

# Alakíthatóság Tönkremenetel

Alakítótechnológiák elmélete  
(BMEGEMTNG00)

- Alakíthatósági korlátok
- Tönkremenetel
- Technológiai próbák
- Károsodásmechanika és károsodási modellek

Az anyag képlékeny alakváltozását az alábbi jelenségek korlátozzák:

- Képlékeny instabilitás
- Repedés és törés (tönkremenetel)
- Képlékeny kihajlás

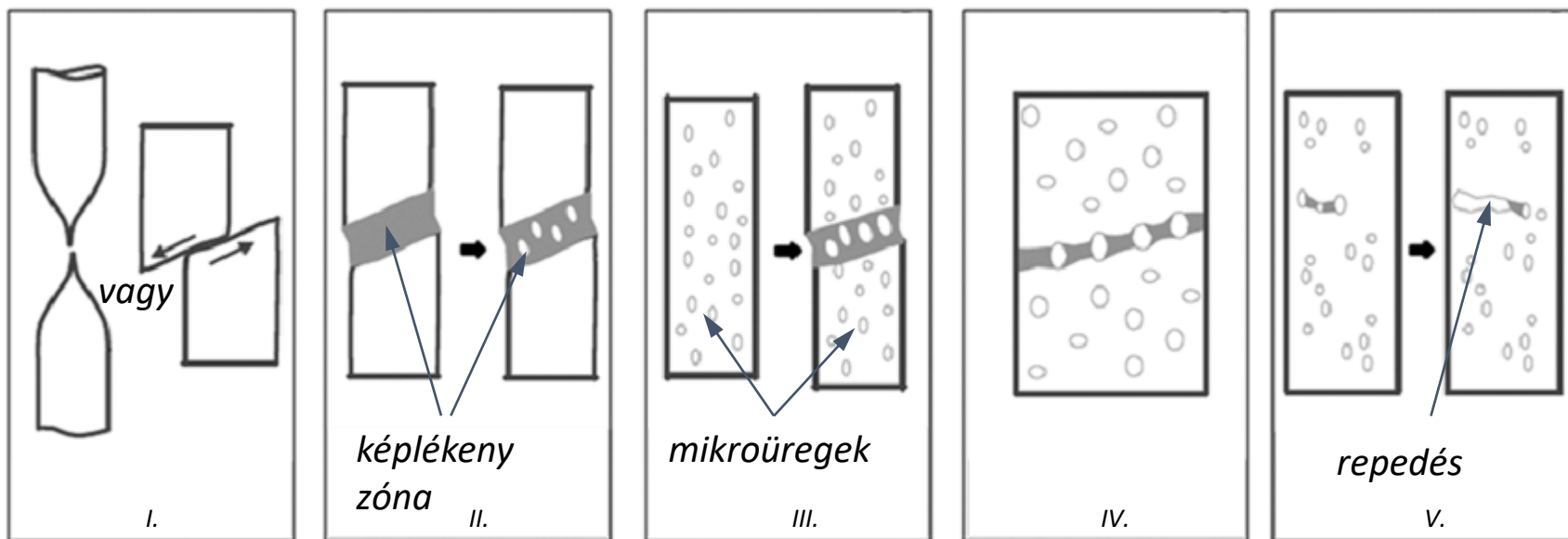
## **Képlékeny instabilitás**

Az alakváltozás az anyagnak egy kis kiterjedésű térfogatára koncentrálódik, miközben a többi anyagrész alakváltozása megközelítőleg állandó marad.

## **Repedés és törés (tönkremenetel)**

## **Képlékeny kihajlás**

A geometriából és az anyag képlékeny jellemzőiből következő kihajlás.

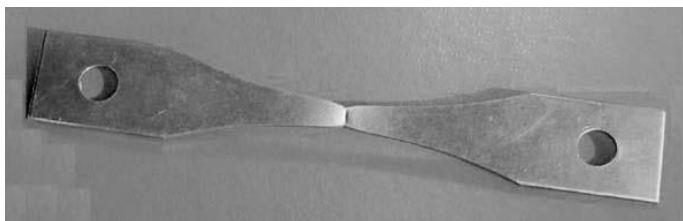
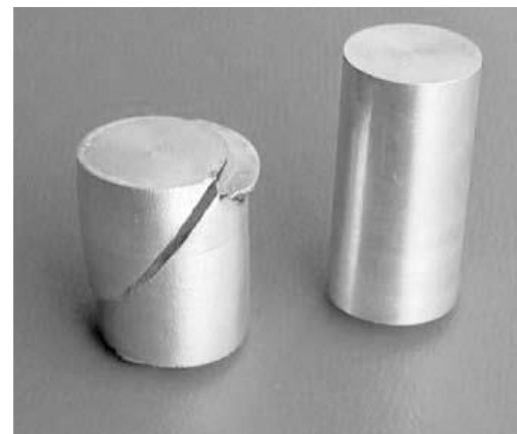


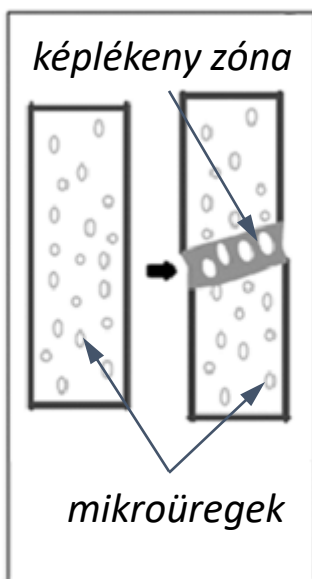
A folyamatban a lokális alakváltozás dominál.



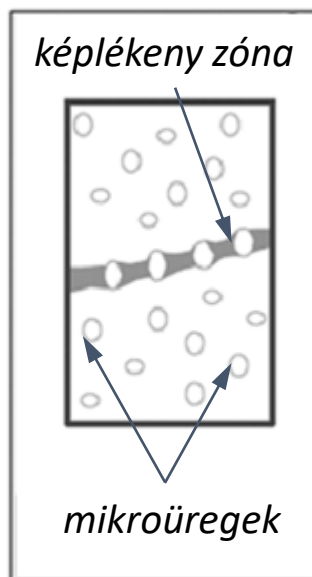
*képlékeny instabilitás*  
*ld. később*

Az üregképződés és összeolvadás dominál.

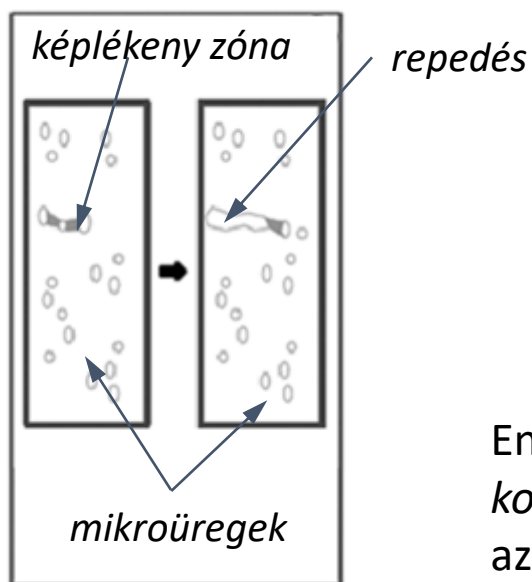




Az alakváltozás lokalizálódása előtt mikroüregek képződnek. Az üregek (porozitás) által okozott szilárdság csökkenés erőteljesebb, mint a keményedés, ami így az alakváltozás lokalizálódásához vezet.



A képlékeny alakváltozás lokalizálódása és az üregképződés egyidejűleg zajlik. A későbbiekben az üregek növekedése befolyásolja a lokális képlékeny zóna növekedését.



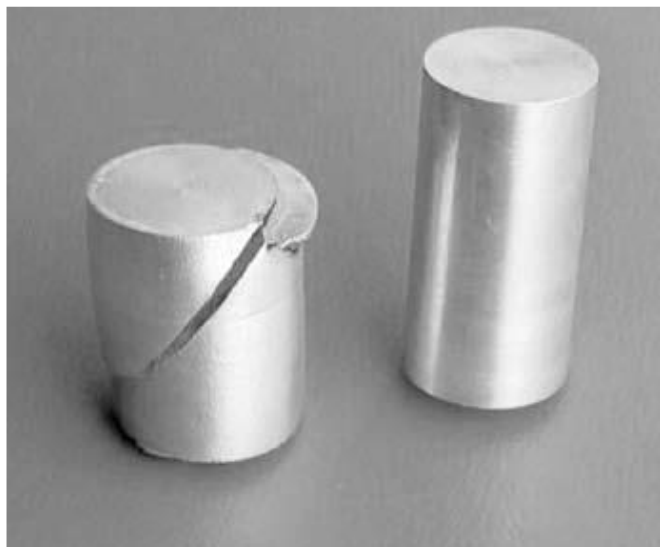
Mikroüregek képződnek, amelyek növekednek, majd bizonyos mikroszkopikus térfogatokban egyesülnek.

