ki, de ma már a repülőgépeknél is felvetődik az energiatakarékoság, a gép- és építőiparban pedig sokszor a munkaráfordítás az elsődleges költségtényező, amit csökkenteni kell.

A gazdaságos szerkezettervezésnek a kutatások szerves részévé kell válnia, mert az analitikus eredményeket feldolgozva megmutatja azok hatását a szerkezetvariánsokra, megtanítja a tervezőt szélesebb látókörrel dolgozni, többféle szempont szerint mérlegelni a variánsokat.

Az optimális méretezés visszahat a szerkezetanalízisre is, vele szoros kölcsönhatásban van. Jó példa erre a tönkremeneteli módok interakciójának behatóbb vizsgálata. Régebben külön-külön fogalmazták meg pl. az egyes stabilitási követelményeket. Pl. azt a nyomott rudat tekintették optimálisnak, amelyen egyszerre válnak aktívvá az egész rúd kihajlására és a lemezelemeinek horpadására vonatkozó méretezési feltételek. A kísérletek azonban azt mutatták, hogy az így optimalt rúd teherbírása kisebb a számítottnál, mert a két instabilitási jelenség kölcsönhatása csökkenti azt [1]. Ez további kutatásokat eredményezett, amelyek jelentősen hozzájárultak a helyes tervezésemélet fejlődéséhez, a komplex határállapotok pontosabb megismeréséhez.

\* Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc

## A méretezés rendszere

A rendszerszemléletű szerkezettervezés három fő fázisa az analízis, optimalás és értékelés. Ezen belül a következő főbb modulok jelölhetők meg.

### Analízis

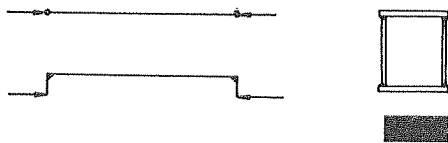
- Szerkezeti variánsok felvázolása: szerkezettípus, anyagok, szelvényválaszték, gyártási, szállítási, szerelési mód megválasztása.
- Terhek, tehercsoportosítások elemzése.
- Szerkezet-határállapotok elemzése (stabilitás, törésmechanika, rezgés, képlékenységtan).
- Végelelemes számítások, igénybevételek, feszültségek, alakváltozások, stabilitás, rezgések meghatározására.
- Kísérletek, mérések modelleken és eredeti szerkezeteken.
- Megbízhatóság, biztonsági tényezők elemzése.
- Méretezési feltételek matematikai megfogalmazása a kutatási eredmények és szabványelőírások alapján: szilárdsági, gyártási és egyéb (pl. esztétikai) feltételek.
- Célfüggvény matematikai megfogalmazása anyag-, gyártási, szállítási, szerelési, üzemeltetési költségek elemzése alapján.

### Optimalás

- Matematikai módszerek kifejlesztése, adaptálása a célfüggvény minimalálására korlátozások esetén.
- Az optimalandó ismeretlenek definiálása folytonos függvényekkel vagy diszkrét értéksorokkal: szerkezeti méretek, alak, topológia.
- Algoritmusok, programok kidolgozása.
- Értéktartományok, kiinduló értékek megválasztása.
- Számítógépi munka: futtatások, konvergencia, gépi idő csökkentésének lehetőségei, szubrutinok.
- Diszkrétizálás: folytonos függvények esetében az ismeretlenek kerekített optimális értékeinek meghatározása.
- Grafika: a számított optimális szerkezet grafikus megjelenítése.
- Érzékenységvizsgálat: a célfüggvény viselkedése az optimum környezetében.
- Különböző matematikai módszerekkel végzett optimalások összehasonlítása mintafeladatokon.

### Értékelés

- Az egyes szerkezetvariánsok összehasonlítása.



1. ábra. Központosan és külpontosan nyomott, négyzetes szekrényszelvényű rúd

b) Egyes paraméterek hatásának vizsgálata: növelt folyáshatárú acélok alkalmazásának gazdaságossága, hegesztési költség tényező változásának hatása stb.

c) Tervezési segédletek kidolgozása: szuboptimalt szelvénytípusok táblázatai, tömeg-, illetve költség-összehasonlító diagramok egyes fő paraméterek függvényében.

d) Tervezési irányelvek kidolgozása.

