

MECHANICAL DEGRADATION OF ALUMINIUM ALLOYS

Dostál P., Černý M.

Department of Engineering and Automobile Transport, Faculty of Agronomy, Mendel University of Agriculture and Forestry in Brno, Zemedelska 1, 613 00 Brno, Czech Republic

E-mail: pet.d@seznam.cz

ABSTRACT

The article is focused on mechanical degradation of Aluminium alloys. The main objective of the article is the research of fatigue properties of these alloys loaded on high-cyclic mechanism - elektro-resonance pulsator Rumul Cracktronic. The test pieces of aluminium alloys were subjected by fourpoints bend.

There are solved the problems of fatigue process and mechanism of crack dispersion. Also the origin and the speed of dispersion of fatigue crack is discussed. The particular stages of fatigue process such as cyclic hardening, nucleation of fatigue cracks, dispersion of fatigue cracks and fracture of remaining base section are observed. Also the fatigue limit of concrete material is detected.

Key words: aluminium, aluminium alloys, degradation, mechanical loading, fatigue loading, fatigue crack, cyclic loading, crack nucleation, crack dispersion.

1 ÚVOD

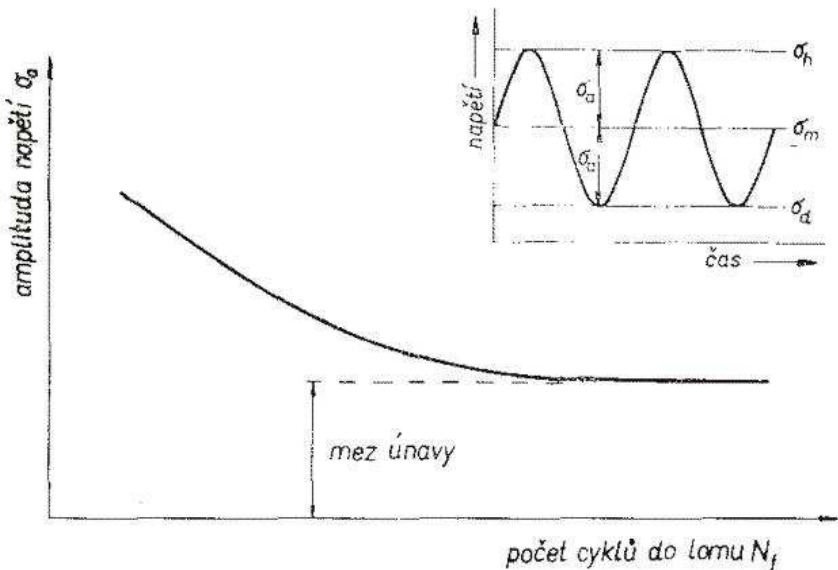
Práce se zabývá výzkumem mechanické degradace hliníkových slitin za působení únavového namáhání. Únava kovů je termín, který se na první pohled nehodí do přísné technické terminologie. Existuje však jistá analogie mezi únava v běžném slova smyslu a mezi únava kovů. Podrobíme-li strojní součást nebo konstrukci působení časově proměnlivých vnějších sil, dochází po určité době k jejímu lomu, který je výsledkem mikroskopických procesů probíhajících ve struktuře materiálu. Přitom velikost těchto vnějších sil může být tak malá, že její statické působení snáší kov bez známek porušení. Postupné rozrušování kovu při proměnlivém zatěžování má nevratný, kumulativní charakter, který se až v samotném závěru procesu hmatatelně projeví růstem makroskopické trhliny a lomem.

1.1 Historie

Historicky je první výskyt únavových lomů spojen s vývojem konstrukcí, které obsahovaly součásti podrobené cyklickému působení vnějších sil. Mezi ně patřily osy železničních vagonů, součásti parních strojů atd. Jako odezva na tyto provozní lomy vznikla snaha laboratorně stanovit mechanické charakteristiky, které by sloužily pro výpočet cyklicky zatěžovaných součástí.

První systematické experimenty prováděl August Wöhler v letech 1852 - 1870. Dodnes je jednou ze základních únavových charakteristik Wöhlerova křivka, která udává závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu. Amplituda napětí, při které nedochází k lomu ani po vysokém počtu cyklů (řádově 10^7), se nazývá mez únavy.

