

Törésmechanika és anyagvizsgálat: A XX. század elfelejtett úttörői – II. rész

Dr. H. P. Rossmanith*

A törésmechanika korai művelői

Az előző, 1999/4. számunkban ezen alcím alatt részletesen foglalkoztunk a törésmechanika első analitikus elméletét megalkotó és alkalmazó Karl Wiegardt munkásságával és kortársának Alfons Leon bemutatásával, aki a bemetszési feszültségek elméletében alkotott maradandót. Most folytatjuk a törésmechanika korai művelőinek a méltatását.

Paul Ludwik

Paul Ludwik (6. ábra) 1978. január 15-én Schlan-ban, Csehországban született a jelenlegi Cseh Köztársaság területén, egy nagy gépgyártó vállalat igazgatójának fiaként. Prágában végzett műszaki egyetemet, majd apja vállalatánál dolgozott két évig. Azután Bécsbe ment, ahol tervezőmérnökként dolgozott, majd doktori fokozatot szerzett a Bécsi Műszaki Egyetemen. Az 1905–1934 közötti időszakban különböző tanári állásokat foglalt el ugyanott, beleértve a Tetmajer által alapított vizsgálólaboratóriumok igazgatói pozícióját 1923 és 1934 között. Ludwik 68 tudományos közleményt publikált, ezek sok olyan ötletet tartalmaztak, amelyek a munkában azonnal alkalmazhatók voltak. Utolsó éveiben érdekelték az étellel és az emberi élet jelentésével kapcsolatos filozófiai kérdések is.



6. ábra. P. Ludwik (született: 1881. január 15., Schlan, (Csehország), Osztrák-Magyar Monarchia – meghalt: 1934. július 31., Bécs, Ausztria) a híres Ludwik-feltétel kifejlesztője, amelyik szívós acélokra összeköti a folyáshatárt és a rideg állapotra jellemző szakítószilárdságot.

Súlyos vesébántalmaktól szenvedve 1934. július 31-én Ludwik úgy határozott, hogy szén-gáz szándékos belégzésével véget vet életének. A halálos gáz belégzése közben Ludwik professzor aprólékosan feljegyezte benyomásait és érzéseit a könnyebb légzési problémáktól kezdődően a végső összeesés előtti olvashatatlanná írkálásig.

Paul Ludwik munkássága

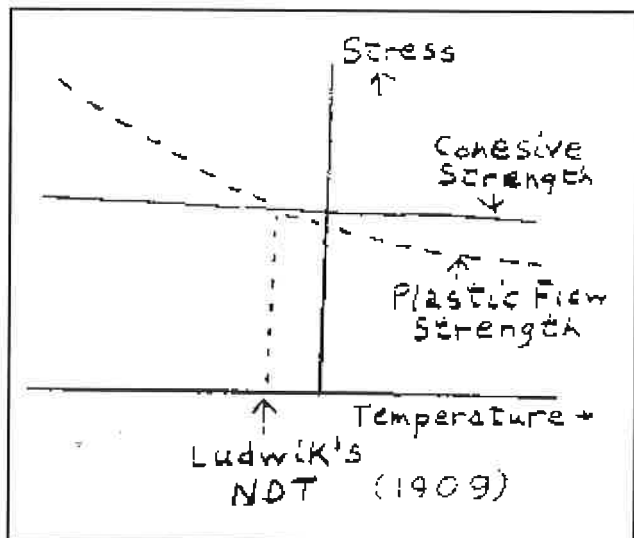
Ludwik úttörő volt az anyagvizsgálat és az anyagtudomány terén. Alapismereteket tartalmazó könyve, az *Elemente der technologischen Mechanik* (A műszaki mechanika elemei) a különböző terheléseknek, pl. húzásnak, nyomásnak, nyírásnak kitett fém anyagok maradékalakváltozásáról szól és – elsőként – tárgyalja az alakváltozás sebességének hatását az anyagok viselkedésére.

A Ludwik-féle hipotézis

Ludwik 1909-ben javasolt egy elméletet, mely segítette megmagyarázni a bemetszett rúd törési munkájának viszonylag hirtelen növekedését a vizsgálati hőmérséklet emelése esetén, pl. az átmeneti viselkedést.

Azt javasolta, hogy az acélnek van egy, a maradékalakváltozáshoz tartozó folyáshatára, amely a hőmérséklet növekedésével csökken és egy független kohéziós (törési) szilárdsága, amely közelítőleg független a hőmérséklettől. A vizsgálati hőmérséklet növelésekor addig a pontig, amíg a folyáshatár kisebb, mint a törési szilárdság, kiterjedt képlékeny alakváltozás lép fel a törést megelőzően, ugyanakkor eléggé alacsony hőmérsékleten a folyáshatár túllépi a törési szívósságot és rideg törés figyelhető meg. Ludwik elméletét vázolja a 7. ábra, melyet a szerző G. R. Irwin professzortól kapott, akit ma a *törésmechanika atyjának* tekintenek. Ludwik leegyszerűsített elmélete, bár viszonylag egyszerű és alkalmas a megfigyelt tulajdonságok kvalitatív magyarázatára, kegyvesztett lett, mert szerkezeti acélokban, a ridegségi foktól függetlenül legalább egy kismértékű képlékeny alakváltozás megfigyelhető volt a hasadásos repedés keletkezésekor és terjedésekor [Ludwik 1928].