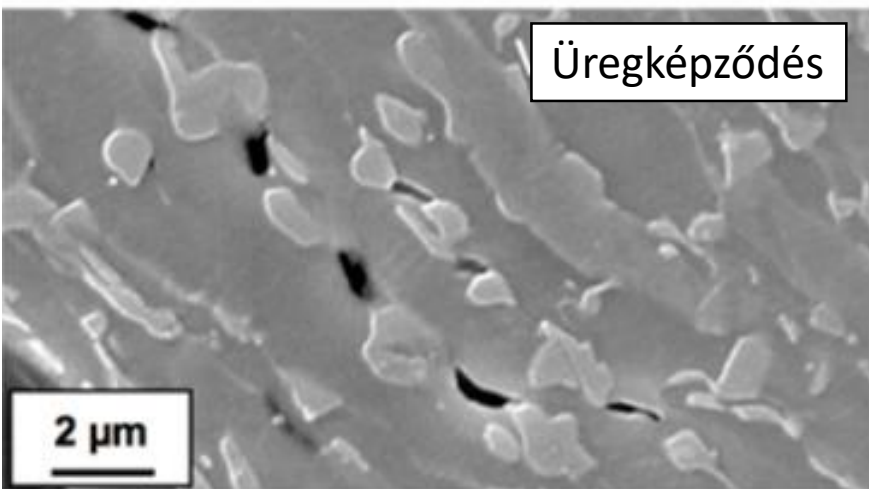
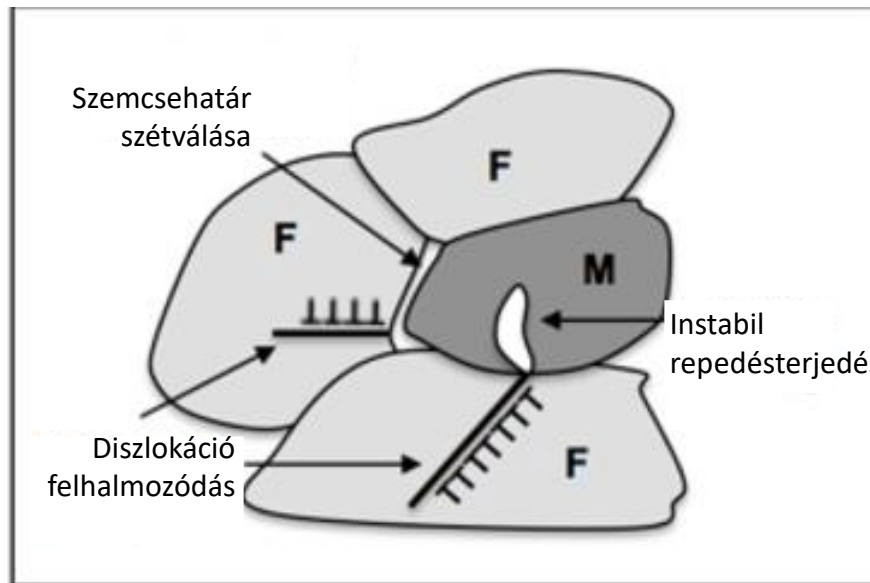
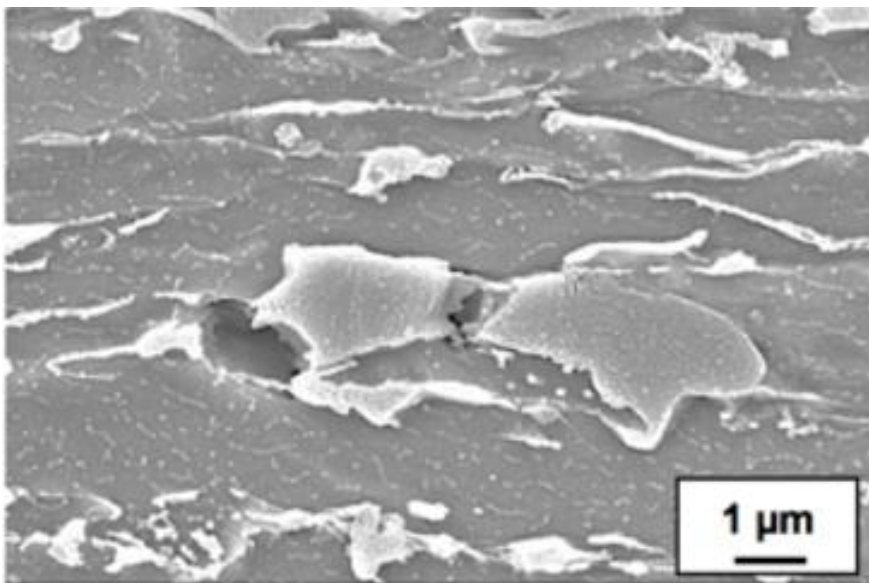
Az egyesült üregek mikrorepedések keletkezéséhez vezetnek, amelyek tovább terjednek a szomszédos üregeken keresztül.

A mikrorepedés csúcsa körül nagy képlékeny alakváltozási zóna alakulhat ki.

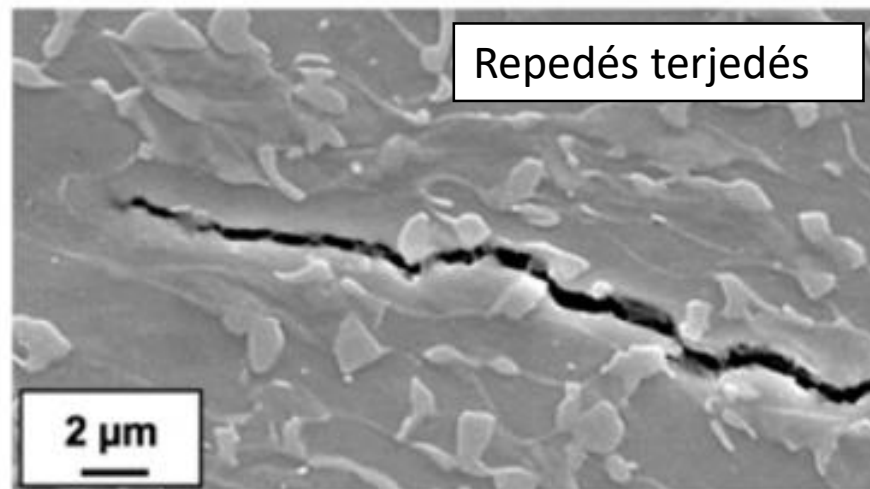
Ennek a folyamatnak a leírására olyan *rugalmas-képlékeny kontinuummechanikai modell* lenne alkalmas, amelyik figyelembe veszi az alábbi hatásokat:

- üregképződés és növekedés
- az ebből következő szilárdság csökkenés
- lokális alakváltozás
- repedésterjedés





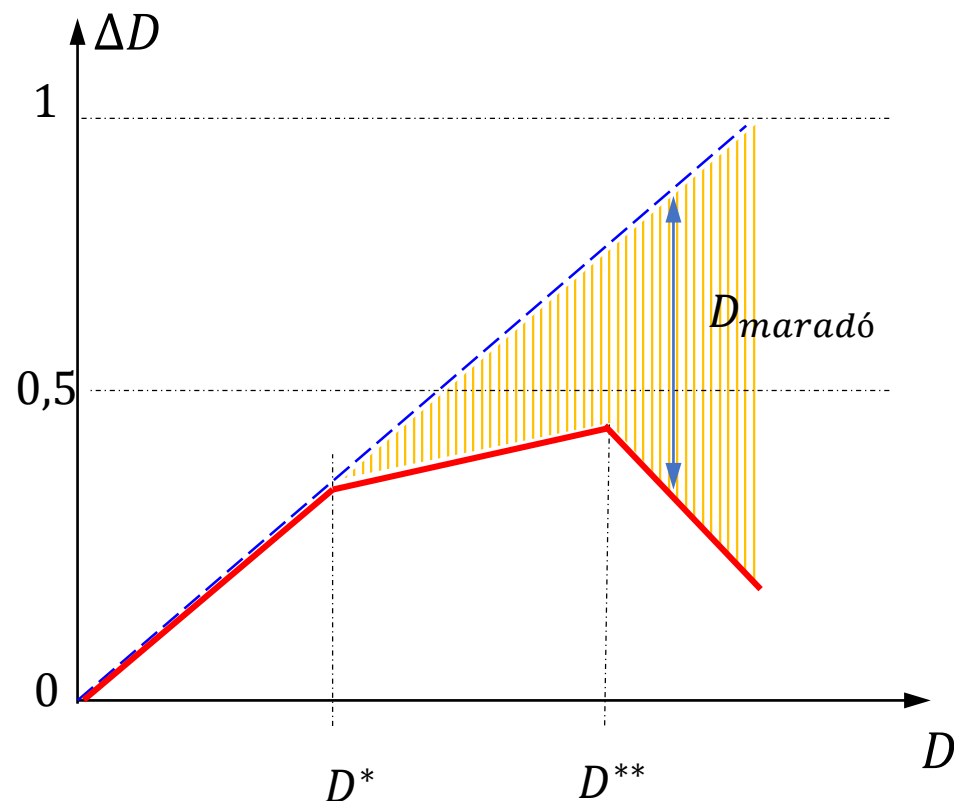
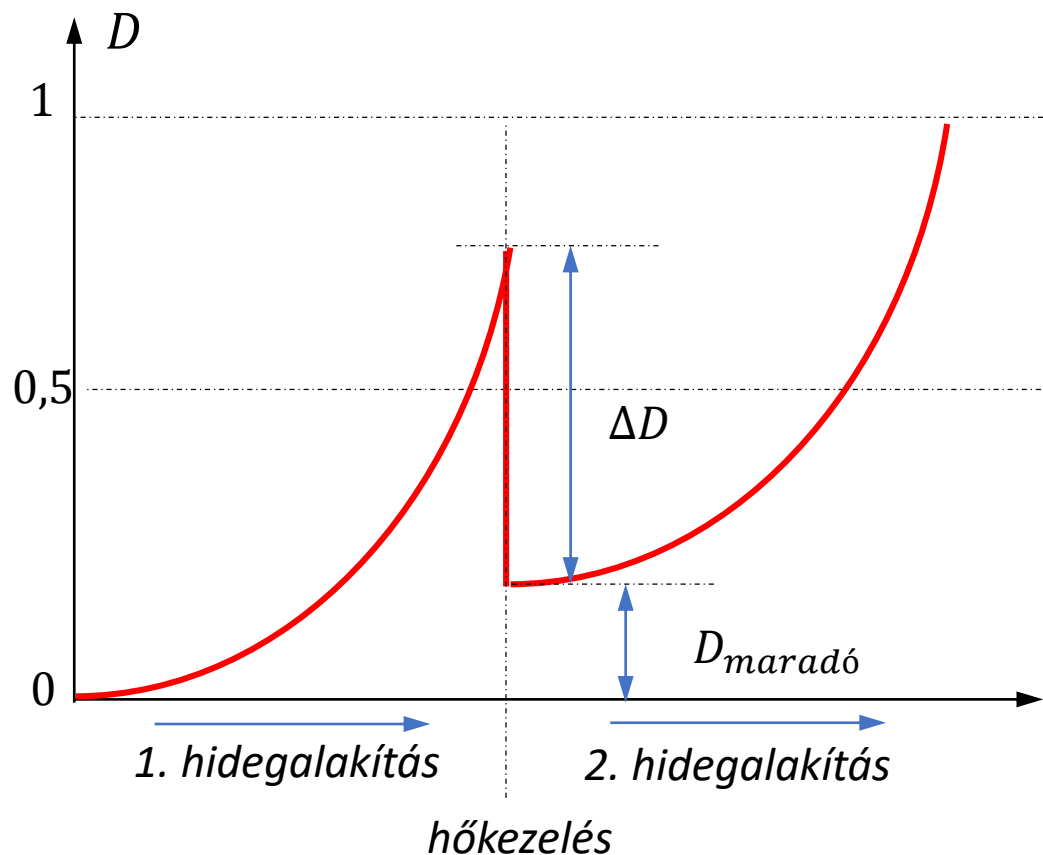
Üregképződés