Az egyes modulok számítógépes interakcióban vannak egymással, így alkotják a számítógépes szerkezettervezési rendszert. Pl. a [2] könyvben több ilyen rendszert ismertettek.

A hegesztett szerkezetek optimális méretezése során néhány speciális szempontot célszerű figyelembe venni: 1. a szilárdsági analízisben számolni kell a hegesztésből visszamaradó feszültségek és alakváltozások hatásával [3], ezek miatt a szerkezetek a határállapotok közelében erősen nemlineáris viselkedést mutatnak; 2. a gyártási feltételeknél fokozottan ügyelni kell a varratok elkészíthetőségére (hozzáférhetőség), a technológiailag helyes kötéskialakításokra, az egyes hegesztéstechnológiákhoz tartozó lemezvastagság-tartományokra, a lamelláris repedezési veszély elkerülésére; 3. a költségfüggvényekben figyelembe kell venni a hegesztési költségeket, főként sok varratot tartalmazó szerkezettípusokon (pl. bordázott lemezek [4, 5]).

A költségfüggvényben általában csak azokat a költség tényezőket kell figyelembe venni, amelyek szignifikánsan befolyásolják az optimalizálható ismeretlen szerkezeti méreteket. Pl. felesleges két tömör szelvényű tartó szerkezetvariánsainál figyelembe venni a szerelési, szállítási költségeket, mert ezek a tömeg 10-20%-os változása esetén gyakorlatilag nem változnak. Viszont egy tömör és egy rácsos tartó összehasonlítása során már lényeges szerepet játszanak a szerelési, szállítási költségek is, s főleg a rácsos tartó csomópontjainak gyártási, illetve szerelési költségei mások, mint egy tömör tartó illesztési és gyártási költségei.

#### A továbbfejlesztés szempontjai

Schmit amerikai professzor, aki 1960-ban írt tanulmányával megalapozta a szerkezetszintézist — vagyis a szerkezetek számítógépes optimális méretezését nemlineáris matematikai programozási módszerekkel — 1981-ben az alábbi továbbfejlesztési területeket jelölte meg [2]:

1. diszkrét optimalizációs módszerek,
2. dekompozíciós módszerek nagy rendszerek optimalizálására,
3. a megbízhatóság-elméleten alapuló optimalizálás,
4. a szerkezetek geometriájának, alakjának, topológiájának optimalizálása,
5. rugalmassági és képlékenységi határállapotok együttes figyelembevétele,

6. dinamikus terhelések, rezgéscsillapítási feltételek beépítése,

7. komplex törési módok (pl. többféle instabilitási mód interakciójának) figyelembevétele,

8. tömeg helyett más célfüggvények (költség, megbízhatóság) alkalmazása,

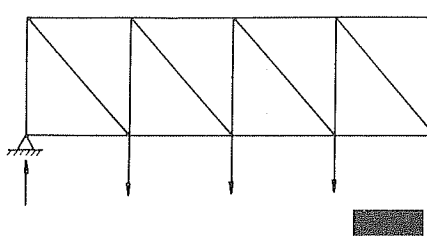
9. jól dokumentált, könnyen kezelhető programok kifejlesztése.

Az utóbbi szempont fontosságát támasztja alá a [6] könyv bevezetője is, amelyben leírják, hogy az optimális méretezés még az USA-ban is nehezen terjed, főleg a tervezőmérnökök között. Erről 27 kutatót, illetve tervezőt kérdeztek meg 1981-ben. A tervezők szerint fontos a költségcsökkentés, azonban az optimális méretezést túl elméletinek tartják, nincs elég gyakorlat az ilyen algoritmusok és programok használatában. Ezért könnyen kezelhető, jól hozzáférhető szoftvert kell kidolgozni. Belegundu [7] tanulmányában ehhez még hozzáteszi, hogy a szoftvernek rugalmasnak kell lennie, mert a tervezői gyakorlatban sokféle terhelés, szerkezettípus, szabványelőírás, anyagminőség, igénybevétel-kombináció, méretezési feltétel, költségfüggvény adódhat és többféle matematikai módszert célszerű kipróbálni, hogy a konkrét feladathoz a legalkalmasabbat válasszuk ki.