A Ludwik-féle elmélet feszültségi és alakváltozási jellemzőket foglal magába, így a mérethas kifejezésére hasonlósági kritériumokat is magába foglalhat. Szerkezeti acélból készült bemetszett rudakon végzett kísérletek azonban nemsokára bebizonyították, hogy a hasonlósági argumentum helytelen volt. Az első kísérletekről, melyek a méret hatását mutatták a törés folyamán, a teddingtoni National Physical Laboratory-ban dolgozó Stanton és Batson számoltak be [1921]. Amikor a szerkezeti acél rudakból készült bemetszett hajlítópórbatestek ütővizsgálatát végezték, azt találták, hogy az egységnyi térfogatra vonatkoztatott törési munka jelentősen csökkent, ha a pórbatestek méreteit növelték.



7. ábra. G.R. Irwin által készített vázlat, mely a Ludwik-feltételt ábrázolja (G. R. Irwin Törésmechanika Előadás jegyzetéből származik, Marylandi Egyetem, 1978.)

Valójában a rideg–szívós átmenet hőmérsékletét növelni lehetett a pórbatestek méretének növelésével, a törési munka pedig csökkent a rúd méretek arányos növelésével. E felfedezésből levonható következtetéseket a bemetszett rúd vizsgálatának általános alkalmazhatóságára és a szokásos mérési szabályokon alapuló szerkezeti szilárdság becslésekre vonatkozólag figyelmen kívül hagyták a publikált Stanton-Batson közleményben. A további elemzések egyértelműen rámutattak arra, hogy a törési energia két részből áll: a teljes rúd meghajlításához szükséges energiából, amely arányos lenne a vizsgált darab térfogatával, és

* Vienna University of Technology, Institute of Mechanics

a repedés folyamatos terjesztésére fordított munkából annak megindulása után. Ez utóbbi második hányad közel arányos lehet a szétvált területtel és felelős a megfigyelt mérethetással.

P. Ludwik munkájának megvolt a keleti változata Davidenkov és iskolájának munkájában [1947]. A nagyméretű törések megléte az 1930-as években ismét szembeszökővé vált, amikor Docherty bemetszett rudak statikus hajlítóvizsgálatát végezte, melyek célja az volt, hogy a Stanton és Batson által végzett vizsgálatok dinamikai bizonytalanságait kiküszöbölje.

Régi-új ötletek

A szívósság fogalma az anyagok töréséhez kapcsolódik, minél szívósabb az anyag, annál nehezebb eltörni. Az eredeti definíció szerint a szívósság mértéke az a munka, ami egy rúd eltöréséhez szükséges (Tetmajer-hipotézis). Az ASTM 1975-ben úgy definiálta a szívósság fogalmát, mint a fém azon képességét, hogy eltörése előtt mennyi energiát képes elnyelni és képlekenyen alakváltozni. A szívósság mértékéért rendszerint a bemetszett rudak ütővizsgálatok mérte energiaelnyelődést tekintik és ez megfelel a szakítóvizsgálatok kapott feszültség-alakváltozás görbe alatti területtel. Következésképpen ridegen viselkedő anyag az, amely kevés energiát nyel el, míg szívósan viselkedő anyagoknál a törési folyamathoz nagy energiárafordítás szükséges.

Az első világháború után a mérnökökben újult érdeklődés ébredt a bemetszések iránt az Atlanti-óceán mindkét partján [Orowan 1945, 1955], mivel nagyon hamar felismerték, hogy a törést és a kifáradást a bemetszések igen nagymértékben befolyásolják. Hallgatólagosan elmondható, hogy a törés maga nem más mint egy történet a bemetszésekről, hornyokról, reteszhornyokról, olajozó lyukakról, csavarmentekről, karcolásokról, durva felületekről, a fémekben lévő zárványokról, korróziós gödröcskékről, és olyanokról, mint pl. néhány helyi csíra, amelyből a károsodás kiindul. A tény, hogy csupán az anyag, a szerkezet egy apró helyét kell a kritikus határ fölé terhelni ahhoz, hogy azután a teljes szerkezet károsodjon az e pontból kiinduló repedésnek köszönhetően. Éppen ezért a bemetszések környezetének viselkedése megérdemli a fokozott figyelmet.

Abban az időben jól ismert volt, hogy a tervezésnél használt biztonsági tényezők számottevően a törés bekövetkezésének becslésétől függtek, azonban mégsem történtek kísérletek arra abban az irányban, hogy a bemetszést természetes repedéssel helyettesítsék és mérjék az acélok érzékenységét a repedésszerű hibák jelenlétére vonatkozólag. Valójában abban az időben, az 1940-es években még mindig nem ismerték fel kellően, hogy a repedések és a repedésszerű hibák meghatározók voltak a nagy szilárdságú acélból készült szerkezetek teherbírására. A bemetszésekről szóló korai munkákat ritkán bírálták, mert a bemetszések nem voltak elég élesek (Leon munkája félkör alakú bemetszésekről szól). Ha repedéseket hasonlítottak össze, inkább úgy gondolták, hogy túl élesek voltak ahhoz, hogy olyan gyakorlati nagy feszültség-koncentrációjú helyzetet képviseljenek, mint amilyen működés közben fellép.