Repedés terjedés

H. Mohrbacher, "Advanced metallurgical concepts for DP steels with improved formability and damage resistance", NiobelCon 2003





$D$  – A károsodási folyamatot jellemző mennyiség

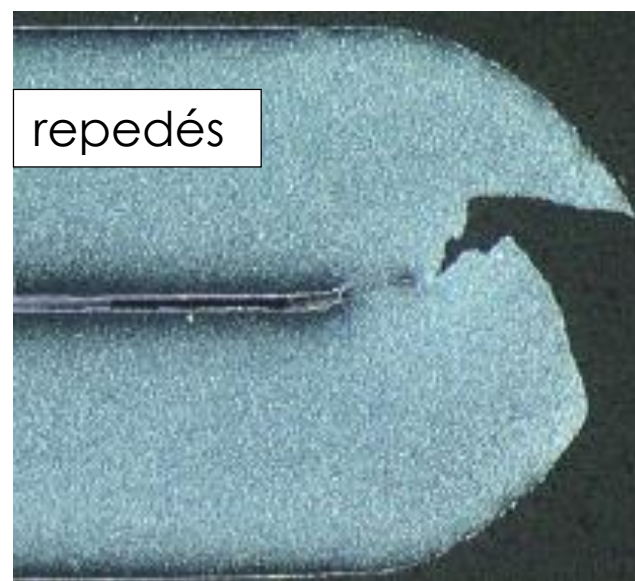
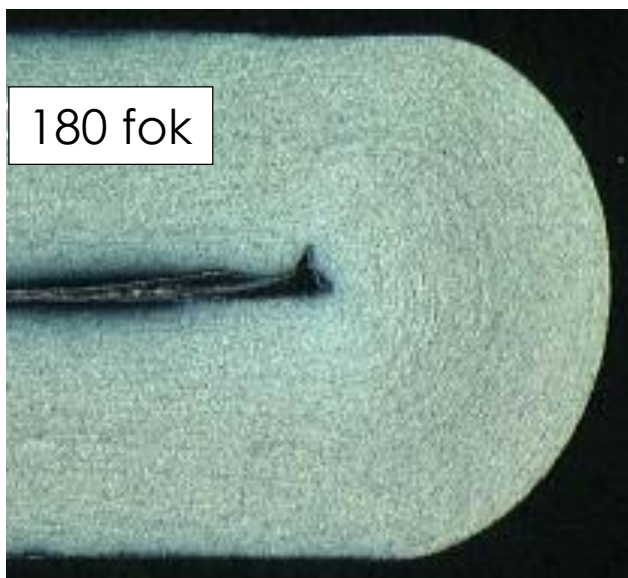
$\Delta D$  – Regenerálódás a hőkezelés hatására

$D^*$  – Károsodási határállapot, ameddig a károsodási folyamat teljesen visszafordítható

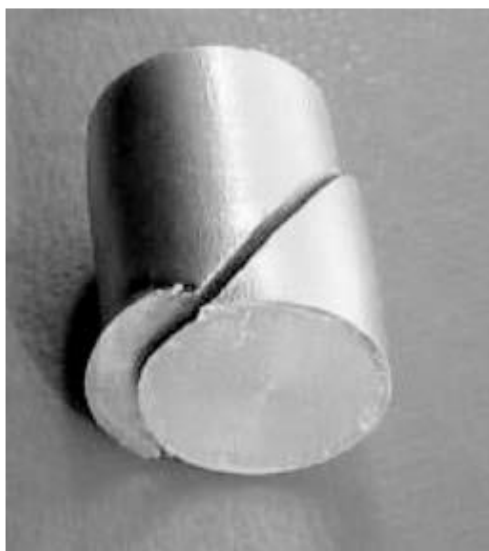
$D^{**}$  – Az üregek összenövésének megkezdődése