A [7] tanulmány egyébként többféle szerkezetvariáns összehasonlítását mutatja be. Keretszerkezetet optimál acél-, illetve alumíniumanyag és többféle szelvénytípus (I-szelvény, cső, négyszögletes zárt szelvény) esetére, és ezek tömegeit hasonlítja össze.

A műanyag szerkezetek térhódítását jelzi Sedlmayer szabadalma is [8] a Krupp cégnél: daruhid-megoldásában a főtartó acélból, a többi mellék-tartóelem szál-erősítéses műanyagból készült. Szintén a műanyagok előnyeit illusztrálja a [9] tanulmány, amely acélból, alumíniumból, illetve szénszálas műanyagból készült, nagysebességű négycsuklós mechanizmust alkotó rudazat rezgéképeit hasonlítja össze. A rezgéképeket végeelemes analízissel határozta meg.

A végeelemes módszernek fontos szerepe van a szerkezettervezésben, amint ez az előzőekből is látható. A méretezési feltételekben szereplő szerkezetjellemző mennyiségeket (feszültség, alakváltozás, stabilitási határállapot, saját frekvencia, rezgéscsillapítás) sok esetben nem lehet zárt képletekkel számítani. ekkor ezek számítását a végeelemes módszerrel célszerű végezni, és e számítások eredményeit kell bevonni az optimális méretezésbe. A végeelemes analízis és az optimalizálás összekapcsolása nagy számítógépi kapacitást igényel, ezért eddig csak ritkán alkalmazták. Pl. Timár [10] alkalmazta egyszerű felépítésű szendvicshégyzetlemez optimalizálására a SUMT matematikai programozási módszerrel összekapcsolva. Leginkább az optimalizációs kritériumok módszerébe építették be a



2. ábra. Síkbeli rácsos tartó

végeselemes számításokat (pl. az amerikai ACCESS-rendszerben [2, 4, 5]). Ezek hátránya, hogy kevésbé rugalmasak, mert csak bizonyos méretezési feltételekre alkalmazhatók. Többféle módszert dolgoztak ki a számítógépi idő csökkentésére, hogy az optimális iterációk során ne kelljen a teljes szerkezetanalízist újra és újra elvégezni, hanem csak a kisebb szerkezetmódosításokat figyelembe vevő, ún. reanalízist. E módszerektől ad áttekintést pl. Arora tanulmánya [11].

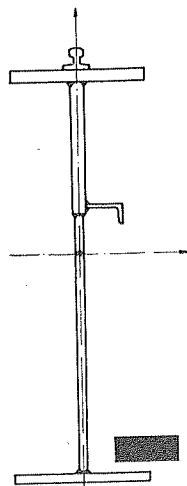
A kiemelt országos célprogramok között szerepel a gazdaságos anyagfelhasználás, a kisebb tömegű szerkezetek előállítása. Csökkenteni kell tehát a szerkezetek tömegét, előállítási költségét, a gyártásra és az üzemeltetésre fordított energiát. E feladatok végrehajtását a korszerűbb tervezési munkák teszik lehetővé. Ezek elősegítésére a következő szempontokat kell szem előtt tartani:

- a) megfelelő anyag- és szelvényválaszték biztosítása, költségadatok gyűjtése, adatbankok létrehozása,
- b) korszerű méretezési szabványok és irányelvek, könnyen számítógépre vihető méretezési feltételek kidolgozása,
- c) újabb anyagok, anyagkombinációk alkalmazása: növelt folyáshatárú acélok, alumíniumötvözetek, szálerezősítőes műanyagok, szendvicsszerkezetek, kombinált bordázott-rétegezett szerkezetek alkalmazása,
- d) pontosabb teheranalízis,
- e) pontosabb szilárdsági számítások a végeselemes módszer alkalmazásával,
- f) részletesebb költségelemzések, komplex költségfüggvények alkalmazása,
- g) könnyen kezelhető, hozzáférhető, rugalmas szoftver-rendszerek kidolgozása.