Neuber munkája, különösen a feszültséganalízisről írott könyve, serkentette az érdeklődést a tervezési részletek javítására [Neuber 1937]. Ráadásul 1950 előtt nem volt szokásos, hogy a törések okozta károsodásokról szóló jelentésekben a gyártás során előidézett repedéseket tegyék felelőssé a károsodásért. Minden előírás azt állította, hogy a gyártásból származó repedéseket nem lehet elfogadni, és ellenállásba ütközött annak elismerése, hogy olyan tökéletes szerkezetet gyártani, amely nem tartalmaz repedésszerű hibát, erősen valószínűtlen.

Ha a kezdeti repedés méretét elhanyagolták, ritkán volt lehetőség annak meghatározására, hogy a károsodás okát miként kell megosztani a feszültség-szint, szívósság és a kezdeti repedés hossza között, melyek a Griffith- és az Irwin-féle analízisben szerepelnek.

Ingliš munkája a feszültségkoncentrációról

Ingliš professzor nagy érdemének azt tartják, hogy 1913-ban pub-

likálta az első, alaptételeket tartalmazó közleményt a terhelésnek kitett elliptikus felnyílásokról, amelyekből a repedés speciális esete származtatható. Ingliš kifejtett és közzétett egy függvényelméleti megoldást a külső húzással terhelt lemezben egy tetszőleges helyen lévő elliptikus felnyílás körül létrejövő feszültségmező leírására. A bevezetésben Ingliš megmagyarázza, hogy ennek a tanulmánynak a célja az volt, hogy elősegítse a repedés terjedésének megértését, különösen terhelés-változáskor.

Az eredmények határesetben arra használhatók, hogy a repedést elnyúlt elliptikus lyukként modellezzék, amelyre a pontos két-dimenziós feszültségmező származtatható. Valójában Ingliš rámutat arra, hogy amikor az ellipszis alak repedésszerűvé válik, akkor a főtengeley csúcsához közeli területeken nagymértékű képlekeny alakváltozás lesz tapasztalható, még kismértékű terhelésváltozás esetén is. Repedésszerű hibát tartalmazó, kevésbé szívós anyagról Ingliš a következőket írja:

„...a lemezre ható, a repedésen átmenő kismértékű húzás a repedésvégeken olyan húzóerőt idéz elő, amely elegendő ahhoz, hogy feltépődést, szakadást indítson meg az anyagban. A feltépődésnek köszönhető hossznövekedés még tovább növeli a feszültséget és a repedésterjedés a repedésre jellemző módon folytatódik.”

Az Ingliš-közlemény további része az eredményeinek azon felhasználásával foglalkozott, amely elősegíti egy lemezben lévő bemetszés körüli feszültség-növekedés becslését. Ingliš rámutat arra, hogy bármely keskeny, jól meghatározható fő-sugárral rendelkező horonyban a csúcs környékén ugyanolyan feszültségek fognak ébredni, mint elliptikus alak esetén.

Az ellipszis csúcsa körül kialakuló feszültségekből kiindulva, Ingliš kidolgozott egyenleteket más alakú üregeknek – négyzet és csillag alakú lyukaknak – és felületi bemetszéseknek tulajdonítható feszültségkoncentráció számítására. Olyan egyszerű kifejezéseket adott meg a bemetszés csúcsában ébredő maximális feszültség számítására, amelyek még mindig jól használhatók. Megmutatja, hogy a maximális feszültség összefüggése mindig a következő alakú:

$$\sigma_{\max} = R \left[1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right]$$

ahol a a megfelelő bemetszés hosszának a fele, ρ a bemetszés sugara.

A kifáradásra vonatkozóan Ingliš által megadott leírás elég modern, de közleményére rendszerint csak a bemetszések körüli feszültség-növekedés tekintetében hivatkoznak, melynek széles körű a gyakorlati felhasználása – pl. Peterson feszültséggyűjtésről szóló könyvében [1940] – és alapjául szolgált Neuber bemetszési feszültségek elemzéséről szóló könyvének is [1937].

A törésmechanika Griffith-féle megközelítése

1913-at követően Anglia belépett a háborúba és a repülőgépeket először kezdték használni a harcászokban. Az Ingliš közleményében megadott egyenleteket arra használták, hogy bizonyos szempontból ellenőrizzék a tapasztalati eredményeket. A felületi feszültségek megértése és hasonlósága az Ingliš-féle dolgozattal rendkívül hasznosnak bizonyult a híres, 1920-as közleményének a megírásában.

Alan Arnold Griffith 1893. június 13-án született Londonban, mérnöki tanulmányainak végeztével a főiskolai oklevelet 1914-ben, az egyetemet 1917-ben, a doktorit pedig 1921-ben kapta meg a Liverpooli Egyetemen. Farnborough-ban 1915-ben belépett a Királyi Repülőgépgyárba. Aktív és zseniális feltaláló volt, és nagymértékben hozzájárult a repülőgéphajtások tudományához.

Griffith 1920-ban publikált egy közleményt az üvegek törési szilárdságáról, amely elévülhetetlen jelentőséggel és értékkel bírt. A közlemény lényegében Griffith PhD-dolgozata volt, melyet G. I. Taylor irányításával készített a Cambridge-i Egyetem Mérnöki Karán. Griffith feltételezte, hogy a nátronüveg-cső és az üveggömb felülete sok repedésszerű folytonossági hibát tartalmazott és hogy a rideg anyagokban – pl. az üvegben – a repedés csúcsának sugara lényegében nullával egyenlő. Feltételezte, hogy húzóterheléskor a repedésterjedés és a

törés akkor lép fel, ha repedésterjedés egységnyi növekedésére jutó energiaveszteség nagyobb lesz, mint az új felületek létrehozására felhasznált felületi energia növekedése. A repedésterjedéssel járó fajlagos energiaveszteség megadásához Inglis összefüggéseit használták föl nulla sugarú repedéstő alkalmazásával. Az energiaveszteség sebességének számolása nem volt egyszerű feladat, de szinte hiba nélkül sikerült. A közlemény leírja Griffith alátámasztó tapasztalatait, és részletesen bemutatja a tömör üveg felületi energiájának mérését.

