

NAPJATOST V DESKÁCH S OTVORY

Ing. Josef Vísner, CSc
Škoda o.p. Plzeň ZVJE Bolevec

Anotace

Je popsána metodika fotoelasticimetrického měření koeficientu koncentrace napětí v deskách perforovaných čtvercovou, trojúhelníkovou a diagonální mříží kruhových otvorů při zatížení jednoosým a dvojosým tahem. Původní zatěžovací zařízení pro čtvercovou mříž bylo upraveno a je uveden popis této úpravy. Zjištěné velikosti koeficientu koncentrace napětí jsou porovnány s dostupnými teoretickými i experimentálními výsledky uvedenými v literatuře.

1.0 Úvod

Často používaným konstrukčním prvkem jsou desky oslabené jednotlivými otvory, jejich řadou a mříží různě uspořádaných otvorů. Příkladem použití mříží otvorů jsou trubkovnice kondenzátorů, perforovaná víka a dna jaderných reaktorů, opěrné rošty aktivní zony, některé součásti raket a pod.

Ekonomické využití materiálu a současně bezpečný provoz těchto prvků, který v mnoha případech rozhoduje o bezpečnosti celého zařízení, vyžaduje podrobnou napěťovou analýzu různých uspořádání otvorů, jejich hustoty a různých způsobů zatížení. Vhodné uspořádání otvorů může ovlivnit i ekonomii provozu jako např. v jaderné technice uspořádání palivových článků v aktivní zóně. Přestože se jedná o rovinnou úlohu, je její teoretické i experimentální řešení velice obtížné a v literatuře jsou uvedeny jen dílčí problémy.

Pro posouzení napjatosti vík, den a opěrných roštů jaderných reaktorů má velký význam koeficient koncentrace napětí, podle kterého se řídí přípustné nominální napětí a jemu odpovídající tloušťka stěn těchto částí. Protože se právě tyto potřebné údaje v dostupné literatuře nevyskytují, byl proveden fotoel. výzkum tohoto problému,

Řešení bylo provedeno na deskách se čtvercovým, trojúhelníkovým a čtvercovým diagonálním uspořádáním otvorů při jednoosém a dvojosém takovém zatížení v rovině desky. Úloha byla řešena experimentálně metodou fotoelasticimetrie.

Měření bylo provedeno po etapách, nejprve byl zjišťován pro potřeby konstrukce tlakové nádoby reaktoru A 1 koeficient koncentrace napětí ve čtvercové mříži otvorů. Experiment je popsán ve zprávě /1/. Po delší přestávce v důsledku změny koncepce jaderné energetiky bylo měřeno na trojúhelníkové mříži a poté na čtvercové diagonální mříži. Obě měření jsou popsána ve zprávách /2;3/.

2.0 Popis experimentů

Rozměry modelu se čtvercovou mříží otvorů uvedené na obr.1 byly zvoleny podle rozměrů perforace centrální části kulového víka jaderného reaktoru tak, aby poslední zkoumaný průměr otvoru byl vyroben v měřítku 1:7,5. Ve stejném měřítku byla zvolena i rozteč otvorů. Otvory byly vrtány postupně od průměru $a=9,3$ mm na $a=16$ mm a $a=22,7$ mm. Na obvodě desky byly vyvrtány otvory pro přiložení tahových sil ve směrech os x a y . V okolí otvorů byla deska zesílena z obou stran nalepenými destičkami o tloušťce 2 mm.

Na obr. 2 jsou uvedeny rozměry modelu s trojúhelníkovou mříží otvorů. V desce byl nejprve vyvrtán jediný otvor ϕ 8 mm pak celá mříž s průměry otvorů ϕ 8 mm, které byly postupně zvětšovány na ϕ 12, 16, 20, 24, 28 a 32 mm. Na základě zkušeností s měřeními na čtvercové mříži byla provedena změna zatěžovacího systému včetně konců modelu. Jak je z obr. patrné byl rozměr desky zvětšen z 350 x 350 mm na 440 x 440 mm a okraje modelu byly proříznuty do hloubky 40 mm, aby se zatížení přenášelo do desky prostřednictvím jednotlivých tahových pásek. U otvorů pro čepy byla deska zesílena z obou stran nalepenými destičkami o tl. 2 mm.

Model s diagonální mříží otvorů byl stejně veliký jako u trojúhelníkové mříže, pouze uspořádání otvorů bylo podle diagonály jak je patrné z obr. 3. Průměry otvorů, rozteče i postup vrtání byly shodné s případem trojúhelníkové mříže.

