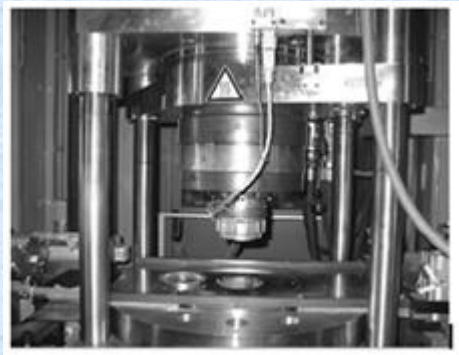
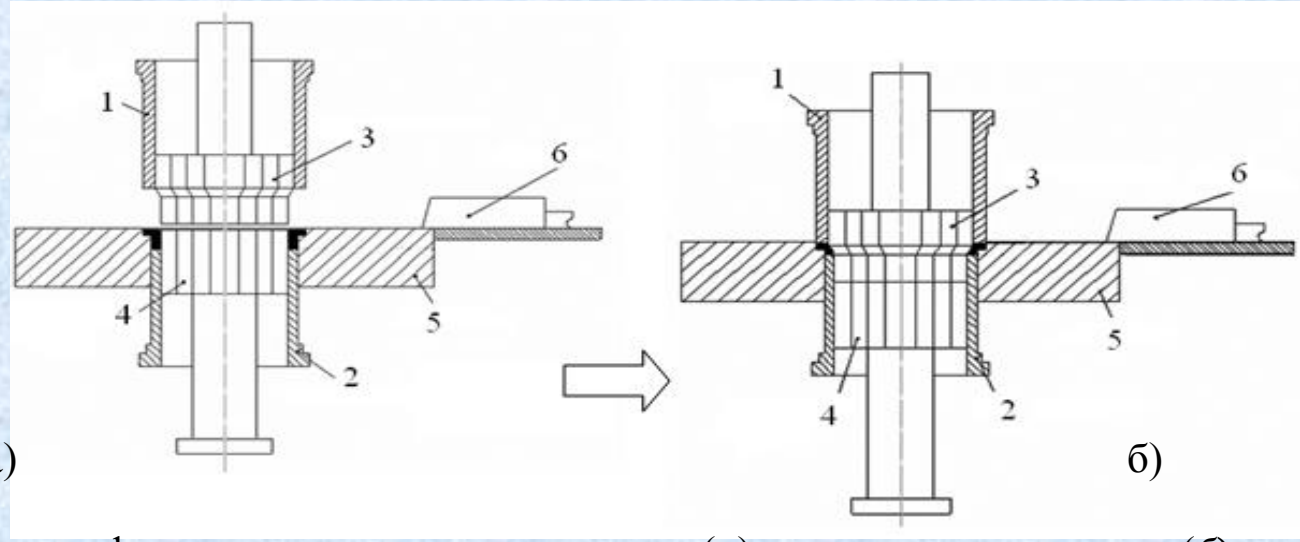
# Разработка технологического процесса теплого прессования синхронизирующего кольца коробки передач трактора “Беларус” (ИПМ НАН Беларуси)

а)



б)