A tapasztalati eredményeknek az energiaveszteséggel való összehasonlításához Griffith-nek csupán a külső húzóerőre volt szüksége, amely megindítja a törést egy adott kisméretű repedést tartalmazó üvegben. Ehhez Griffith előreperesztett vékony falú gömböket és hengereket használt, melyeket növekvő belső nyomásnak tett ki. Az ilyen módon kapott törési feszültség értékek becslésül szolgáltak a fajlagos energiaveszteség számítására, amely a felületi energia kétszerese, hisz a törés kapcsán két új felület jön létre. Az eredmény 20%-os fajlagos energiaveszteség volt, a teljes egyetértéshez túl alacsony érték, de izgalmas megerősítése egy új elképzelésnek.

Griffith feljegyezte, hogy a frissen húzott üvegben a repedésszerű hibák mérete jelentéktelen kell legyen, és ennek alátámasztására vizsgálatokat is végzett. Griffith 1920-as közleményét olyan maradandó értéket jelentő ötletek jellemezték, mint a melegalakítás használata a folytonossági hiányok irányítottágának a gyakorlatban várt húzási irányval megegyező irányba való fordítása.

Griffith 1920-as közleményét G. I. Taylor bírálta és azt megelőzően fogadták el közlésre, hogy felfedezték volna egy figyelmetlenségből eredő hibát Griffith azon egyenletében, mely a repedésre merőleges húzóerő és a fajlagos energiaveszteség közötti kapcsolatra vonatkozott. A javított számítás azt mutatta, hogy a fajlagos energiaveszteség a felületi energia kétszeresének a háromszorososa. A közleményben egy rövid lábjegyzet azt állította, hogy a szöveg javítása nem szükséges, mivel csak a nagyságrendben való egyezés a fontos. Valójában a belső nyomásnak kitett vékony falú edényekben a fajlagos energiaveszteség pontos mérése nem volt lehetséges a repedésfalak kihalasodása miatt. Az előreperesztéssel szomszédos üvegbúra peremek kihajlásának és a nedvesség által segített lassú stabil repedésterjedésnek a hatását nem vették figyelembe. Alacsony nedvességtartalom mellett, ugyanolyan üvegből készült síklemez vizsgálata azt mutatta, hogy a fajlagos energiaveszteség a felületi energia értékének kétszeresének a tizenháromszorososa.

A Griffith-féle közleményből a legtöbbet használt összefüggés a törési feszültség és a repedésméret között teremt kapcsolatot:

$$\sigma_f \sqrt{\pi a} = \sqrt{2\gamma E}$$

ahol σ_f a törési feszültség, E a Young modulus.

A felületi energia, 2γ (később G_c) az egységnyi repedésterjedéshez (da) tartozó fajlagos energiacsökkenés, ahol a az alkalmazott húzóerőre merőleges központi repedés hosszának a fele nagyméretű lemez esetén. Ennek az összefüggésnek a származtatásához Griffith Inglisnek azt az egyenletét használta föl, amely nagyméretű lemezben lévő elliptikus résre vonatkozott. Nagyméretű lemezben lévő egyenes repedésre ezeket az egyenleteket át kellett dolgozni, és ki kellett számolni a fajlagos energiaveszteséget a repedésméret egységnyi növekedése esetén, fix határfelületeket feltételezve. Ez nehéz feladat az akkor rendelkezésre álló eszközökkel.

Mikor 1920 után az alacsony feszültségen bekövetkező kis sebességű stabil repedésképződést megfigyelték agresszív környezeti hatásnak kitett szilárd anyagban, a látott viselkedést a felületi energia környezeti hatás miatti csökkenésével magyarázták. Azonban a Griffith-közlemény leghasznosabb eredménye a törési feszültségnek az a repedésméret négyzetgyökének reciprokával történő arányba állítása, amely még napjainkban is fontos a törés okozta károsodások elemzésében és elősegíti a véleményalkotást a törések vizsgálatánál.

Griffith feljegyezte, hogy az elmélet csak üveg és más rideg anyagok esetén alkalmazható, kizárva a legtöbb szerkezeti fémeket. Az állított elméleti számítások és a gyakorlati eredmények közötti egyezés ma úgy tűnik, véletlen volt.

A törési vizsgálatok színvonalra 1960 előtt nem tette lehetővé a 1920-as Griffith-közlemény világos megértését. Eredményként általában elfogadták, hogy Griffith közeli kapcsolatot mutatott ki az üveg szilárd állapotbeli felületi energiája és törési szilárdsága között. A későbbi kutatások során, amikor a környezet (pl. nedvességtartalom) hatását is vizsgálták a kerámiák törési szilárdságára, gyakran hivatkoztak Griffith dolgozatára. A síküveg lemezek törésére megállapított – a törési feszültség és a hibaméret négyzetgyökének reciproka között lévő – arányosságot gyakran felhasználták, hogy segítse a síküveg lemezek törési károsodásainak elemzését.