Na výrobu modelů byla použita epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 110 vytvrzovaná směsí enhydridů kyselin maleinové a ftalové podle technologie vyvinuté v laboratoři. Po vyžhání a mechanickém opracování modely nevykazovaly téměř žádný okrajový efekt. Ten vznikl teprve při převrtávání otvorů. Opakovaným žháním byl však i tento nežádoucí jev při měření odstraněn.

Mechanické opracování modelů vyžadovalo velkou pečlivost především při vrtání otvorů. První vyvrtání mříže bylo provedeno na souřadnicové vrtačce s tolerancí rozteče $\pm 0,02$ mm. Do průměru 24 mm byly otvory vrtány ^{vrtákem} na ocel. Otvory ϕ 28 a ϕ 32 mm byly vyvrtány nožovou hlavou. V některých případech bylo pou-

žito výstružníků. Zvláštní pozornost byla věnována řezným rychlostem a dokonalému chlazení.

4.0 Zatěžovací zařízení a zatěžování modelů

Nejobtížnější částí celého experimentu bylo zajištění rovnoměrného zatížení desky po celé její šířce. První návrh zatěžovacího systému (obr.4) byl použit při zatěžování desky se čtvercovou sítí otvorů. V tomto případě bylo napětí po šířce neodvrtané desky vyjádřené řádem izochromat rozděleno podle obr. 5. Je patrné, že uprostřed desky v šířce cca 100 mm je řád izochromat přibližně konstantní a směrem k okrajům nastává rychlý pokles. Protože se provádí měření jen u čtyř středních otvorů byl tento průběh vyhovující ne však ideální. Pro další experimenty byla provedena úprava zatěžovacího systému spočívající ve zvýšení počtu aktivních závaží a především v úpravě modelu v oblasti zatěžovacích kladek. Prořiznutím modelu mezi kladkami byla oddělena působíště sil a tím odstraněno tlakové napětí na obvodě desky (obr.5).

V první etapě měření bylo ocejchováno zatěžovací zařízení. Byl zjišťován řád izochromat podél os x a y při zatížení jednoosým tahem ve směrech os y a x a při dvojosém tahu. Při tomto měření byl zjištěn nominální řád izochromaty m_{nom} potřebný pro výpočet koeficientu koncentrace napětí. Přesnost měření byla ověřována měřením na jediném centrálním otvoru, kde byly zjištěné hodnoty porovnávány s teoretickým řešením. Při měření na otvorech mříže byly sledovány jen otvory uprostřed desky (obr. 1+3). Na obrysech těchto otvorů byl měřen řád izochromat v bodech 1 (průsečík obrysu otvoru s osou x) a v bodech 2 (průsečík obrysu otvoru s osou y). Mimoto byla zjištěna místa s maximálním řádem izochromat mimo těchto os (body 1' a 2'). Z výsledků měření na všech otvorech byla pro dané místo určena střední hodnota řádu izochromat m_x a tato byla použita pro výpočet koeficientu koncentrace napětí.

5.0 Výsledky měření

5.1 Cejchování zatěžovacího zařízení

Výsledky cejchování na neodvrtané desce pro čtvercovou mříž jsou na obr. 6. Je patrné, že uvedeným systémem nelze dosáhnout rovnoměrného zatížení po celé šířce desky. Podobně cejchování při dvojosém tahu ukázalo, že rovnoměrné pole napětísnulovým řádem izochromaty vzniká pouze uprostřed desky na ploše cca 100 x 100 mm. Proměřované otvory leží samozřejmě vždy v této oblasti.

Další podrobné ověřování a cejchování upraveného zatěžovacího zařízení bylo provedeno na desce pro trojúhelníkovou mříž otvorů. Výsledky jsou uvedeny na obr. 7. V porovnání s původním zařízením je zatížení desky mnohem rovnoměrnější jak při jednoosém, tak i při dvojosém tahovém zatížení. Stejně výsledky byly získány při cejchování desky s diagonální mříží otvorů.

5.2 Ověření přesnosti měření

Na jednotlivých modelech se toto ověření provedlo na jediném otvoru vyvrtaném uprostřed desky (kromě modelu pro čtvercovou mříž, kde byly vyvrtány čtyři neovlivněné otvory). Výsledky jsou na tab. 1.

Zatížení	Místo	Měření	Teorie	Chyba
jednostr. tah	1	2,9+3,1	3	$\pm 3,5 \%$
	2	-0,94+0,89	-1	-6+2 %
všestran. tah	1	195+2,05	2	+2,5 %
	2			

Tab. 1.