$D = 1$  – makroszkópikus törés



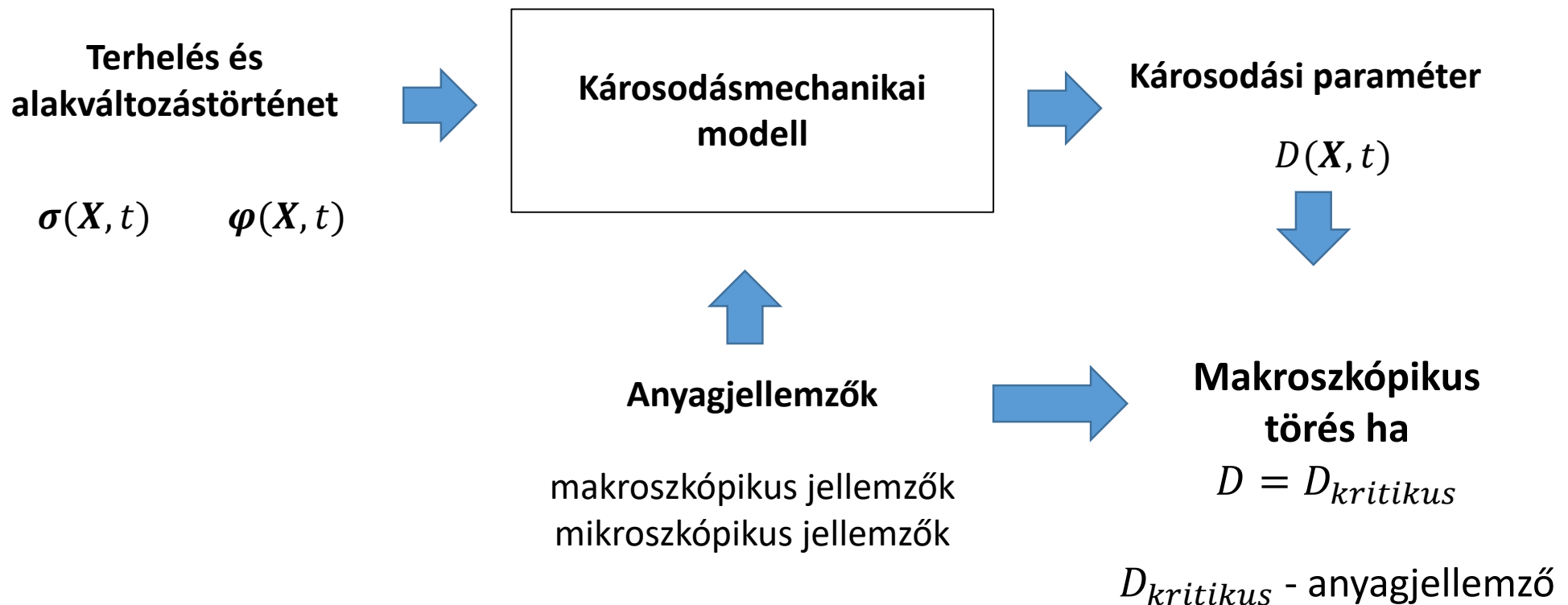


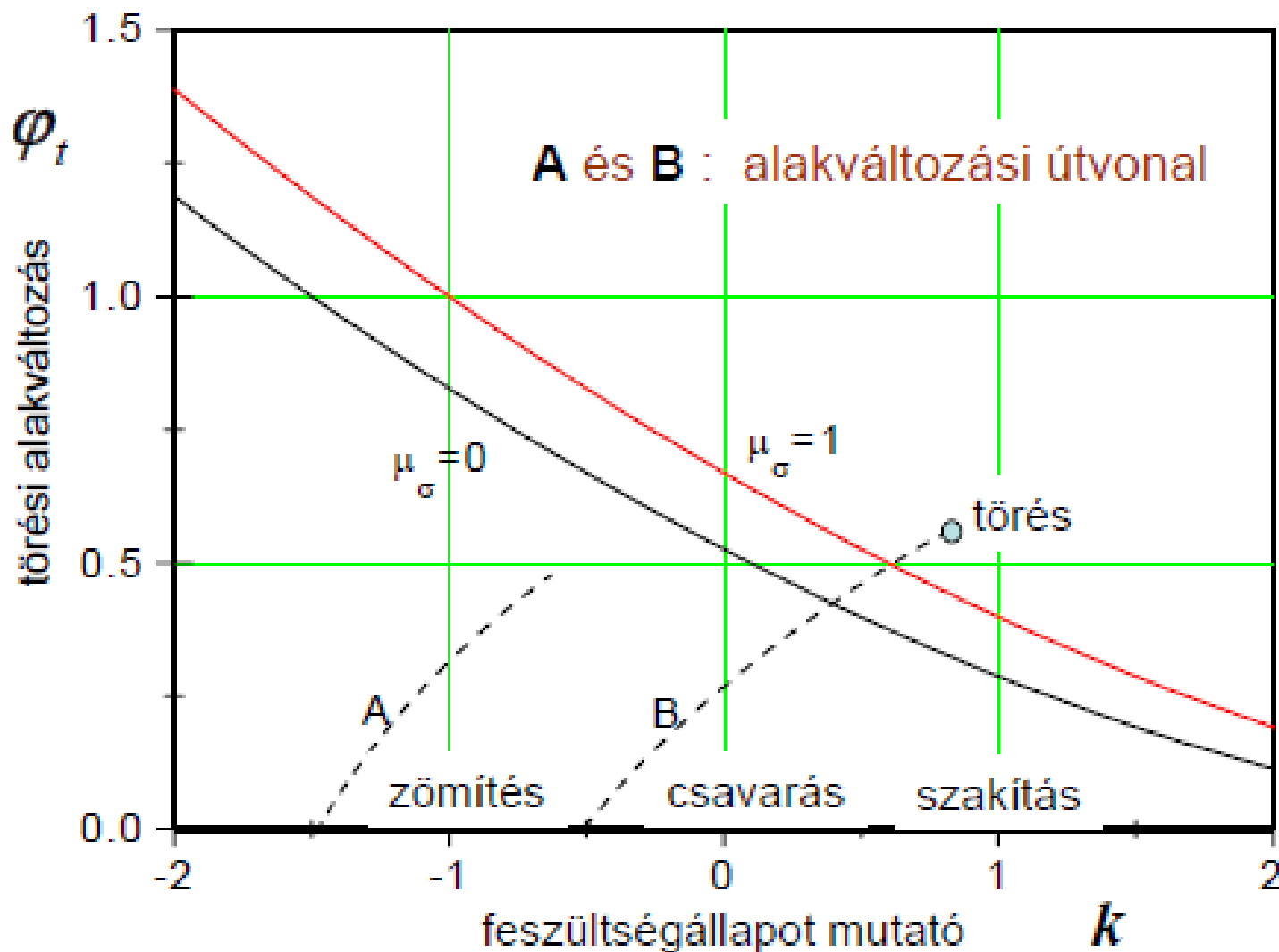
Azt a hajlítási szöget mérjük, amit az anyag repedés nélkül elvisel.



A károsodási folyamat során az **üregképződés és növekedés**, az ebből következő **szilárdság csökkenés**, a **lokális alakváltozás** és a **repedésterjedés** folyamatának számítása.

A **feszülégi** és **alakváltozási** állapotból és annak változásából kell a mikroszerkezeti folyamatokat modellezni.





Feszültség állapot mutató( $k$ )

$$k = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_{eq}}$$

Lode paraméter ( $\mu_\sigma$ )

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

$\Psi$  alakíthatósági mérték kimerülési paraméter.

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varphi}_f} \frac{a\bar{\varphi}^{a-1}}{\bar{\varphi}_{krit}^a} d\bar{\varphi}$$

Több lépés esetében:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \int_0^{\bar{\varphi}_i} \frac{a\bar{\varphi}^{a-1}}{\bar{\varphi}_{krit}^a} d\bar{\varphi}$$

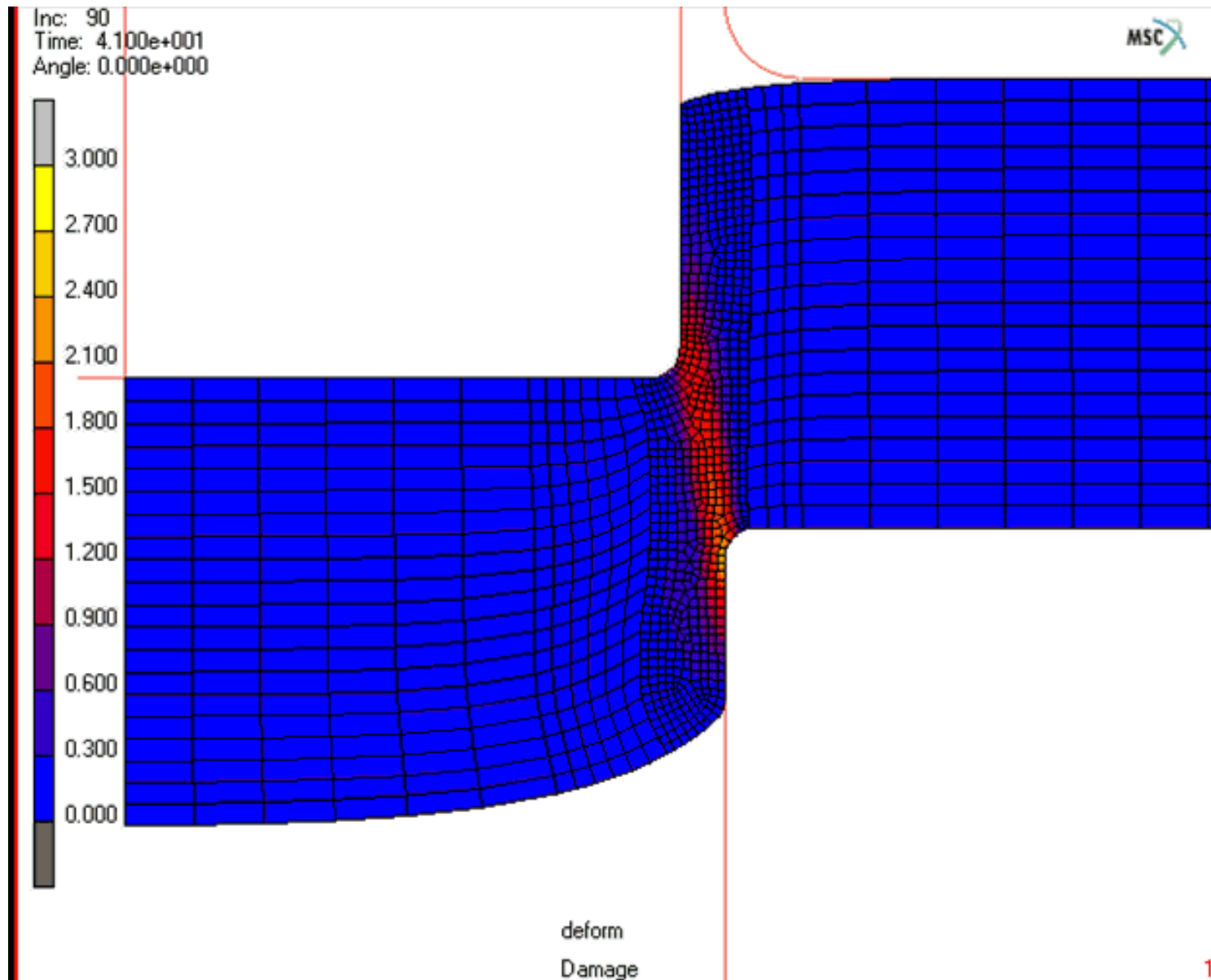
**Tönkremeneteli paraméterek:**

$\Psi$  – alakíthatósági mérték kimerülési paraméter

**Anyagjellemzők:**

$$a = a(k, \mu_\sigma, \bar{\varphi}, T, X)$$

*tönkremenetel ha  $\Psi \geq 1$*



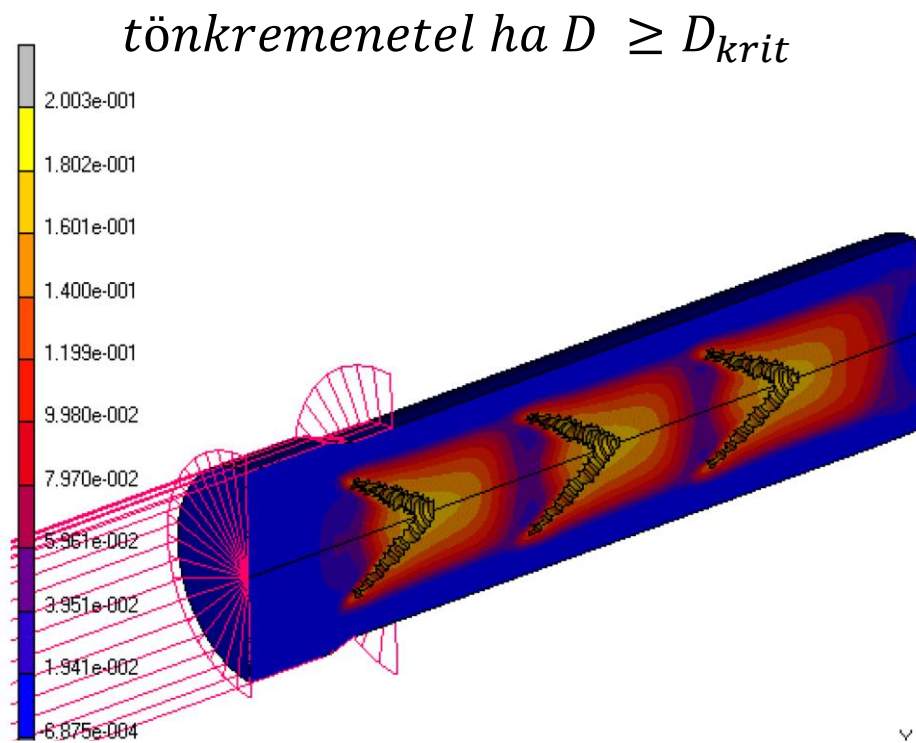
$$D = \int_0^t \frac{\sigma_{max}(t)}{\sigma_{eq}(t)} \dot{\varphi}_{eq}(t) dt$$