Ily módon az érdeklődés Griffith 1920-as közleménye iránt megmaradt egészen a második világháború utánig, amikor Irwin és Orowan bemutatták a "módosított Griffith-féle" elképzelésüket. Ezzel ellentétben a megjelenést követő években a tanulmányát övező tekintélyes érdeklődés magára Griffithre nem volt túlzottan nagy hatással, és mindössze egyetlen cikket publikált a törésmélethez kapcsolódóan, 1924-ben az delft-i első IUTAM konferencián. Azonban ez nem foglalkozik a fajlagos energiaveszteséggel és nem mutatott jelentősebb érdeklődést az energiagegysüllyra vonatkozó elgondolás iránt sem.

Smekal és a Griffith-féle megközelítés

Griffith úttörőnek számító munkáját A. Smekal, a bécsi egyetem fizikaprofesszora vitatja 1922-ben megjelent cikkében. Smekal azt állítja, hogy a fajlagos energiának a törésre jellemző mennyiségként való használatát már Griffith előtt javasolták, többek között E. Lohr a Brnoi Műszaki Egyetemről még az első világháború előtt, illetve a folyadékok tekintetében az megtalálható Boltzman munkájában is. Azonban Smekal határozottan elismeri Griffith azon érdemét, hogy felismerte ennek az elgondolásnak a jelentőségét és megalkotta azt, amit ma Griffith-féle törésmélethez neveznek. Az ezt követő fejtegetésben Smekal az anyag molekuláris szilárdsága és a szakítóvizsgálatokból származtatott feszültség közötti különbséggel foglalkozik. Eredményül egy 100-as szorzót kapott.

Karl Wolf, fizikus a mechanikában

Karl Wolf (8. ábra) 1886. november 13-án született Bielitz-ben az Habsburg Birodalom Ausztria-Silesia nevű tartományában, mely most a Cseh Köztársaság része. Egy klasszikus nyelvekkel foglalkozó filológus fia volt és nagyon büszke volt a hegyvidéki farmer származására.



8. ábra. K. Wolf (született: 1886. január 13., Bielitz, Osztrák-Magyar Monarchia – meghalt: 1949. január 10., Bécs, Ausztria), aki Griffith-tel levelezett és az ő 1920-as cikkét korrigálta.

A bécsi egyetemre 1905-ben jutott be, ott matematikát és fizikát tanult. Wolf tanára és ideálja Fritz Hasenöhr volt, az 1906-ban meghalt L. Boltzman örököse. Wolf 1910. november 18-án kapta meg a doktori

címet a bécsi egyetemen az elméleti fizika területén végzett munkájáért, melynek témája az elektromágneses hullámok vezető üreges hengerben való terjedése volt. Wolf akadémiai életének fordulópontja akkor következett, amikor elfogadott egy segédprofesszori állást az Elméleti Mechanika és Grafosztatikai Intézetben J. Finger vezetése alatt és röviddel azután K. Wieghardt munkatársa lett, aki korábban a Göttingeni Egyetem növendéke volt és a rugalmasságtan szakértője.

A rugalmasságtan Wolf kedvenc kutatási területévé vált és korábbi egyetemi tanulmányai a matematika és elméleti fizika területén határozott előnynek bizonyultak a bonyolult problémák megoldásában. Közleményével [Wolf 1914], amely egy íves völgyzáró gátra megadott biharmonikus egyenletek polinomokkal történő integrálásáról szól, 1915-ben kiérdemelt egy segédprofesszori állást a Bécsi Műszaki Egyetemen.

Az első világháború után K. Wieghardt kijelölt utóda volt, aki elfogadott egy meghívást Drezdába. *Eredmények a rugalmasságtanban* címmel a *Zeitschrift für technische Physik*-ben megjelent közleménysorozat rámutatott az egytengelyű feszültségállapotnak kitett, a terheléssel tetszőleges szöveget bezáró síkú elliptikus lyuk vagy repedés körül kialakuló feszültségeloszlás fontos problémájára [Wolf 1921, 1922a]. Ezt a közleményt jól fogadták és az eredményeket gyorsan beépítették a rugalmasságtannal foglalkozó szakkönyvekbe. Wolfot egyre jobban kezdték érdekelni a törési problémák, és miután elolvasta Griffith alapműnek számító eredményeit, írt egy cikket „Griffith törési elméletéről” [Wolf 1921], amelyet 1922. szeptember 19-én mutatott be a természettudósok találkozóján Lipcsében. Ebben a dolgozatban rámutat egy hiányosságra az alapegyenlet Griffith-féle származtatásában és egy sokkal egyszerűbb lehetőséget ajánl ennek a formulának az előállítására. Wolf félreérthetetlenül megemlíti, hogy Griffith érdeme a törés energián alapuló megközelítésének megadása és kapcsolatba lépett magával Griffith-tel is. Wolf Griffith elméletét kiterjesztette hajlítás esetére is, és kiegészítette a húzó- és nyíróterhelés kombinálásával, ez az első ún. mixed-mode törési kritérium volt.

Wolf tehát rámutatott a hibára Griffith 1920-as dolgozatában és valószínűleg kapcsolatban állt vagy Griffith-tel magával vagy a kiadóval. Griffith 1924-ben bemutatott egy új tanulmányt *A törés elmélete* címmel az Első Nemzetközi Mechanikai Konferencián Delft-ben, amelyben kijavította az alakváltozási energia téves számítását. Azonban a kiadvány szerkesztője volt az, aki egy megjegyzést tett Griffith eredményéhez, jelezve hogy Griffith törésméleteinek német (!) bírálatát K. Wolf, a Bécsi Egyetem professzora adta.