5.3 Deska se čtvercovou sítí otvorů

Měření se provádělo pro poměry $\frac{a}{c} = 0,289; 0,462$ a $0,656$ při zatížení jednoosým a dvouosým tahem. Výsledky měření při jednoosém tahovém zatížení jsou na obr. 8. V diagramu jsou rovněž uvedeny výsledky Nisidova a Shirotova /4/ fotoel. měření a teoretická řešení Grigoljuka a Filštinského /5/, Baileye a Hickse /6/ a Dvořáka /78/. Průběh koeficientu koncentrace napětí v tahové oblasti je shodný s experimentálními hodnotami Nisidy a Shirotu. Teoretické údaje Grigoljuka a Filštinského i Baileye s Hicksem jsou nižší. Hodnoty vypočtené Dvořákem mají klesající charakter s rostoucím $\frac{a}{c}$. V oblasti tlakového napětí jsou zjištěné koeficienty koncentrace napětí vyšší než u experimentu Nisidy a Shirotu, jejichž hodnoty se shodují s teoretickými hodnotami Dvořáka. Ostatní autoři potřebné údaje neuvádějí.

Změřený průběh součinitele koncentrace napětí při dvojosém tahu je na obr. 9. Výsledky teor. řešení Baileye a Hickse a Grigoljuka s Filštinským jsou cca o 7 % nižší prakticky v celém rozsahu proměřovaných hodnot. Příklady izochromat proměřovaných centrálních otvorů s $\frac{a}{c}=0,656$ uvedené konfigurace jsou na obr. 10 a 11.

5.4 Deska s trojúhelníkovou sítí otvorů

Pro určení závislosti koeficientu koncentrace napětí bylo měřeno při poměrech $\frac{a}{c} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$ a $0,8$. Zjištěný průběh při zatížení jednoosým tahem je uveden na obr. 12. V tahové oblasti (body 1) se koeficient koncentrace napětí mírně zvyšuje do velikosti $\frac{a}{c} \approx 0,5$. Od této hodnoty nastává prudký růst a zároveň se maximum napětí přesouvá do bodů 1. Podrobný průběh je i v tlakové oblasti (body 2), zde však maximum zůstává v bodě 2 v celém sledovaném rozsahu $\frac{a}{c}$. Hodnoty koef. koncent. nap. jsou na tlakové straně nižší než na tahové až do velikosti $\frac{a}{c}=0,65$. Od této hodnoty nastává jeho prudký růst a převyšuje hodnoty k_{kn} na straně tahové.

V diagramu jsou uvedeny i výsledky Nisidova a Shirotova měření a teoretické hodnoty Grigoljuka s Filštinským. Teore-

tické hodnoty se shodují s experimentem až do $a/c = 0,6$. Pro vyšší hodnoty jsou teor. hodnoty k_{kn} nižší než údaje měření a navíc výpočet neuvádí přesun maxim do bodů 1. Mezi experimentálními údaji podle Nisidy a Shiroy a provedeným měřením je v celém měřném rozsahu značný rozdíl, který nelze vysvětlit na základě údajů uvedených v jejich práci. Křivka podle Nisidy a Shiroy má plošší průběh a při $\frac{a}{c} = 0,8$ se oba experimentální údaje prakticky shodují.

Naměřené hodnoty pro dvojsoý tah jsou na obr. 13. Jako při jednoosém tahu, tak i zde se maximum napětí od $a = 0,5$ přesouvá z bodů 1 do 1'. Uvedené experimentální hodnoty c podle Nisidy a Shiroy i teoretický výpočet Grigoljuka a Filštinského se značně liší od provedeného experimentu. Izochromaty proměřovaných centrálních otvorů s $\frac{a}{c} = 0,7$ při jednoosém tahovém zatížení jsou na obr. 14 a při dvojsoém tahu na obr. 15.

5.5 Deska s diagonální mříží otvorů

Výsledek měření závislosti koef. konc. napětí na poměru $\frac{a}{c}$ při zatížení jednoosým tahem je na obr. 16. Zjištěný k_{kn} roste s rostoucím $\frac{a}{c}$ zpočátku pomalu a od $\frac{a}{c} \sim 0,6$ velmi rychle. Od této hodnoty nastává také přesun maxim z bodů 1 do 1'. V porovnání s experimentálními údaji Nisidy a Shiroy jsou naměřené hodnoty nižší do $\frac{a}{c} = 0,7$. Dále je tomu naopak. Podobně přesun maxim je u Nisidova a Shirotova experimentu pozorován již při $\frac{a}{c} = 0,5$. V tlakové oblasti je průběh koeficientu koncentrace napětí podobný.

Pro dvojsoý tah je experimentálně zjištěná závislost $k_{kn} - \frac{a}{c}$ uvedena na obr. 17. Oproti údajům Nisidy a Shiroy i Baileye a Hickse jsou experimentální údaje v celém zkoumaném rozsahu cca o 18 % nižší.