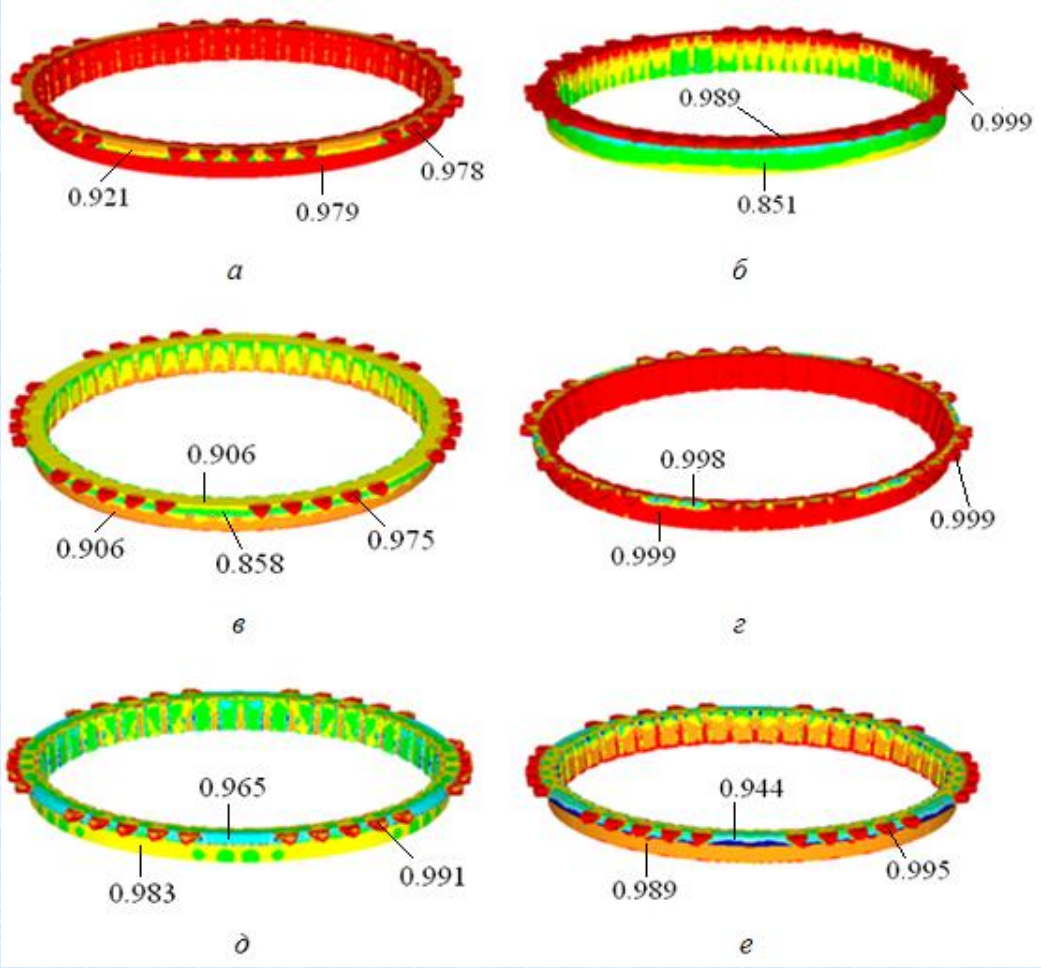
Экспериментальные образцы деталей (1 - кольцо блокировочное, 2 - кольцо коническое) синхронизатора трактора «Беларус» (а) и штамп для теплого прессования (б)




а) б)

Положение формующих элементов в начале (*а*) и в конце прессования (*б*):
1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – вставкоудержатель; 4 – центральный стержень; 5 – матрица; 6 – ползушка

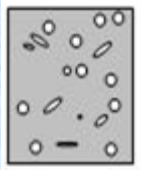
# Влияние параметров на распределение относительной плотности