B. Cotterell, a G. R. Irwin 90. születésnapjára megjelenő kiadvány [G. R. Irwin Anniversary Volume, Rossmann 1997] egyik cikkén dolgozva felfedte, hogy Wolf ugyanazt a hibát követte el, mint Griffith – csak ő más módszert alkalmazott az alakváltozási energia számítására. Azonban Wolf állítja, hogy az ő és a Griffith eredménye a fajlagos energiavesztés csökkentésére vonatkozólag egy kettes szorzóban különbözik, és vitatja hogy Griffith esetében ez előnyös lenne az elméleti és gyakorlati egyezés tekintetében.

Utolsó éveiben Wolfot a barlangokban létrejövő légáramlás kezdte érdekelni, mivel lelkes hegymászó és síelő volt.

Konklúzió

Ez az összefoglaló közlemény megvilágítja a mechanika és az anyagvizsgálat fejlődését a századforduló környékén Európában, különösen a német ajkú államokban. Különös hangsúlyt kapott az első törésmechanikáról szóló tanulmány, melyet K. Wieghardt írt. Wieghardt kinevezése a mechanika professzorává a Bécsi Műszaki Egyetemen, intenzív kutatómunkát indított meg a kör alakú, elliptikus, repedésszerű felnyílások és folytonossági hibák körül kialakuló feszültségeloszlások és bemetszések hatásának területén.

Wieghardt úttörőnek számító és Leon hatékony munkája előre megjósolta a törésmechanika sok olyan eredményét, melyet évtize-

dekkel később vezettek le, pl. az ék alakú felnyílások csúcspontján kialakuló feszültségeloszlás, törési kritérium összetett terhelési módra, az összetett terhelés hatására kialakuló repedés-megindulás iránya [Westergaard 1939; Williams 1952, 1957; Muskhelishvili 1953].

Megvilágítottuk Ludwik munkájának jelentőségét az anyagok ridegsége és folyáshatára közötti kapcsolat megértésében, valamint Griffith munkájának hatását K. Wolf és A. Smekal munkásságára.

Az, hogy ezen eredmények nagy része németországi folyóiratokban került publikálásra, és ezért viszonylag kevésbé ismert Németországon, az Osztrák-Magyar Monarchián, illetve a német nyelvterületeken kívül, részben felelőssé tehető azért, hogy feledésbe merültek.

A megújult érdeklődés a tudomány történelmi fejlődése iránt és egy tárgyilagosabb nézőpont talán fel fogja fedni ezen feledésbe merült úttörők neveit és méltányolni fogja munkásságukat.

Irodalomjegyzék

- AVTU Archive of the Vienna University of Technology (1903) Document dated September 18.
- AVTU Archive of the Vienna University of Technology (1909) Document dated February 1.
- AVTU Archive of the Vienna University of Technology (1949a) Document dated March 2.
- AVTU Archive of the Vienna University of Technology (1949b) Document dated May 7.
- Bach, C. (1902) Eine Stelle an manchen Maschinenteilen, deren Beanspruchung auf Grund der üblichen Berechnung stark unterschätzt wird (On a particular location in machine parts where on the basis of conventional theories the stresses will be highly underestimated) Mitteilungen über Forschungen, VDI, Issue 4.
- Bach, C. (1905) Elastizität und Festigkeit (Elasticity and Strength) Julius Springer Verlag, Berlin.
- Basch, A. (1951) Obituary to K. Wolf, Verlag der Technischen Hochschule Wien.
- Cotterell, B. (1996) Private communication by letter dated Nov. 7.
- Davidenkov, N.N., Shevandin, E. and Wiltmann, F. (1947) Influence of size on the brittle strength of steels. Amer. Soc. Mech. Eng. 69:A63.
- Docherty, J. G. (1932) Bending tests on geometrically similar notched bar specimens. Engineering. 133: 645-647.
- Docherty, J. G. (1935) Slow bending tests on large notched bars. Engineering. 139: 211-213.
- Galilei, G. (1638) Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Sopra due Nuove Scienze (ed. Elsevini, Leiden).
- Girkmann, K. (1951) Alfons Leon zum Gedenken (In memoriam Alfons Leon) Festschrift der TU Wien.
- Griffith, A. A. and Taylor, G. I. (1917) The use of soap films in solving torsion problems. Proc. Inst. Mech. Eng.: 755-809.
- Griffith, A. A. (1920) The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A, 221: 163-198.
- Griffith, A. A. (1924) The theory of rupture. Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics, Delft, 55-63.
- Hahn, G. (1985) Elastizitätstheorie (Theory of Elasticity), Teubner-Verlag, Stuttgart.
- Inglis, C. E. (1913) Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Proc. Inst. Naval Arch. 55: 219-241.
- Irwin, G. R. (1948) Fracture dynamics. Fracturing of Metals: 147-166. Cleveland, OH:ASM
- Irwin, G. R., Wells, A. A. (1965) A continuous mechanics view of crack propagation. Metallurgical Rev. 10(38):223-270.
- Leon, A. V. (1907) Über Formen gleicher Bruchgefahr mit besonderer Berücksichtigung rotierender Scheiben (On the shapes of equal fracture danger with special regard of rotating disks) Österr. Ing.-u. Architekten-Verein No 18 and 19.
- Leon, A. V. (1908a) Über die Störungen der Spannungsverteilung die in elastischen Körpern durch Bohrungen und Bläschen entstehen (On the disturbances in the stress distribution in elastic bodies due to boreholes and cavities). Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 14:163-168
- Leon, A. V. (1908b) Über die Spannungsstörungen durch Kerben und Tellen und über die Spannungsverteilung in Verbundkörpern (On the stress disturbances due to notches and dents and on the stress distribution in composite bodies) Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 14: 770-776 and 783-787.
- Leon, A. V. (1909a) Über die Spannungsstörungen beim Verbund verschiedener Materialien (On the stress disturbances in dissimilar composites) Mitteilungen des