$\sigma_{max}(t)$  – legnagyobb főfeszültség

$\sigma_{eq}(t)$  – egyenértékű feszültég

$\dot{\varphi}_{eq}$  – egyenértékű alakváltozási sebesség

$D_{krit}$  – anyagjellemző



A károsodási paraméter egy kiválasztott anyagi pontban számolt integrál értéke. A számítás közvetlenül nem vesz figyelembe anyagjellemzőket (a feszültség és az alakváltozás anyagtól függően változik). Nincs univerzálisan meghatározott  $D_{krit}$  határérték, amelynek elérése károsodást jelent.

A károsodás lehetséges helyeit mutatja, összehasonlításra alkalmas.



$$D = \int_0^t \left( \frac{\sigma_0(t)}{\sigma_{eq}(t)} + B \right) \dot{\varphi}_{eq}(t) dt$$

tönkremenetel ha  $D \geq D_{krit}$

$\sigma_0(t)$  – hidrosztatikus feszültség

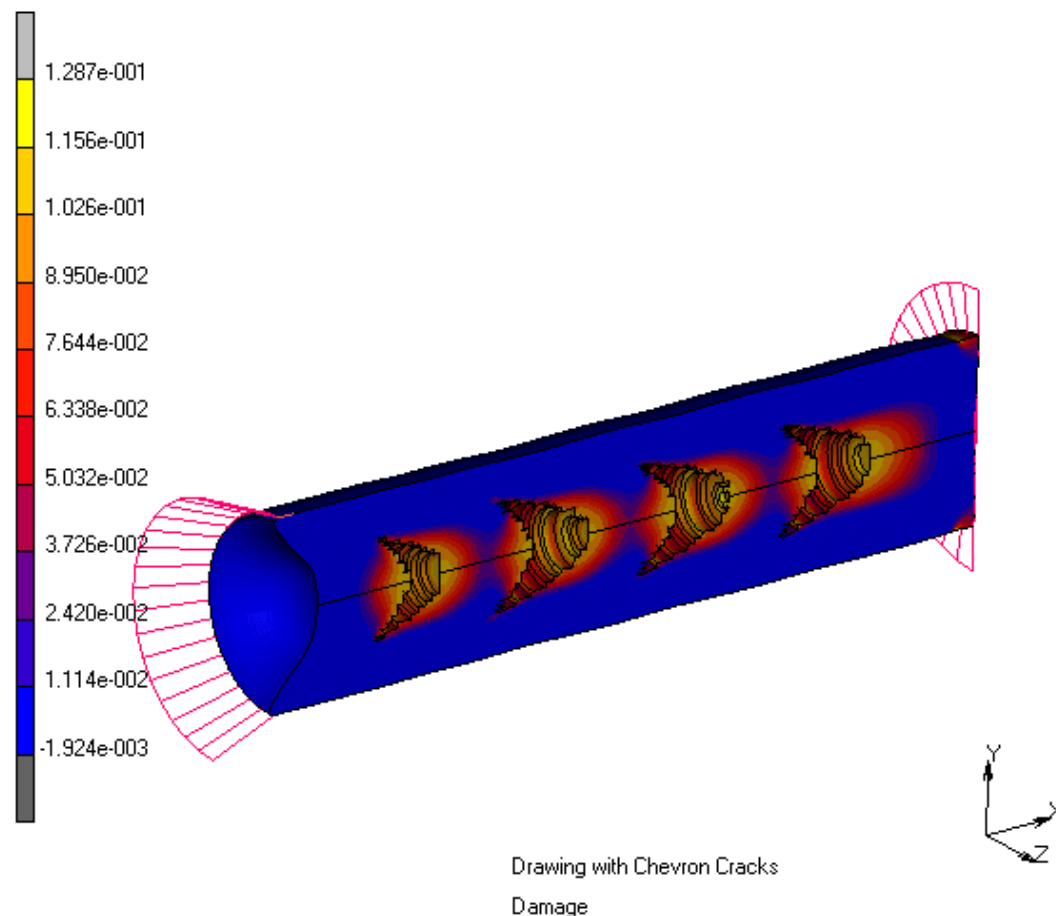
$\sigma_{eq}(t)$  – egyenértékű feszültég

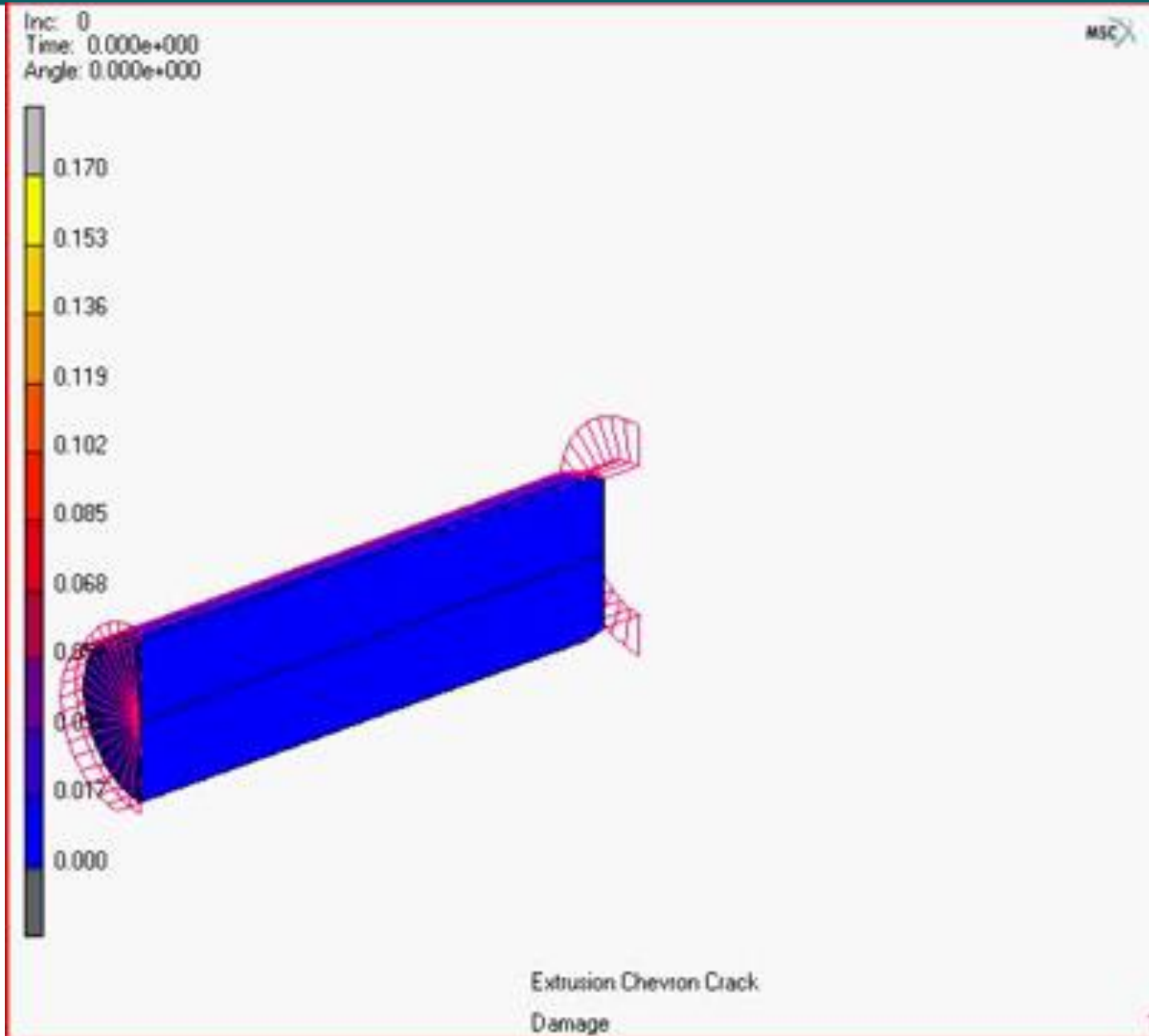
$\dot{\varphi}_{eq}$  – egyenértékű alakváltozási sebesség