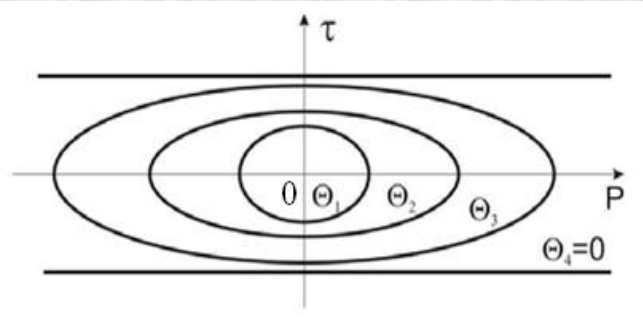


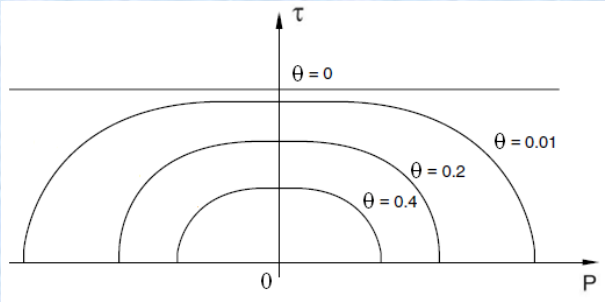

а,б - отношения скорости верхнего пуансона к скорости матрицы
(а - $V_п/V_м = 1.425$, б - $V_п/V_м = 1.9$);
в,г – угла конусности верхнего пуансона (в – $\alpha = 0^0$, г – $\alpha = 15^0$ ) ;
д,е – величины трения (д – $f_{тр..} = 0$, е – $f_{тр..} = 0.3$)

# Контуры нагружения пористых тел

**Без учета** содержания плоских макродефектов



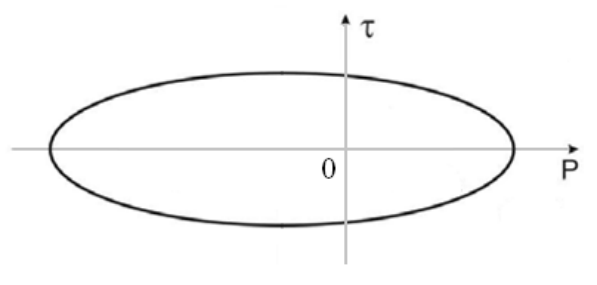


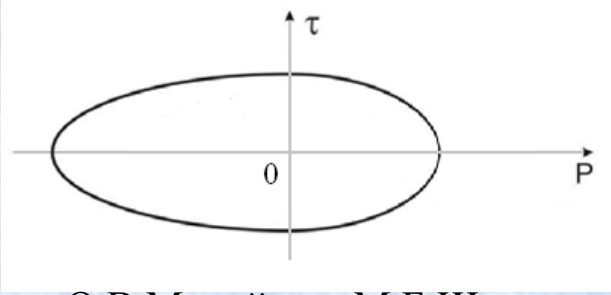




S. Shima, M.Oyane, R.Green, В.Д. Рудь, В.З. Мидуков, Г.Петросян, М.Б. Штерн, И.Ф. Мартынова, В.В. Скороход, Л.И. Тучинский, А.М. Лаптев

A.L. Gurson

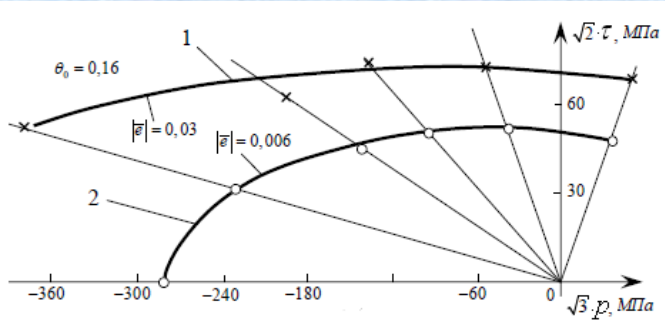
**С учетом** содержания плоских макродефектов