Pro jednoosý tah a mříž o rozměrech $\frac{a}{c} = 0,7$ jsou izochromaty na obr. 18 a pro dvojsoý tah na obr. 19.

5.0 Porovnání mříží otvorů

Na základě provedených experimentů je možné vzájemně porovnat jednotlivá uspořádání otvorů a najít nejvýhodnější typ z hlediska maximálních napětí.

Při zatížení jednoosým tahem se nejvyšší koncentrace napětí vyskytují na diagonální mříži, jak je patrné z obr. 20. Naopak u čtvercové mříže jsou špičky napětí nejnižší. Trojúhelníková mříž se v oblasti kladných hodnot chová podobně jako čtvercová až do $\frac{a}{c} \sim 0,6$. Dále jsou koncentrace napětí u trojúhelníkové mříže vyšší než u čtvercové, v žádném případě však nedosahují hodnot diagonální mříže. Výrazně vyšší koncentrace napětí vznikají u trojúhelníkové mříže v tlakové oblasti, kde se k_{θ} přibližuje hodnotám diagonální mříže.

Porovnání výsledků měření při zatížení dvojosým tahem je na obr. 21. Nejnižší koncentrace napětí byly zjištěny u otvorů v trojúhelníkové mříži. U čtvercové a diagonální mříže se výsledky navzájem shodují a koeficienty koncentrace napětí jsou vyšší než u trojúhelníkové mříže.

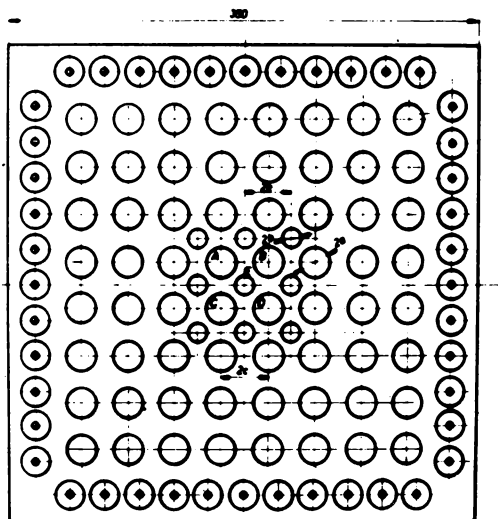
Literatura

- /1/ J. Vísner : Koncentrace napětí v rovinné desce oslabené mříží kruhových otvorů
Výzkumná zpráva n.p. Škoda - ZVJE č. Ae 814/Dok. Plzeň 1965
- /2/ J. Vísner : Koncentrace napětí v desce oslabené trojúhelníkovou mříží kruhových otvorů.
Výzkumná zpráva n.p. Škoda ZVJE č. Ae 3506/Dok. Plzeň 1975
- /3/ J. Vísner : Koncentrace napětí v desce oslabené diagonální mříží kruhových otvorů.
Výzkumná zpráva n.p. Škoda ZVJE č. Ae 3204/Dok. Plzeň 1976
- /4/ M. Nisida, I. Shirota : Stress Concentration in a Plate due to Uniformly Spaced Circular Holes
Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research Vol. 59; No 3 September 1965 Tokyo
- /5/ E.J. Grigoljuk; L.A. Filštinskij : Perforirovannyje plasty i obložki
Izd. Nauka Moskva 1970
- /6/ R. Bailey, R. Hicks : Behaviour of perforated plates under plane stress
J. Mech. Engng. Sci 1960 vol. 2, No 2.
- /7/ J. Dvořák : Napětí v desce oslabené čtvercovou mříží kruhových otvorů
Aplikace matematiky 1963; 8; No 3
- /8/ J. Dvořák Koncentrace napětí v tažené desce oslabené polemí kruhových otvorů
Výzkumná zpráva SVÚTT č. SVÚTT-61-01019 Praha 1961