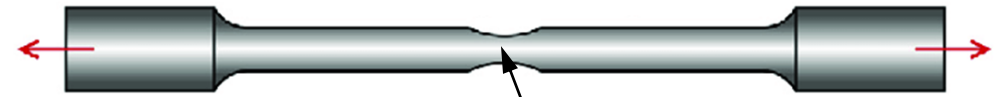
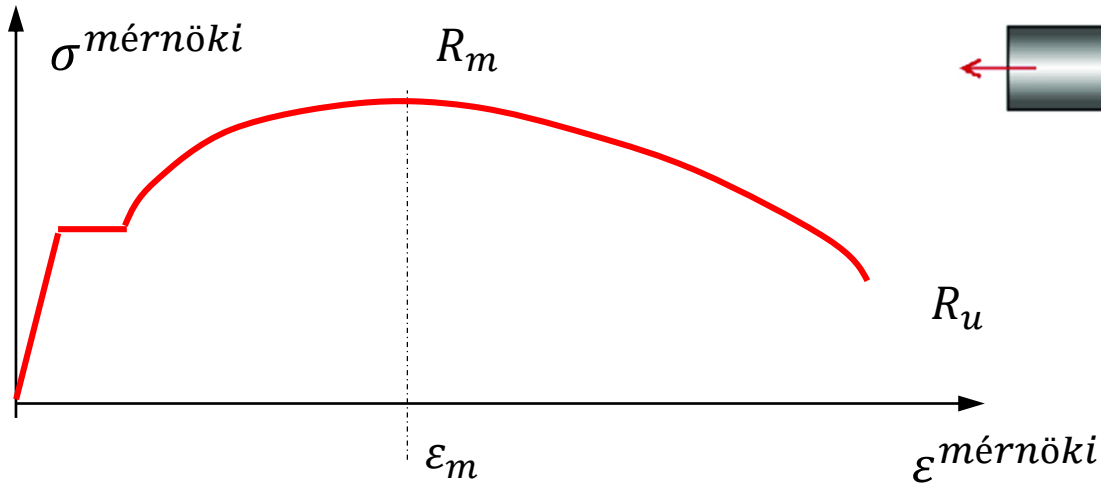
$B, D_{krit}$  – anyagjellemzők

A Cockroft-Latham modellhez hasonló, azonban anyagjellemzőt is figyelembe vesz.

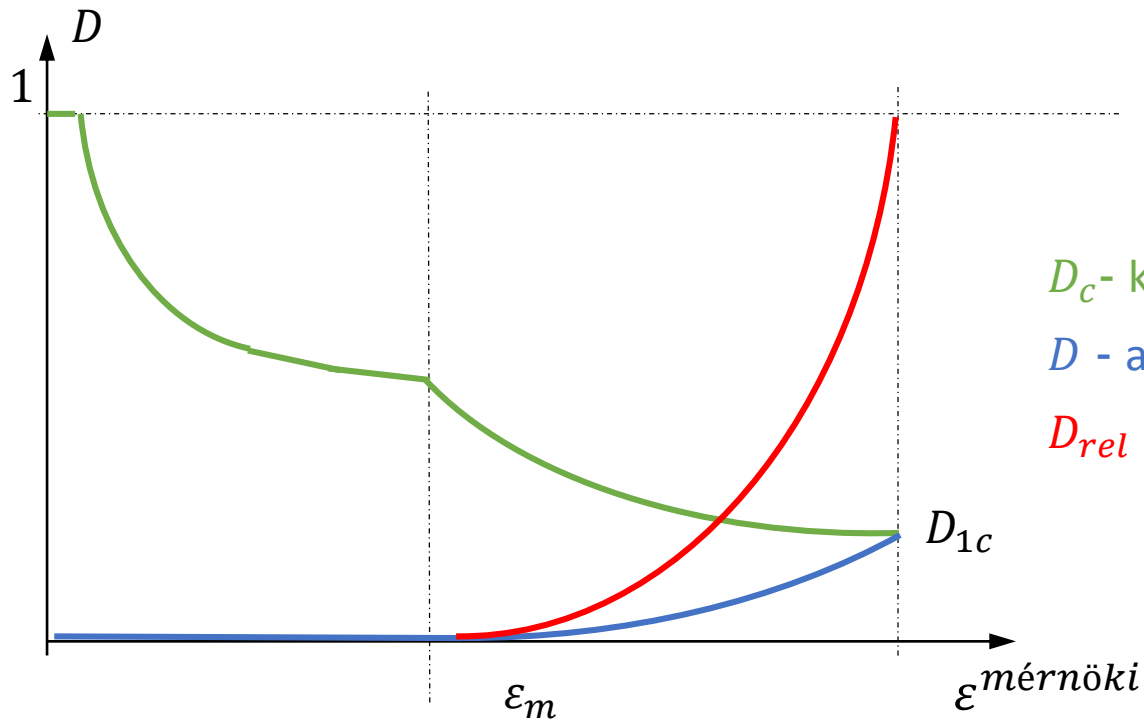
A károsodás lehetséges helyeit mutatja, a károsodási folyamat előre jelzésére alkalmas.







tönkrementetel



$D_c$  - kritikus károsodás

$D$  - abszolút tönkrementeteli paraméter

$D_{rel}$  - relatív károsodás

$$D_{rel} = D / D_c$$

$$dD = \frac{f(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \sigma_{eq}^2}{2 \cdot E \cdot S \cdot (1 - D)^2} d\varphi_{képl.}$$

$$0 \leq D \leq 1$$

$\sigma_0(t)$  – hidrosztatikus feszültség

$\sigma_{eq}(t)$  – egyenértékű feszültég

$\varphi_{képl.}$  – egyenértékű képlékeny alakváltozás

$f(\boldsymbol{\sigma})$  – A feszültségi állapotot jellemző függvény

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}}\right)^2$$

$$D_c = D_{1c} \frac{\sigma_u^2}{(\sigma_{eq} \sqrt{f(\boldsymbol{\sigma})})^2} \cdot (1 - D)^2$$

$$0 \leq D_c \leq 1$$

## Tönkremeneteli paraméterek:

$D$  – abszolút tönkremeneteli paraméter

$D_c$  – kritikus tönkremeneteli érték

**tönkremenetel ha  $D \geq D_c$**

## Anyagjellemzők:

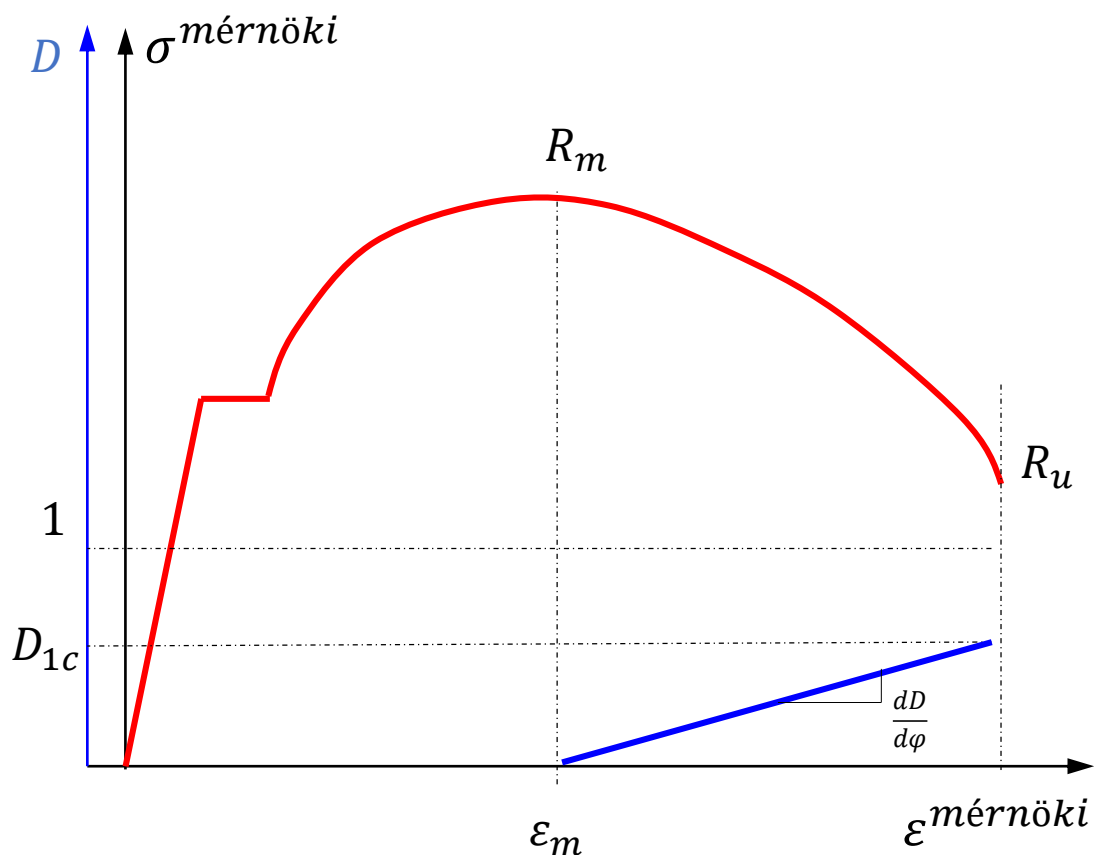
$S$  – tönkremeneteli ellenállás

$E$  – rugalmassági modulusz

$\nu$  – Poisson tényező

$\sigma_u$  – A töréshez tartozó valódi feszültség szakítóvizsgálatnál

$D_{1c}$  – kritikus tönkremeneteli érték egytengelyű feszültségi állapotban



Kritikus tönkremeneteli érték egytengelyű feszültségi állapotban:

$$D_{1c} = 1 - \frac{R_u}{R_m}$$

Tönkremeneteli ellenállás:

$$S = \frac{R_u^2}{2E(1 - D_{1c})^2} \frac{dD}{d\phi} = \frac{R_m^2}{2E} \frac{dD}{d\phi}$$

$$\frac{dD}{d\phi} = \frac{D_{1c} - 0}{\varphi_u^{\text{képl}} - \varphi_m^{\text{képl}}}$$

A Lemaitre modellhez hasonló, figyelembe veszi az mikroüregek képződését, növekedésüket és egyesülésüket.