- internationalen Verbandes für die Materialprüfung der Technik, Vth Congress, Kopenhagen, Paper No VIII-10, pp 377-382.
- Leon, A. V. (1909b) Über die Spannungsverteilung in Verbund-körpern (On the stress distribution in composite media) Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 15: 189-24 and 32-38.
- Leon, A. V. (1909c) Zur Theorie der Verbundkörper (On the theory of composites) Zeitschrift Armiertes Beton, 9:343-351 and 10: 408-416.
- Leon, A. V. and P. Ludwik (1909a) Verleichenende statische und dynamische Kerbbiegeproben (Comparison between static and dynamic notch bent specimens) Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 15(7): 1-12.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1910) Über die Zerstörungen in tunnelartig gelochten Gesteinen - Teil I (On damage in rock mass weakened by a tunnel - Part I.) Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 16 : 641-648.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1912) Über die Zerstörungen in tunnelartig gelochten Gesteinen - Teil II (On damage in rock mass weakened by a tunnel - Part II.) Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 18: 281-285.
- Leon, A. V. (1912b) Die Entwicklung und die Bestrebungen der Materialprüfung (On the development and the tendencies of materials testing) Verlag des Österr. Verbandes für die Materialprüfungen der Technik, Wien, 1-78.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1913a) Über den Einfluß der Achsenentfernung auf die Zerstörungerscheinungen in einem Doppeltunnel (On the effect of the distance of the tunnel axes on damage formation in a twin tunnel) Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 19:18-21.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1913b) Zur Frage über die durch einen Doppeltunnel bewirkten Spannungsstörungen im Gebirge und deren Beeinflussung durch die Achsenentfernung (On the stress disturbances caused by a twin tunnel in a rock mass and the effect of the distance of the tunnel axes) Rundschau für Technik und Wirtschaft, Prag, 6:1-3.
- Leon, A. V. and P. Fillunger (1913c) Physikalisch-technische Prüfung von Glaszylindern (Physical-technical testing of glass cylinders) Mitteilungen des Technischen Versuchsamtes Wien, 2(3):38-46 and 2(4):29-49.
- Leon, A. V. and H. Linder (1913d) Die Festigkeit von Steinzeug-röhren auf Innendruck (On the strength of internally pressurized ceramic tubes) Zeitschrift des Österr. Ing.-u. Architekten-Vereins 65:504.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1914a) Über die Spannungsverteilung im gelochten und gekerbten Zugstab (On the stress distribution in a punched and notched tension bar) Mitteilungen des Technischen Versuchsamtes Wien, 3(1):33-50 and 3(2): 37-52.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1914b) Über die durch eine Reihe von kreisförmigen Löchern in einem elastisch festen Körper auftretenden Spannungs- und Verzerrungsstörungen (On the stress and strain disturbances in an elastic solid caused by a row of circular holes) Zeitschrift des Österr. Ing.-u. Architekten - Verein 66:424-428.
- Leon, A. V. and F. Willheim (1914c) Die Verteilung des Gebirgs-druckes und dessen Störungen durch den Bau tiefliegender Tunnel (The distribution of the overburden pressure and its disturbances due to the construction of deep level tunnels) Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen, Hannover 1914:191-199.
- Leon, A.V. and F. Willheim (1915) Über die Spannungsstörungen die in elastischen Körpern durch Höhlungen, Inhomogenitäten und eingeschlossenen Flüssigkeiten bewirkt werden (On stress disturbances in elastic bodies caused by cavities, inhomogeneities and fluid inclusions) Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen, Hannover 1915:45-62.
- Leon, A. V. (1933) Über das Maß der Anstrengung bei Beton (On the extent of strength of concrete) Ingenieur-Archiv. 4:421-431.
- Leon, A. V. (1934) Über die Verbindung von Trenn- und Schub-bruch (On the combination of tensile and shear fractures) Proc. 4th International Congress on Applied Mechanics, Cambridge.
- Leonardo da Vinci, L. (date unknown) Codice Atlantico, folio 82 recto-b.
- Love, A. E. H. (1926) A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. NY: Dover Publications.
- Ludwik, P. (1909) Elemente der Technologischen Mechanik. Berlin: Springer-Verlag.
- Ludwik, P. (1928) Bruchgefahr und Materialprüfung (Fracture danger and materials testing) Schweiz. Verband für die Materialprüfungen der Technik, Report No 13. Zurich, November.
- Mariotte, E. (1686) Traite de Mouvement des Eaux. Paris.
- Mohr, O. (1906) Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? (What conditions imply the limits of elasticity and fracture of a material?). Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- Muskhelishvili, N. I. (1953) Some Basic Problems in the Theory of Elasticity. Noordhoff, Ltd., Netherlands.