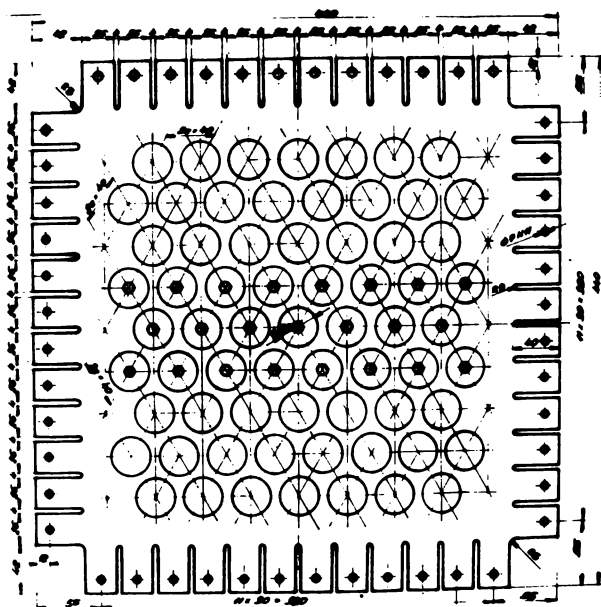
Seznam vyobrazení

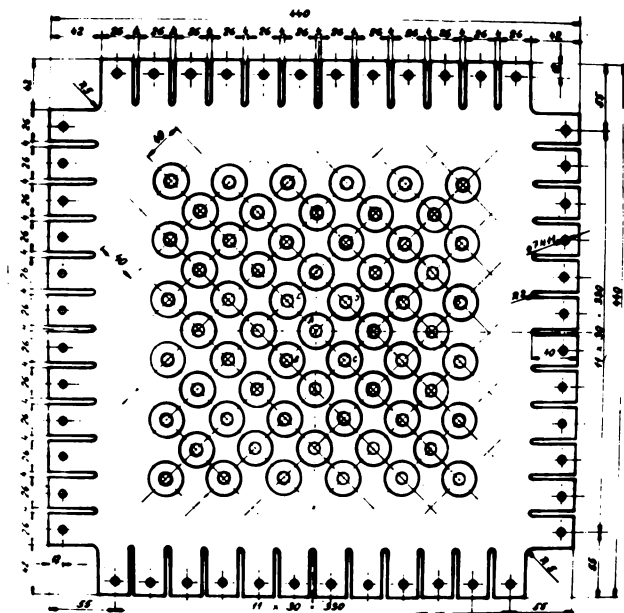
- Obr. 1 Rozměry modelu se čtvercovou mříží otvorů
Obr. 2 Rozměry modelu s trojúhelníkovou mříží otvorů
Obr. 3 Rozměry modelu s diagonální mříží otvorů
Obr. 4 Původní zatěžovací zařízení
Obr. 5 Upravené zatěžovací zařízení
Obr. 6 Průběh izochromat po šířce desky v původním zatěžovacím zařízení
Obr. 7 Průběh izochromat podél vodorovné osy desky při jednoosém zatížení - upravené zatěžovací zařízení.
Obr. 9 Koeficient koncentrace napětí u čtvercové mříže otvorů. Zatížení jednoosým tahem.
Obr. 9 Koeficient koncentrace napětí u čtvercové mříže otvorů. Zatížení dvojosým tahem.
Obr.10 Izochromaty v desce se čtvercovou sítí otvorů $\frac{a}{c}=0,656$; zatížení jednoosým tahem
Obr.11 Izochromaty v desce se čtvercovou sítí otvorů $\frac{a}{c}=0,656$, zatížení dvojosým tahem
Obr.12 Koeficient koncentrace napětí u trojúhelníkové mříže otvorů; zatížení jednoosým tahem
Obr.13 Koeficient koncentrace napětí u trojúhelníkové mříže otvorů. Zatížení dvojosým tahem.
Obr.14 Izochromaty v desce s trojúhelníkovou mříží otvorů $\frac{a}{c}=0,7$; zatížení jednoosým tahem
Obr.15 Izochromaty v desce s trojúhelníkovou mříží otvorů, $\frac{a}{c}=0,7$; zatížení dvojosým tahem
Obr.16 Koeficient koncentrace napětí v diagonální mříži otvorů. Zatížení jednoosým tahem.
Obr.17 Koeficient koncentrace napětí v diagonální mříži otvorů. Zatížení dvojosým tahem.
Obr.18 Izochromaty v desce s diagonální mříží otvorů; $\frac{a}{c}=0,7$; zatížení jednoosým tahem
Obr.19 Izochromaty v desce s diagonální mříží otvorů; $\frac{a}{c}=0,7$; zatížení dvojosým tahem
Obr.20 Průběh koef. koncent. napětí u různých typů mříží. Zatížení jednoosým tahem.

Obr. 21 Průběh koef. koncentř. napětí u různých typů mříží.
Zatížení dvojosým tahem.