Obr. 1 Wöhlerova křivka, tzv. S-N křivka [1]



V počátcích druhé poloviny století se prosadila myšlenka, že bez poznání zákonitostí a podstaty probíhajících procesů není možný žádný další výrazný pokrok v oblasti optimálního využití stávajících materiálů a návrhu nových materiálů pro součásti pracující v podmínkách únavového zatěžování. Přispěl k tomu i vývoj moderní techniky, kladoucí na konstrukci stále se zvyšující nároky.

2 METODIKA

2.1 Cyklická plastická deformace

Existence únavy kovů je podmíněna cyklickou plastickou deformací. Například amplituda cyklické plastické deformace na mezi únavy je bez ohledu na typ materiálu řádu 10^{-5} . Jednosměrná, neopakovaná deformace tohoto řádu nevede k žádným závažnějším změnám ve struktuře materiálu, ani v jeho vlastnostech. Teprve mnohonásobné opakování plastické deformace, byť tak malé, že z hlediska běžného pojetí jde o zatěžování elastické (elasto-plastické), vede ke kumulativnímu poškozování, končícímu únavovým lomenem.

Elastická deformace nevede k nevratným změnám materiálu. Plastická deformace naopak k nevratným změnám ve struktuře a ve vlastnostech materiálu vede. V této souvislosti je možné rozdělit únavu na vysokocyklovou (počet cyklů do lomu řádu 10^5 a výše) a na únavu nízkocyklovou (počet cyklů do lomu řádu 10^4 a méně).

2.2 Degradanční fáze

Na základě typů nevratných změn, způsobených cyklickou plastickou deformací, lze celý únavový proces rozdělit na tři časově následující stádia:

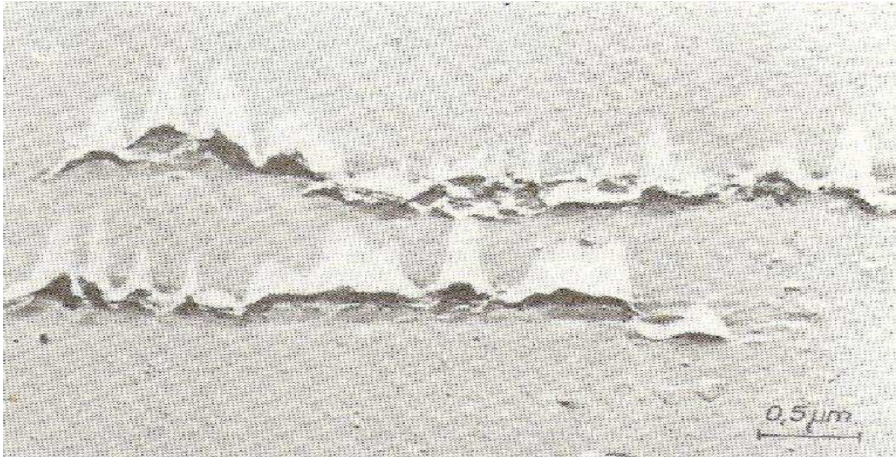
2.2.1 Stádium změn mechanických vlastností

Při cyklickém zatěžování kovů a slitin dochází v důsledku změn v mikrostruktuře materiálu ke změnám jejich mechanických, elektrických, magnetických a jiných fyzikálních vlastností. Celá řada experimentálních prací ukázala, že všechny tyto změny mají zpravidla sytící charakter – nejvýraznější jsou na počátku cyklického zatěžování, s rostoucím počtem cyklů jejich intenzita klesá a po poměrně malém počtu cyklů (ve srovnání s celkovou životností) změny měřené veličiny ustanou zcela nebo jsou jen nevýrazné. Toto stádium je determinováno změnami v celém objemu zatěžovaného kovu. Mění se hustota a konfigurace mřížkových poruch a následkem toho i mechanické vlastnosti.

2.2.2 Stádium nukleace trhlin

Mikroskopické trhliny vznikají při cyklickém zatěžování v únavových skluzových pásmech, která se tvoří účinkem cyklické deformace v povrchové vrstvě kovu. Odlišují se výrazně od skluzových pásem vznikajících při jednosměrné deformaci nejen svým povrchovým reliéfem, ale zejména proto, že se při odleštění slabé povrchové vrstvy a po naleptání znovu objevují. Představují objemy kovové matrice odlišnou strukturou, která se projevuje jinou rezistencí proti chemickému působení. Proto dostala tato skluzová pásma název „perzistentní“. Perzistentní skluzová pásma leží podél aktivních skluzových rovin, v nichž působí dostatečně vysoká složka smykového napětí.