A Bonora modell figyelembe veszi a rugalmassági modulusz változását a tönkremenetel során. A tönkremeneteli folyamat megindulása után az anyag ideiglenesen visszanyeri eredeti rugalmassági moduluszát, ha nyomó feszültségi állapotba kerül.

$$dD = \frac{\alpha D_c^{1/\alpha}}{\ln\left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{th}}\right)} (D_c - D) \frac{\alpha - 1}{\alpha} f(\boldsymbol{\sigma}) \frac{1}{\varphi_{képl.}^+} d\varphi_{képl.}^+$$

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}}\right)^2$$

$$E = E_0(1 - D)$$

### Tönkremeneteli paraméterek:

$D$  – abszolút tönkremeneteli paraméter

$D_c$  – kritikus tönkremeneteli érték

**tönkremenetel ha  $D \geq D_c$**

$\sigma_0(t)$  – hidrosztatikus feszültség

$\sigma_{eq}(t)$  – egyenértékű feszültég

$\varphi_{képl.}^+$  – „aktív” egyenértékű képlékeny alakváltozás

$f(\boldsymbol{\sigma})$  – A feszültségi állapotot jellemző függvény

### Anyagjellemzők:

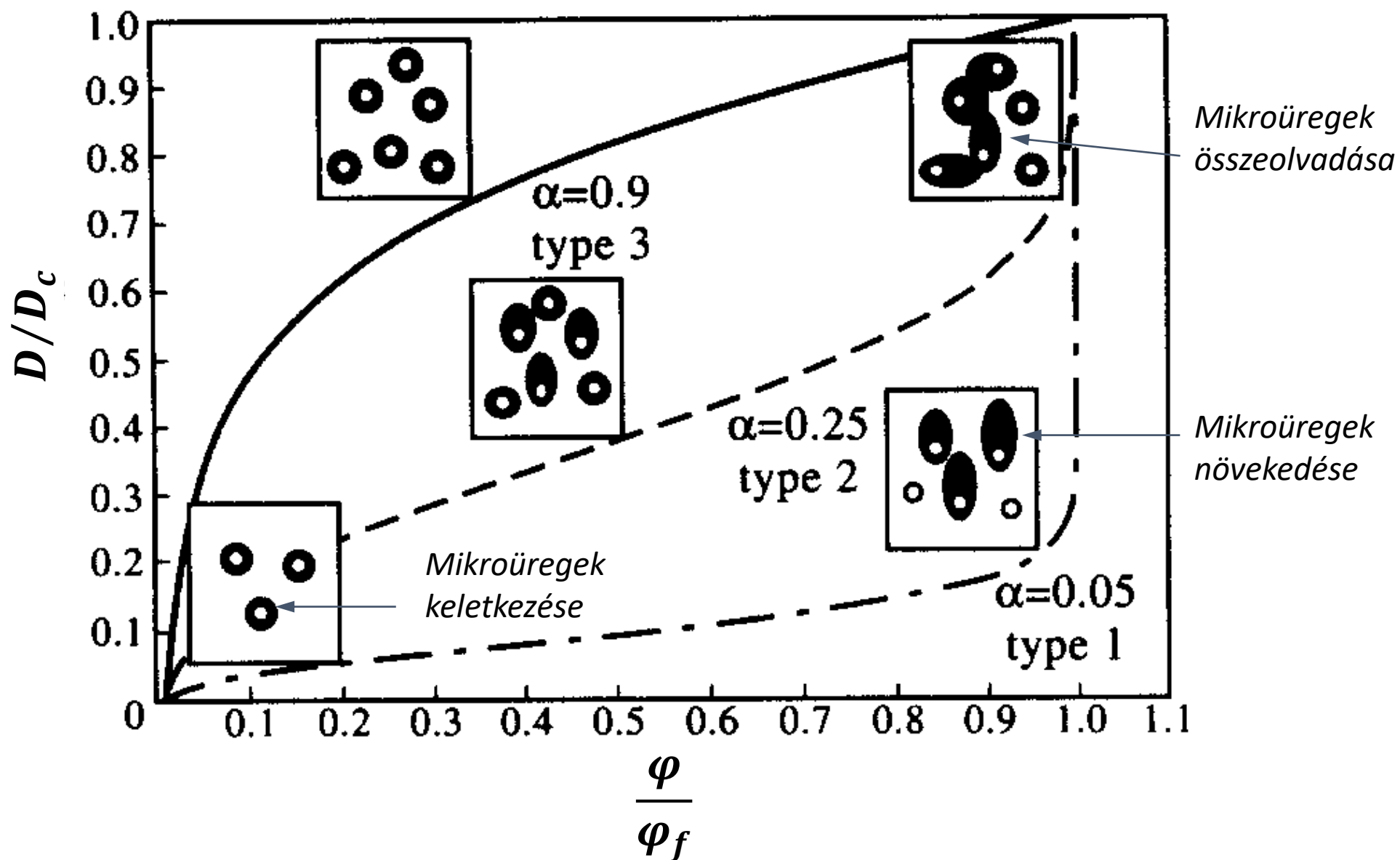
$\varphi_f$  – tönkremeneteli határ alakváltozás