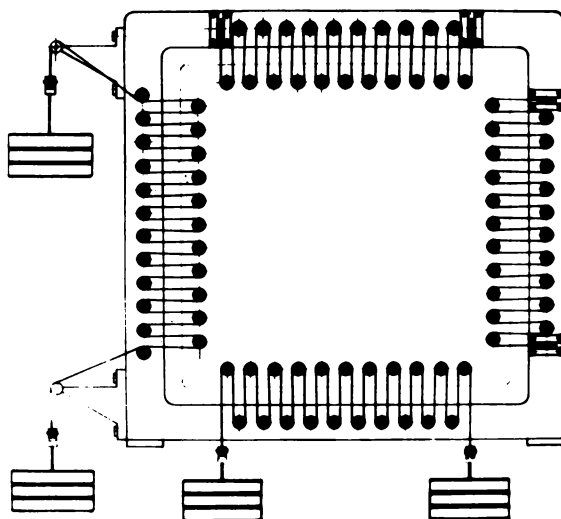


Обр. 1

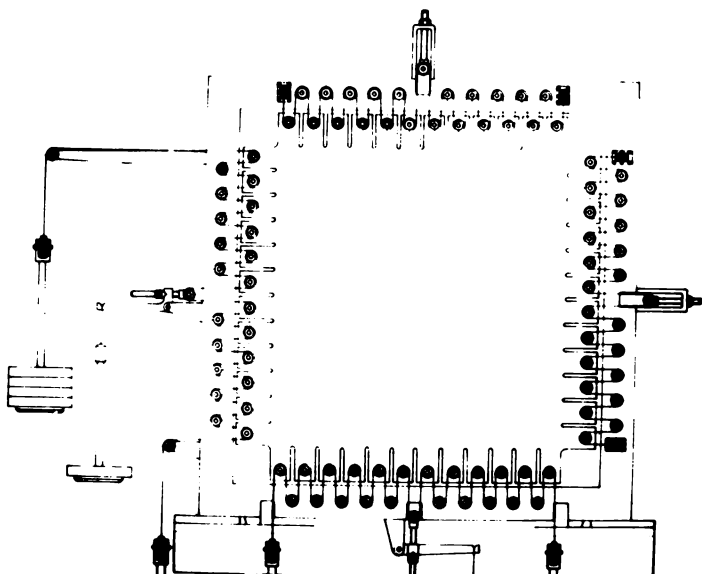




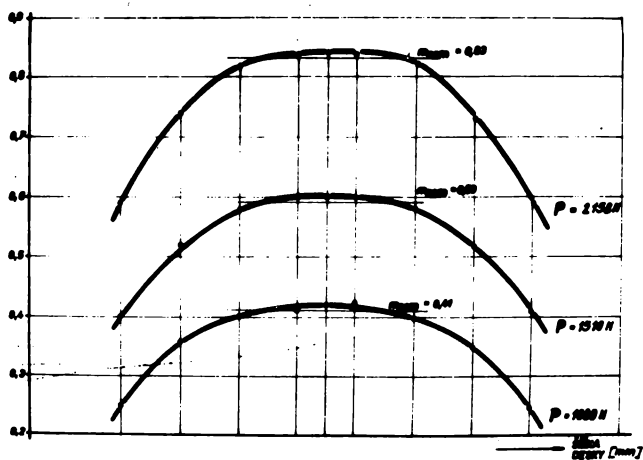
Обр. 3



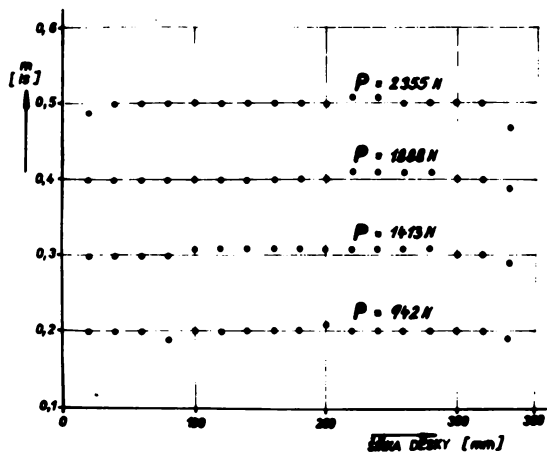
Обр. 4



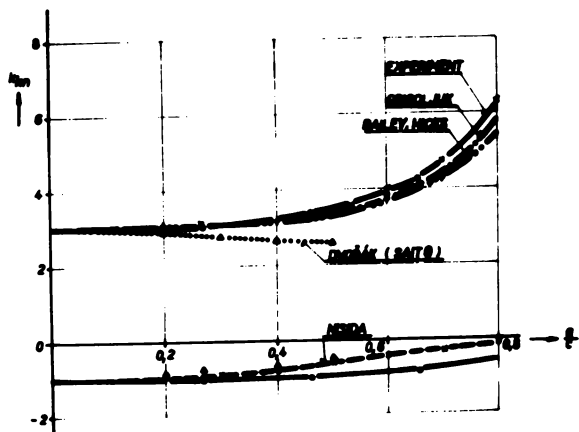
Obr. 5



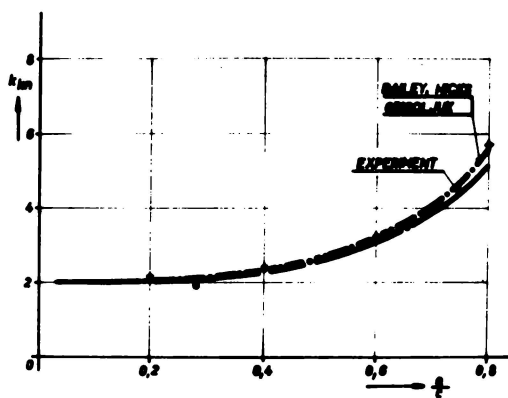
Obr. 6