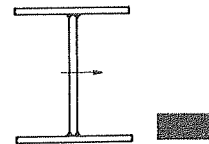
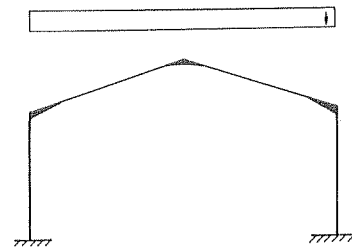
### Alkalmazások

Hegesztett szerkezetek számítógépes optimális méretezésére az NME Szállítóberendezések Tanszékén számos program készült. Ezekről más helyeken publikált tanulmányokban számoltunk be, így itt csak rövid áttekintést adunk. Áttekintés található a [12] tanulmányban is.

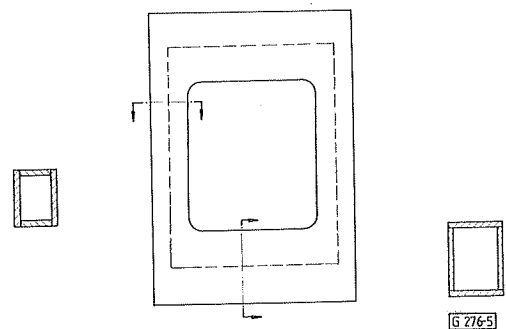
1. Központosan és külponosan nyomott, négyzetes szekrényszelvényű rudak szuboptimált szelvényssorozat



3. ábra. Hegesztett darupályatartó keresztmetszete



4. ábra. Hegesztett, I-szelvényű rudakból álló ipari csarnokkeret



5. ábra. Hegesztett szekrényszelvényű, zárt sajtógépkeret

zati a rüderő és rüdhossz függvényében [1, 2, 5, 13] (1. ábra).

2. Síkbeli rácsos tartók optimális méretezése, négyzetes szelvényű rudakból hegesztve. A lehajlási feltétel figyelembevételével az optimalitási kritériumok módszere alapján történik [4, 5] (2. ábra). A továbbfejlesztett változatban a rüderők számítása végeselemes programmal történik, a megfelelő rüdszelvényeket a négyzetes szekrényszelvények szuboptimált sorozatából gépi úton lehet kiválasztani [14].

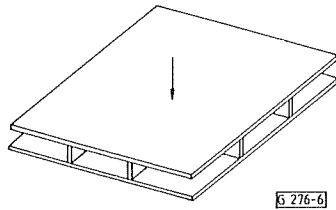
3. Hegesztett I-szelvényű darupályatartó optimális méretezése backtrack módszerrel, a felső nyakvarratra vonatkozó speciális fáradási feltétel figyelembevételével [5] (3. ábra).

4. Hegesztett I-szelvényű rudakból álló egyhajós ipari csarnokkeret optimális rugalmas méretezése backtrack [4, 5], illetve Box-módszerrel [15]. A továbbfejlesztett változatban az igénybevételek számítása végeselemes programmal történik (4. ábra).

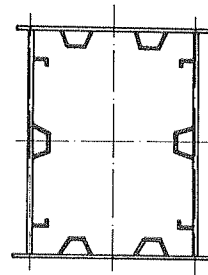
5. Hegesztett szekrényszelvényekből álló zárt sajtógépkeret tömegminimumra történő méretezése backtrack módszerrel [4, 5] (5. ábra).

6. Hegesztett cellaszerkezetű lemez költségminimumra történő méretezése a hegesztési költségek figyelembevételével, backtrack módszerrel [4, 5, 16, 17] (6. ábra).

7. Futódaruhíd-tartók tömegminimumra történő méretezése. Kétszekrényes főtartók optimalálása backtrack módszerrel [18], egyszekrényes főtartók optimalálása Rosenbrock-módszerrel [19] (7. ábra). A Rosenbrock-módszer leírása megtalálható a [20] könyvben.



6. ábra. Hegesztett cellaszerkezetű lemez



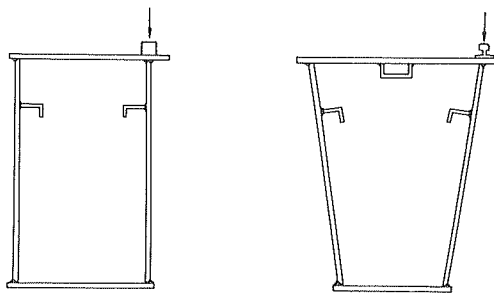
8. ábra. Hosszmerevítéses szekrényszelvényű darugém keresztmetszete

8. Hosszmerevítéses, szekrényszelvényű darugémek keresztmetszeteinek optimalizálása keresztmetszetterület-minimumra, L-, illetve trapézbordákkal, Rosenbrock-algoritmussal, kétirányú hajlítás, nyírás, nyomás és csavarás esetében [21] (8. ábra).