- Nadai, (1950) Theory of fracture and flow of solids. McGraw Hill, New York.
- Neuber, H. (1937) Kerbspannungslehre (Theory of Notch Stresses). Berlin: Springer-Verlag.
- Obreimoff, I. V. (1930) The splitting strength of mica. Proc. Roy. Soc. A127:290-297.
- Orowan, E. (1945) Notch brittleness and the strength of metals. Transactions, Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland. 89: 165-215.
- Orowan, E. (1949) Fracture and strength of solids. Reports on Progress in Physics. 12:185-323.
- Orowan, E. (1955) Energy criteria of fracture. Welding Journal. Res. Sup. 34(3):157s-160s.
- Peterson, R. E. (1940, 1974) Stress Concentration Factors. NY: J.Wiley & Sons.
- Prandtl, L. (1903) Zeitschrift für Physik. Vol.4.
- Prandtl, L. (1907) Verhandlungen deutscher Naturforscher und Ärzte. Dresden.
- Rossmannith, H. P. (1995a) An introduction to K. Wieghardt's historical paper "On splitting and cracking of elastic bodies". Fatigue and Fract. Engng. Mater. Struct. 12(12):1367-1369.
- Rossmannith, H. P. (1995b) English translation of (Wieghardt 1907) Fatigue and Fract. Engng. Mater. Struct. 12(12):1371-1405.
- Rossmannith, H. P. (1997) (ed) Fracture Research in Retrospect. G. R. Irwin 90th Birthday Anniversary Volume. Rotterdam: Balkema.
- Slattenscheck, A. (1922) Obituary to A. V. Leon. Vienna, Verlag der Technischen Hochschule.
- Slattenscheck, A. (1965) Ehrung Paul Ludwik (Honoring Paul Ludwik) TU Vienna Festschrift.
- Smekal, A. (1922) Technische Festigkeit und molekulare Festigkeit (Technical strength and molecular strength) Die Naturwissenschaften 10(37): 799-804
- Stanton, T. E. and Batson, R. G. C. (1921) On the characteristics of notched-bar impact test. Minutes of Proc. Inst. Civil Eng. 211:67-100.
- Stini, J. (1950) Tunnelbaugeologie (Tunnel construction geology) Springer-Verlag.
- Timoshenko, S. P. (1953) History of Strength of Materials. NY: McGraw - Hill Inc.
- Todhunter, I. and Pearson, K. (1886) History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials. Cambridge University Press, UK.
- Ucelli, A. (1956) Leonardo da Vinci. NY: Reynal & Co.
- Venske, O. (1901) Zur Integration der Gleichung $\nabla^2 u = 0$ für ebene Bereiche (On the integration of the equation $\nabla^2 u = 0$ for plane domains). Nachrichten der königl. Gesellschaft d. Wissenschaften zu Göttingen.
- Westergaard, H. M. (1939) Bearing pressures and cracks. J. Appl. Mech. Trans. ASME. 6:A49-A53.
- Wieghardt, K. (1903) Über die Statik ebener Fachwerke mit schlaffen Stäben. Doctoral Thesis, University of Göttingen.
- Wieghardt, K. (1904) Über einen Grenzübergang der Elastizitätslehre. Habilitationsschrift, Technische Hochschule Aachen, Germany.
- Wieghardt, K. and F. Klein (1905) Über Spannungsfächen und reziproke Diagramme. Archiv der Mathematik und Physik, III. Reihe, Vol VIII.
- Wieghardt, K. (1906) Über die Überspannungen bestimmter hochgradig statisch unbestimmter Fachwerke.
- Wieghardt, K. (1907) Über das Spalten und Zerreißen elastischer Körper. Z. Mathematik und Physik. 55(1-2):60-103. (English translation by H. P. Rossmannith: Wieghardt, K. (1995) On splitting and cracking of elastic bodies. Fatigue and Fract. Eng. Mater. Struct. 12(12):1371-1405).
- Wieghardt, K. (1920) Letter to the Rector of the TH Vienna, Dresden, October 12. 1920.
- Williams, M. L. (1952) Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension. J. Appl. Mech. 74:526-528.
- Williams, M. L. (1957) On the stress distribution at the base of a stationary crack. J. Appl. Mech. Trans. ASME. 24:109-114.
- Wolf, K. (1914) Zur Integration der Gleichung $\nabla^2 u = 0$ durch Polynome im Falle einer Staumauer (On the integration of the equation $\nabla^2 u = 0$ by means of polynomials in the case of an arch dam). Mitteilungen der k.u.k. Akademie der Wissenschaften Wien.
- Wolf, K. (1921) Beiträge zur ebenen Elastizitätstheorie Teil I: Einfluss eines elliptischen Loches bzw. Spaltes auf einen einachsigen Spannungszustand (Contributions to the plane theory of elasticity, Part I: Influence of an elliptical opening or crack on the uniaxial state of stress) Zeitschrift für Technische Physik 2:209-216.
- Wolf, K. (1922) Beiträge zur ebenen Elastizitätstheorie Teil II: Einfluss eines elliptischen Loches bzw. Spaltes auf den Spannungszustand im Falle der reinen und der zusammen-gesetzten Biegung (Contributions to the plane theory of elasticity, Part II: Influence of an elliptical opening or crack on the state of stress in the case of pure and general bending) Zeitschrift für Technische Physik 3:160-166.
- Wolf, K. (1922) Zur Bruchtheorie von A. Griffith (On Griffith's theory of fracture) Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 3:107-112.