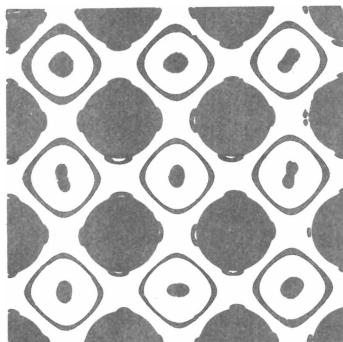
Obr. 7



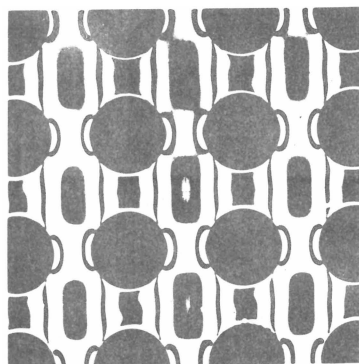
Obr. 8



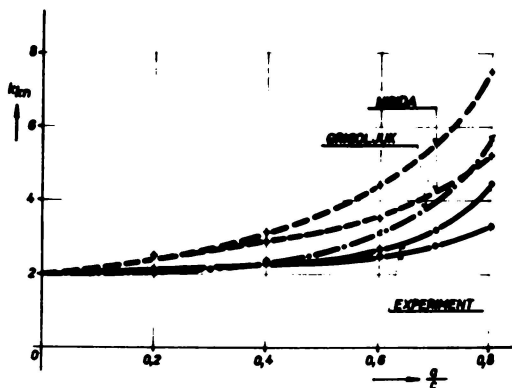
Obr. 9



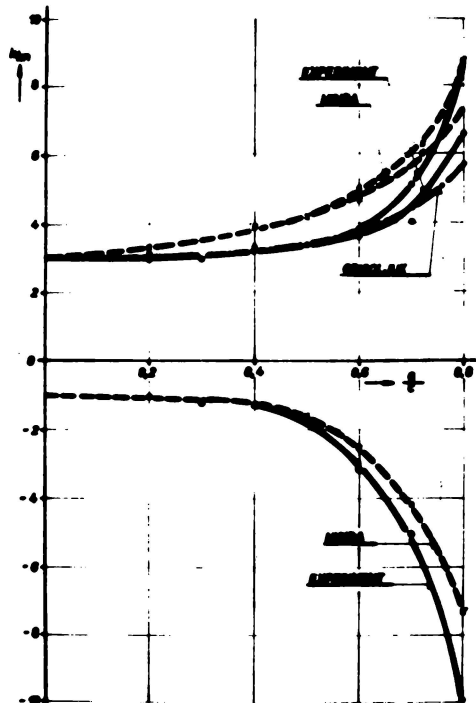
Obr. 10



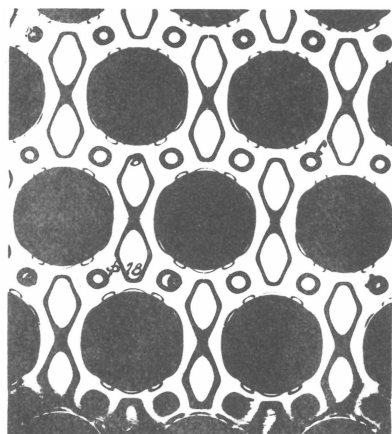
Obr. 11



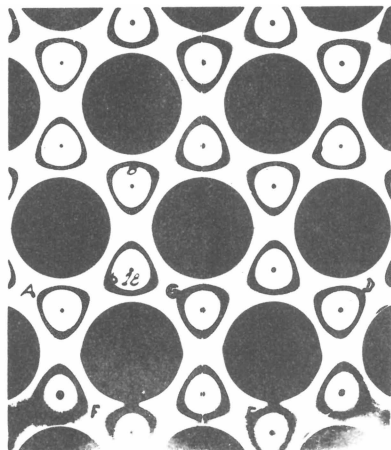
Obr. 13



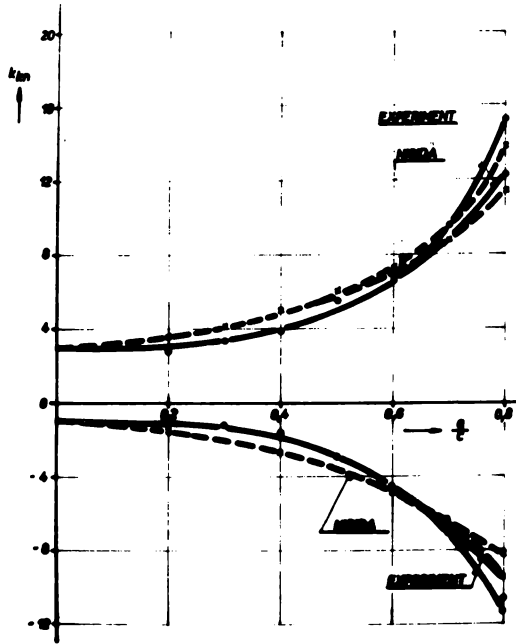