Obr. 2 První únavové mikrotrhliny v perzistentním skluzovém pásmu



Únavový proces je velmi citlivý na stav povrchu. Únavová životnost je výrazně ovlivnitelná povrchovým zpracováním. Důvodem k této citlivosti je fakt, že nukleace únavových trhlin probíhá vždy na volném povrchu cyklicky zatěžovaných kovů, a to v místech koncentrace cyklické plastické deformace.

Toto stádium se tedy týká již jen malé části z celkového objemu, a to povrchových vrstev. Společným jmenovatelem všech typů nukleace v povrchových vrstvách je koncentrace cyklické plastické deformace.

Přímé metody pozorování povrchu ukázaly, že jsou v podstatě tři typy nukleárních míst:

1. únavová skluzová pásma – nejčastěji se uplatňující typ
2. hranice zrn – v případě vysokoamplitudové únavy, zejména za zvýšených teplot
3. rozhraní mezi inkluzemi a matricí – v případě některých komerčních slitin a vícefázových materiálů, ve kterých se vyskytují tvrdé inkluze velikosti řádu alespoň mikronů

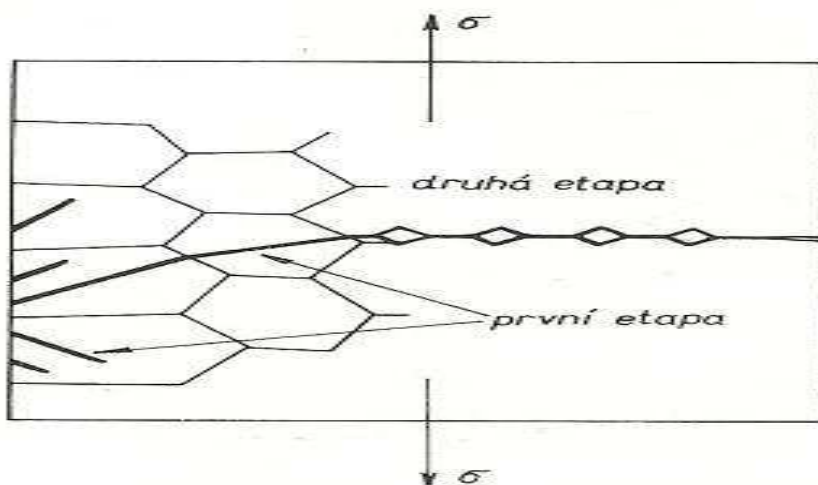
2.2.3 Stádium šíření trhlin

Nukleární stádium končí vytvořením povrchových mikrotrhlin. S narůstající délkou (měřeno směrem do hloubky) se trhliny vychylují z aktivních skluzových rovin a stáčejí se do směru kolmého k vektoru hlavního napětí a na jejich čele lze vhodnými technikami identifikovat plastickou zónu vznikající účinkem vysoké koncentrace napětí.

Tento přechod roviny trhliny z aktivní skluzové roviny do roviny kolmé na vnější napětí se často označuje jako přechod z krystalografického šíření trhliny do nekrystalografického šíření trhlin. V této etapě se šíří zpravidla již jen jediná trhlina někdy označovaná jako magistrální. Pro krystalografické šíření podél aktivních skluzových rovin se vžil termín prvá etapa šíření

a pro nekystalografické šíření kolmo na vektor hlavního napětí termín druhá etapa šíření únavové trhliny. Schematicky jsou obě etapy zakresleny na obr. 3.