$\varphi_{th}$  – alakváltozás a tönkremenetel megkezdődésekor

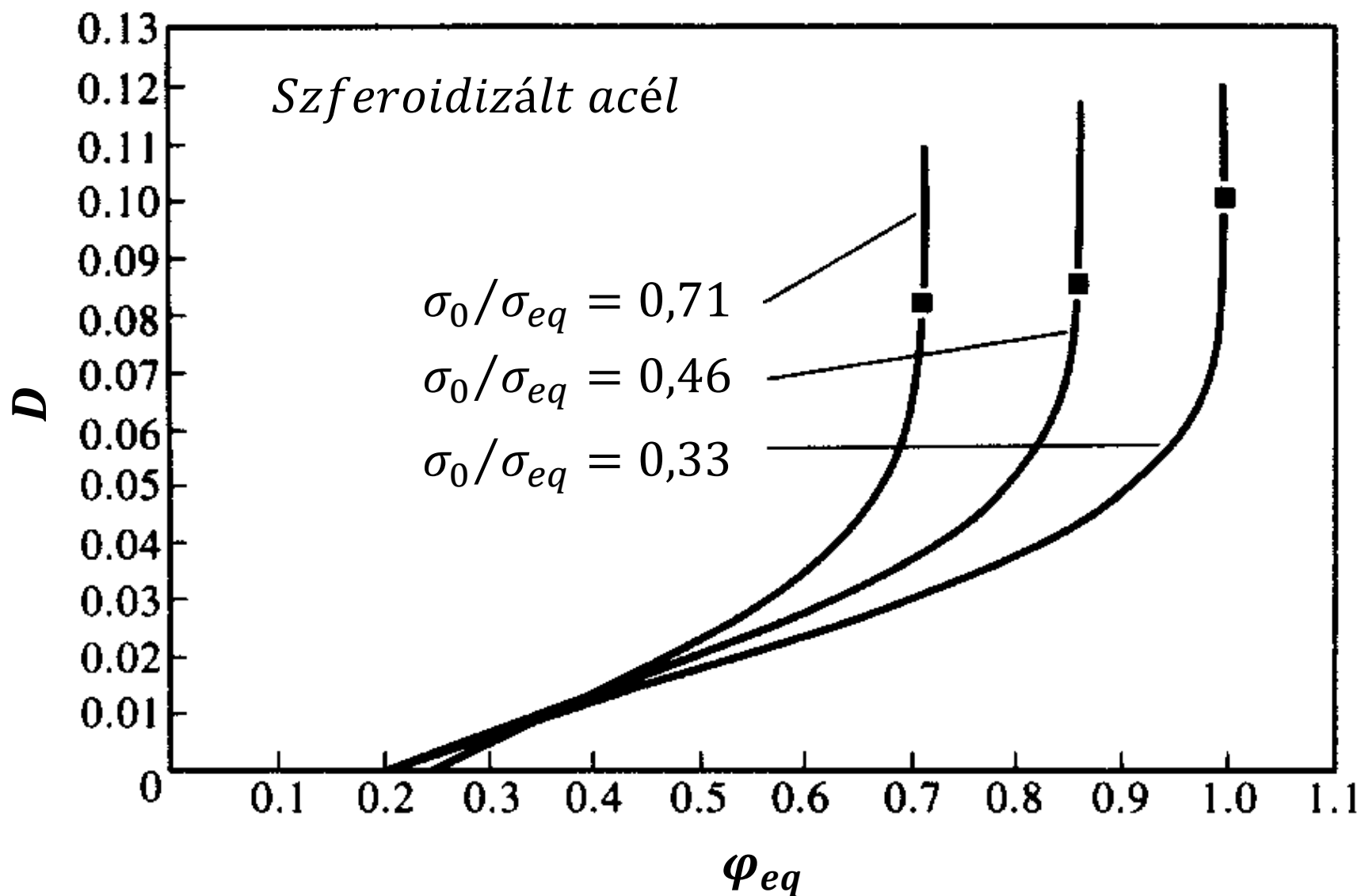
$E_0$  – kezdeti rugalmassági modulusz

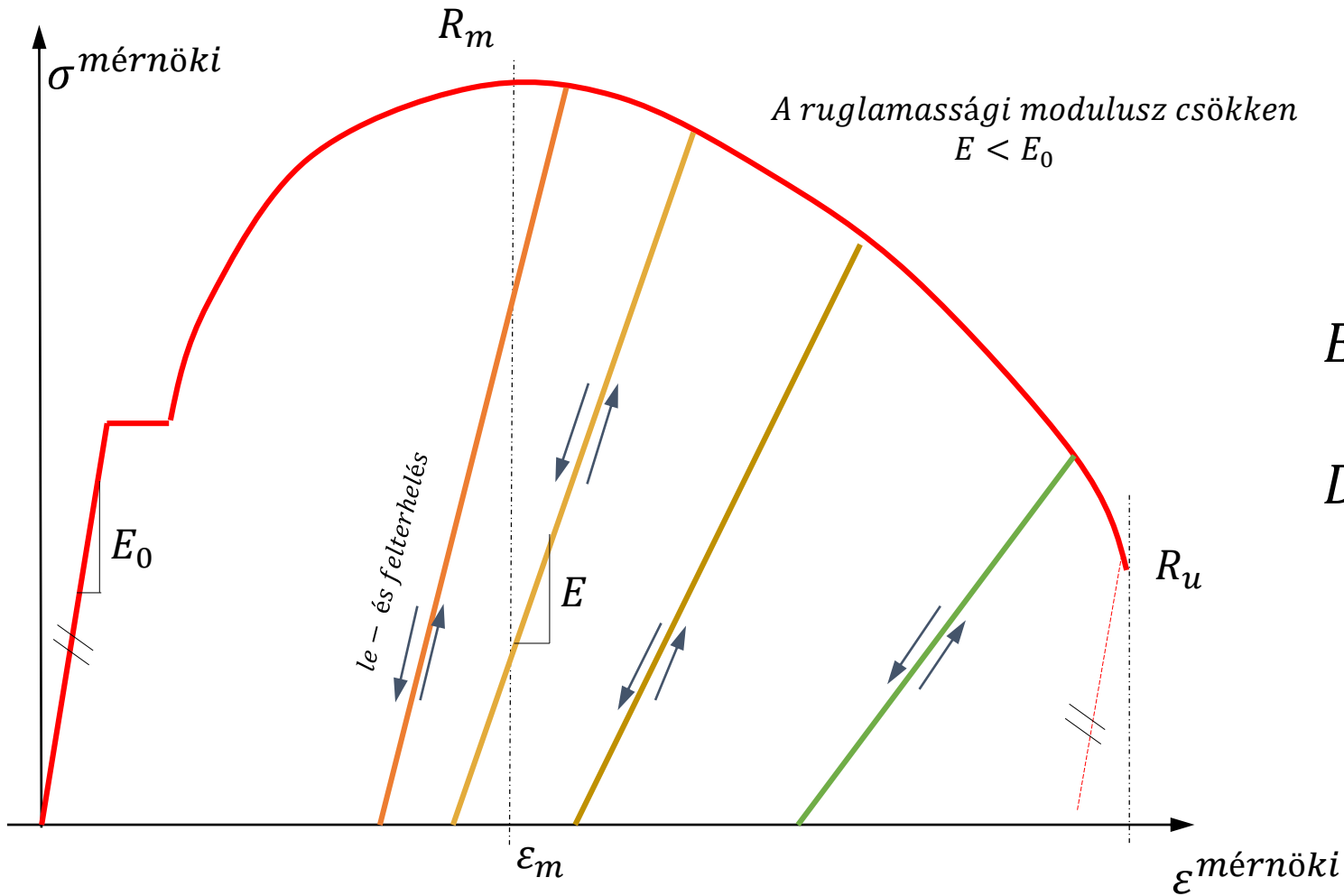
$E$  – aktuális rugalmassági modulusz

$\alpha$  – anyagjellemző









$$E = E_0(1 - D)$$

$$D = 1 - \frac{E}{E_0}$$

## Tönkremeneteli alakváltozás és paraméter:

$$\varphi_d = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) [1 + D_4 \ln \dot{\varphi}^*] [1 + D_5 T^*]$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}} \quad \dot{\varphi}^* = \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_{olv} - T}$$

$$D = \sum \frac{\Delta \varphi_{képl.}}{\varphi_d}$$

## Tönkremeneteli paraméter:

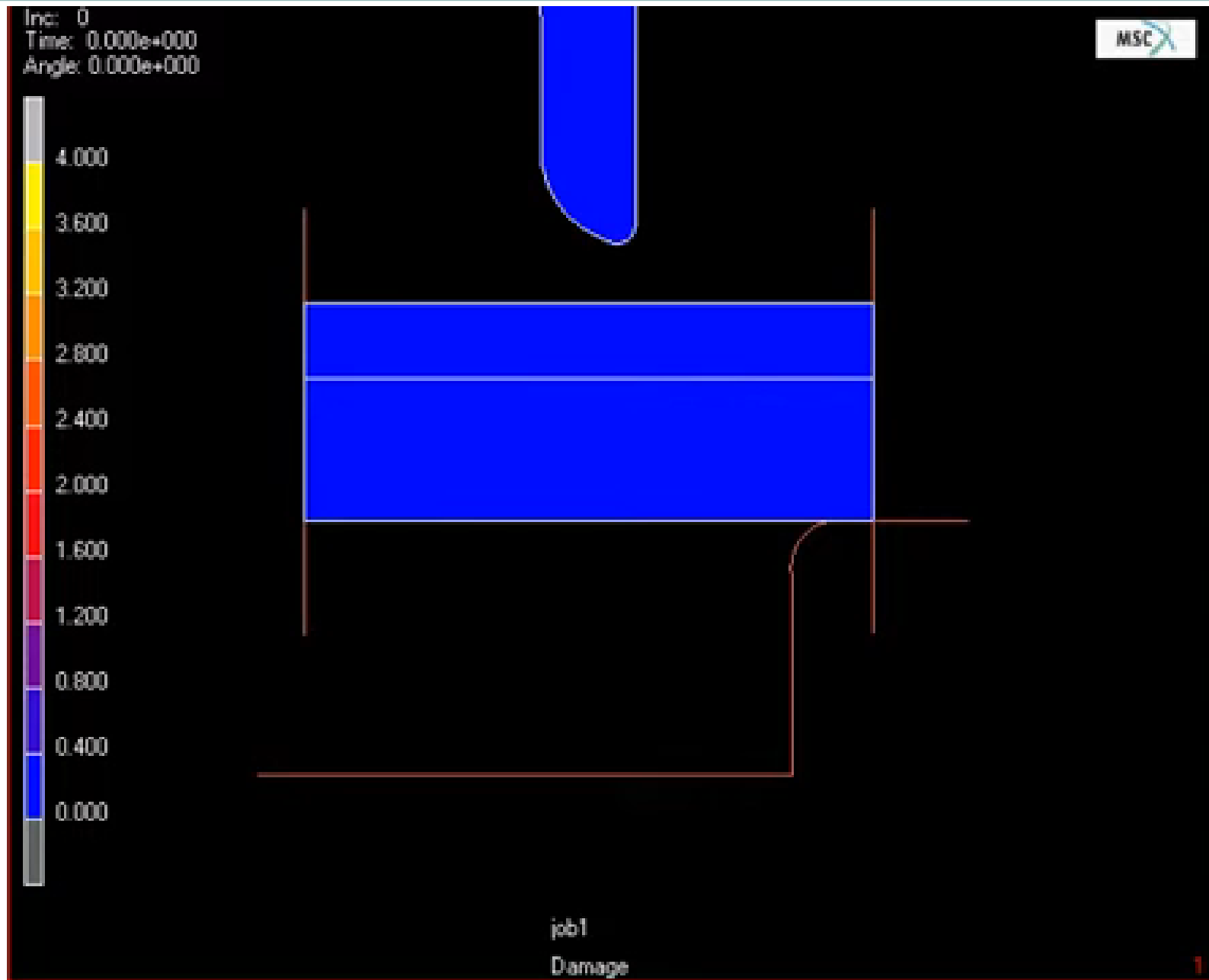
$D$  – tönkremeneteli paraméter

*tönkremenetel ha  $D \geq 1$*

$\sigma_0(t)$	– hidrosztatikus feszültség
$\sigma_{eq}(t)$	– egyenértékű feszültég
$\varphi_{képl.}$	– egyenértékű képlékeny alakváltozás
$\dot{\varphi}$	– egyenértékű alakváltozási sebesség
$\Delta \varphi_{képl.}$	– egyenértékű képlékeny alakváltozás növekmény
$\varphi_d$	– tönkremeneteli alakváltozás
$T_0, \dot{\varphi}_0$	– referencia értékek
$T_{olv}$	– olvadáspont
$T$	– hőmérséklet

## Anyagjellemzők:

$D_{1..5}$  – anyagjellemzők



- Ziaja Gy.: **Alakítástechnika jegyzet**
- MSC Marc, **Manual Vol. A, Theory and User Information**
- George Z. Voyiadjis, Peter I. Kattan, **Damage Mechanics**