Obr. 12



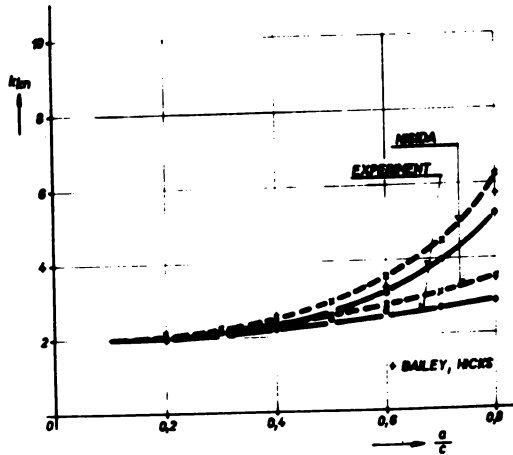
Obr. 14



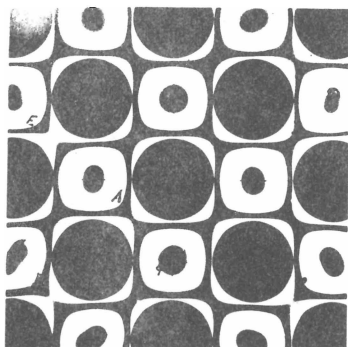
Obr. 15



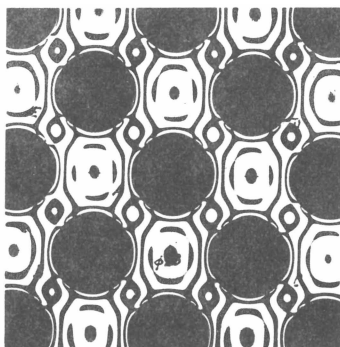
Obr. 16



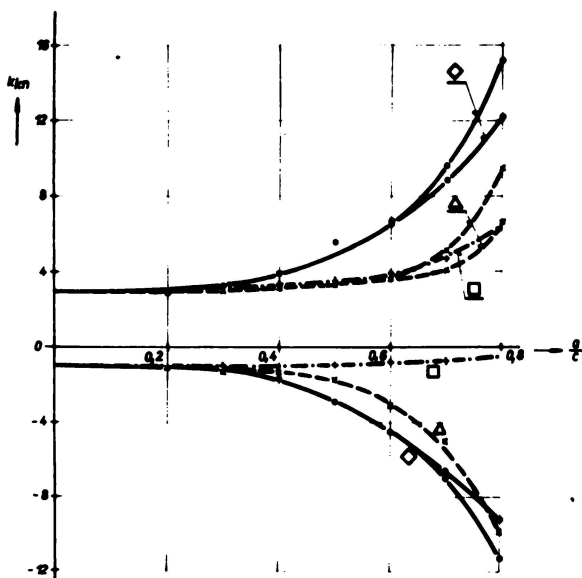
Obr. 17



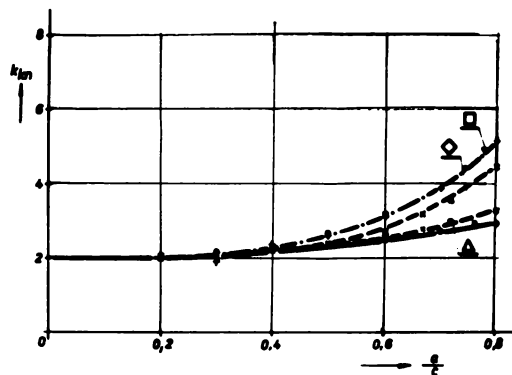
Обр. 18



Обр. 19



Обр. 20



Обр. 21