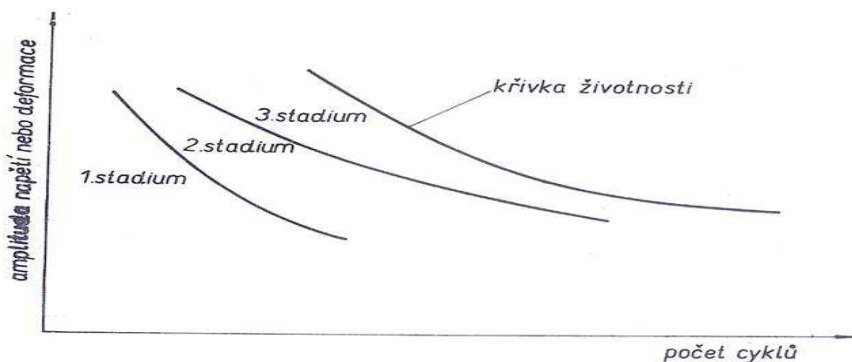
Obr. 3 Schéma etap šíření únavové trhliny



Schematicky je rozdělení únavového procesu na jednotlivá stádia znázorněno na obr. 4 v diagramu životnosti. Vlastní křivka životnosti (např. Wöhlerova křivka při zatěžování konstantními amplitudami napětí) sama o sobě reprezentuje konec třetího stádia.

Přesná definice rozhraní mezi stádii neexistuje. Je tedy jen věcí konvence, do jaké délky trhlin budeme hovořit o stádiu nukleace a od jaké délky o stádiu šíření. Délka a relativní význam jednotlivých stádií závisí na materiálu, geometrii součásti, typu zatěžování a prostředí.

Obr. 4 Stádia únavového procesu



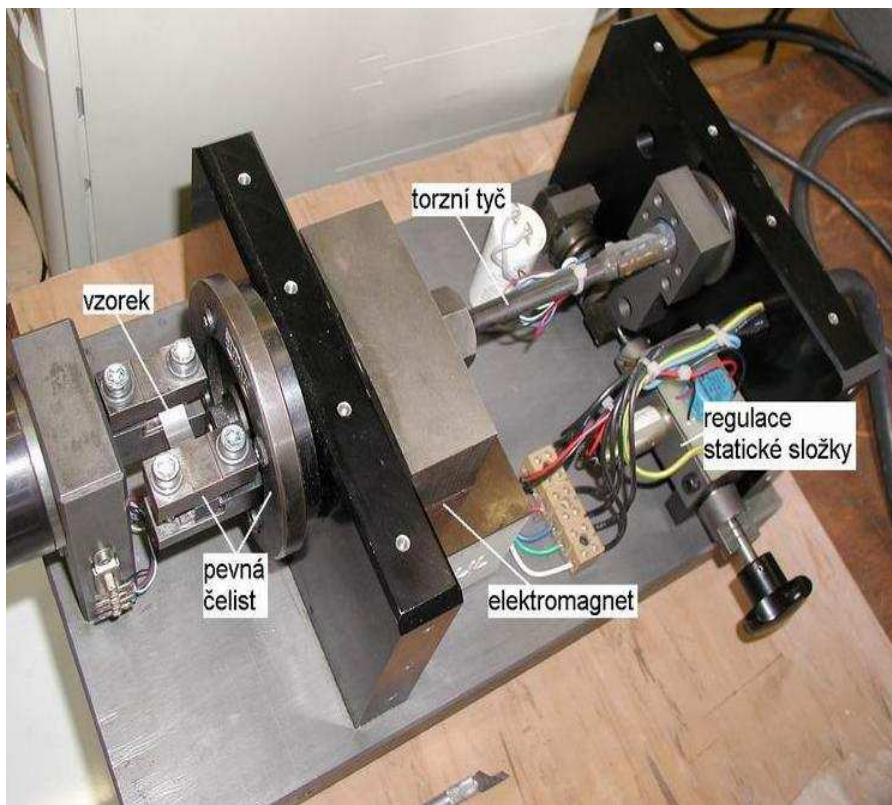
2.3 Experiment

2.3.1 Zkušební zařízení

V laboratoři vysokocyklové únavy VUT FSI v Brně, ÚK jsou k dispozici dva elektrozonační pulzátory. Prvním je pulzátor RUMUL Cracktronic 160. Jedná se o moderní, počítačem řízený stolní pulzátor, který pracuje v oblasti zatěžování plochým ohybem s frekvencí zatěžování v rozmezí 50 – 120 Hz. Součástí vybavení je software umožňující nejrůznější způsoby programového zatěžování vzorků. Maximální ohybové zatížení je 160 Nm.