#### I R O D A L O M

- [1] Farkas J.: Növelt folyáshatárú acélok alkalmazásának gazdaságossága hegesztett, négyzetes szekrényszelvényű nyomott rudak és hibrid I-tartók esetében. Gép 35 (1983) 453—459.
- [2] New directions in optimum structural design. Proc. 2nd Int. Symposium on Optimum Structural Design, University of Arizona, Tucson, 1981. Chichester, New York, etc. Wiley & Sons, 1984.
- [3] Farkas J.: Maradó feszültségek hatása acélszerkezetek teherbírására. Gép 35 (1983) 127—132.
- [4] Farkas J.: Fémszerkezetek. Egyetemi tankönyv. 2. kiadás. Budapest, Tankönyvkiadó, 1983.
- [5] Farkas J.: Optimum design of metal structures. Budapest, Akadémiai Kiadó, Chichester, Ellis Horwood, 1984.
- [6] Structural optimization. Recent developments and applications. Ed. Lev, O. E. New York, ASCE, 1981.
- [7] Belegundu, A. D.: A role of the optimization process in

- structural design. Civil Engineering for Practicing and Design Engineers 3 (1984) 773—785.
- [8] Sedlmayer, F.: Kranträger. Patent BRD No. 3228314. 1984.
- [9] Sung, C. K.—Thompson, B. S.: Material selection: an important parameter in the design of high-speed linkages. Mechanism and Machine Theory 19 (1984) 389—396.
- [10] Timár I.: Optimierung von Sandwichplatten mit Hilfe eines Finit-Element-Programmes. Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. Miskolc, Ser. C. Mech. Eng. 41 (1984) 51—70.
- [11] Arora, J. S.: Survey of structural reanalysis techniques. Proc. ASCE J. Struct. Div. 102 (1976) No. ST4, 783—802.
- [12] Farkas J.—Jármai K.—Szabó L.—Szabó J. F.: Computerized optimum design of economic series of welded profiles for load-carrying structures. APMS—COMPCONTROL 85. Conference, Budapest 1985. Preprint Vol. 3. 550—559.
- [13] Farkas J.: Optimum square hollow sections for centrally and eccentrically compressed steel members. 3rd Int. Coll. Stability of Metal Structures, Paris 1983. Final Report, 1984. 121—125.
- [14] Jármai K.: Optimal design of plane trusses. Proc. 4th Conf. on Steel Structures, Timisoara, 1985. Polytechnic Institute of Timisoara 47—54.
- [15] Jármai K.: Optimal design of welded frames by Complex programming method. Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. Miskolc, Ser. C. Machinery 37 (1982) 79—95.
- [16] Farkas J.: Minimum cost design of welded square cellular plates. Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. Miskolc, Ser. C. Machinery 37 (1982) 111—130.
- [17] Farkas J.: Effect to yield stresses and welding costs on the optimum design cellular plates. Proc. 14th Czechoslovak Steel Structures Conference, Košice, 1985. Vol. 1. 205—208.
- [18] Farkas J.: Növelt folyáshatárú acélok alkalmazása kétszekrényes futódaruhidakhoz. Gép 37 (1985) 137—140.
- [19] Jármai K.: Egyfőtartós futódaru optimális méretezése személyi számítógéppel. Anyagmozgató és építőgépek konstrukciós fejlesztése. Kollokvium, Budapest, 1984. GTE, 253—264.
- [20] Kuester, J. L.—Mize, J. H.: Optimization techniques with Fortran. New York, McGraw Hill, 1973.
- [21] Farkas J.—Jármai K.—Szabó J. F.: Optimum design of longitudinally stiffened arbitrarily loaded box sections. Proc. Regional Colloquium „Stability of steel structures” Budapest, 1986.



7. ábra. Két-, illetve egyszekrényes kivitelű futódaruhidak keresztmetszete