Pulzátor RUMUL Cracktronic 70 starší pulzátor se stejným principem. Max. dosažené zatížení je 70 Nm. Obvyklé frekvence zatěžování se pohybují v rozmezí 120 – 150 Hz. Princip pulzátoru Rumul Cracktronic 160 je znázorněn na obrázku 5 a 6.

Obr. 5 Princip pulzátoru Rumul Cracktronic 160



Obr. 6 Detail upínací části pulzátoru Rumul Cracktronic 160



Rozhodující část života zatěžovaného materiálu se odehrává v oblasti kumulace poškození, iniciace a šíření krátkých trhlin. V oblasti zatěžování s vyšším počtem zatěžových cyklů je však velmi obtížné spolehlivě identifikovat a sledovat tyto procesy.

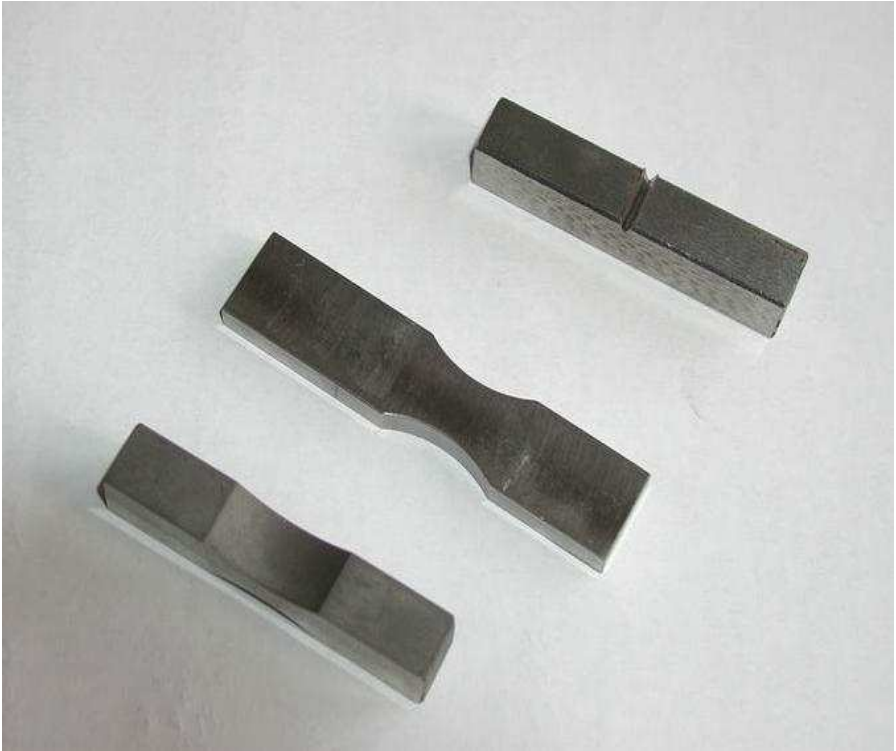
Pro sledování rozvoje únavového poškození je k dispozici řada metod, které mohou být založeny na principu hodnocení vizuálního, piezoelektrického, elektrostatického, elektromagnetického a mnoha dalších. Řada postupů umožňuje nedestruktivně stanovit základní mechanické vlastnosti a jejich změny v průběhu zatěžování, v některých případech je možno sledovat i šíření trhlin apod.

S rozvojem mikroelektroniky se ukazuje možnost aplikace moderních metod nedestruktivního zkoušení i pro testování těchto etap únavového poškození na slitinách hliníku. To však není předmětem této práce.

2.3.2 Parametry zkoušky:

Pro zkoušku vysokocyklického únavového namáhání používáme normované zkušební vzorky (viz. Obrázek 7). Vzorky jsou určeny pro elektrozonační zkušební stroje a mají délku 55 – 60 mm.

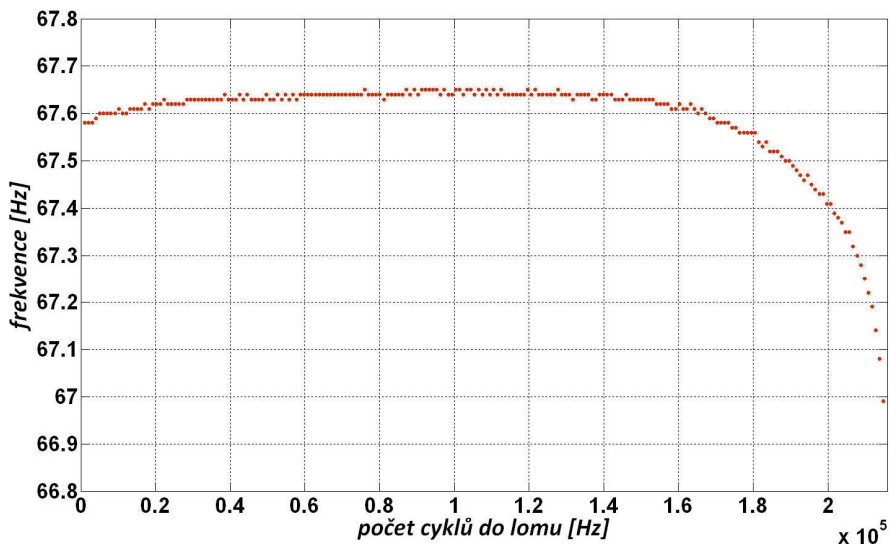
Obr. 7 Zkušební vzorky



- Na zkušebním zařízení se nastavuje amplituda zatěžování, kterou volíme maximálně 9,5 Nm, což odpovídá napětí 240 MPa.
- Počáteční frekvence zatěžování je určena automaticky strojem na základě tuhosti vzorku.
- Nastavuje se minimální možná změna frekvence pro ukončení zkoušky a automatické vypnutí zkušebního zařízení. Tato hodnota je pro slitiny hliníku cca 1,5 Hz. Při takto velké změně frekvence již ve vzorku nastává šíření únavové trhliny.
- Základní možností popisu únavového procesu je vytvoření tzv. S-N závislosti (příp. Wöhlerovy závislosti), která vyjadřuje závislost počtu cyklů do lomu na aplikovaném napětí.

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Graf 1. Závislost frekvence na počtu cyklů do lomu



V grafu 1 je znázorněna závislost frekvence na počtu cyklů do lomu u hliníkového vzorku. Na počátku zkoušky je vidět cyklické zpevnování, tedy první stádium únavového namáhání. Z grafu je rovněž patrné, že přibližně při $1,4 \times 10^5$ cyklů nastává nukleace trhliny, což je v místě, kde křivka grafu začíná klesat. Od této chvíle se trhlina šíří až do konečného lomu materiálu, který nastává přibližně při $2,1 \times 10^5$ cyklů.

V příloze je i protokol z měření tohoto zkušební vzorku. Pro vytvoření wöhlerových křivek je nutné, v rámci statistické přesnosti měření, provést zkoušku několika desítek vzorků a to při různých zatíženích.

4 ZÁVĚR

Poškození únavou je v praxi, navzdory veškerému dosavadnímu výzkumu a pokroku v poznání, stále častým důvodem mnohdy fatálních selhání mechanicky namáhaných konstrukcí. Intenzivní a velmi úspěšný rozvoj lomové mechaniky od sedmdesátých let minulého století a růst poznatků v posledních letech je nadějným příslibem, že konstruktéři budou mít k dispozici účinný nástroj, s jehož pomocí bude možné přesně a spolehlivě popsat a zejména predikovat jakékoli poškození únavovými trhlínami.

Přínos této práce lze spatřovat především v rozšíření poznatků o nukleaci a šíření únavových mikrotrhlin ve slitinách hliníku. Tyto poznatky lze dále aplikovat v řadě vědních oborů, kde využitím znalostí únavového procesu můžeme předcházet závažným nehodám.

LITERATURA

- [1] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P.: *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. ACADEMIA. Praha 1975. 222s. ISBN 509-21-857.
- [2] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P.: *Šíření únavových trhlin v oceli*. ACADEMIA. Praha 1973. 89s. ISBN 509-21-872.
- [3] KOUTSKÝ, J.: *Degradační procesy a predikce životnosti*. Západočeská univerzita. Plzeň 1995. 167s. ISBN 80-7082-177-9
- [4] BROOKS, CHARLIE, R.: *Failure analysis of engineering materials*. MC GRAW-HILL. New York 2002. 602s. ISBN 0-07-135758-0