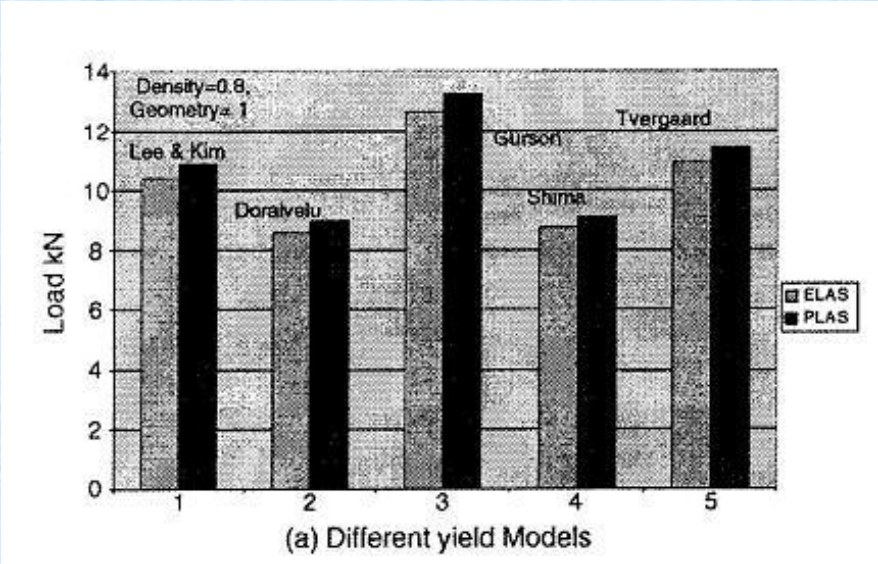

В.Д. Рудь, В.З. Мидуков, Я.Е. Бейгельзимер

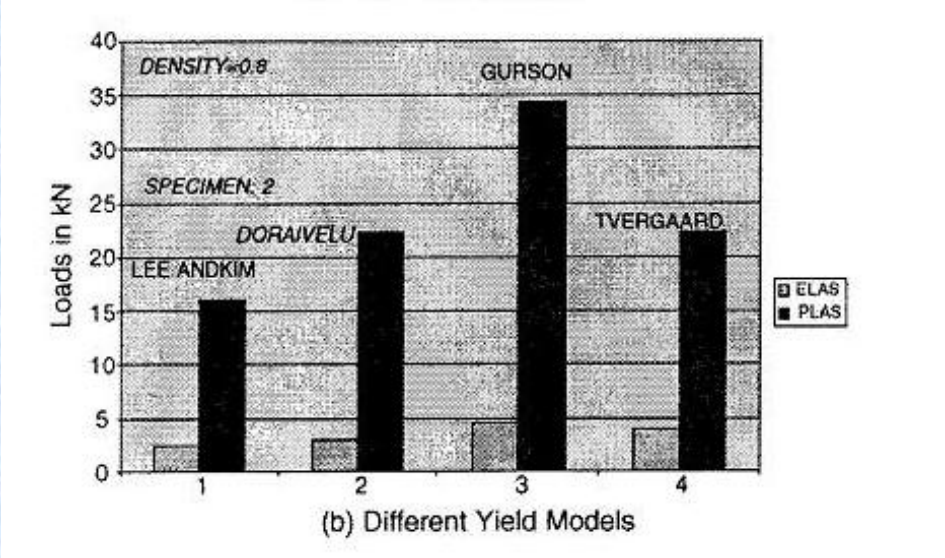
О.В.Михайлов, М.Б.Штерн 1984 г.

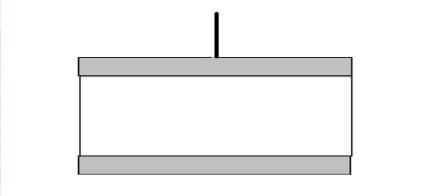


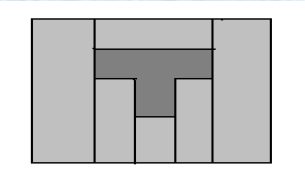

Контур нагружения для пористой меди на основе порошка ПМС(эксперимент)

# Сравнение результатов полученных моделированием разными моделями





Сравнение усилий появления пластической зоны (светлый столбик) и усилий при которых весь образец становится пластичным (темный столбик)

# Поверхности нагружения пористых тел

$$A\tau^2 + Bp^2 - \eta\sigma_0^2 = 0$$

Expressions for $A$, $B$, $\eta$

| Investigator (Identification) | $A$ | $B$ | $\eta$ |
|---|---|---|---|
| Lee and Kim (L) | $2 + R^2$ | $(1 - R^2)/3$ | $[(R - R_c)/(1 - R_c)]^2$ |
| Doraivelu (D) | $2 + R^2$ | $(1 - R^2)/3$ | $2R^2 - 1$ |
| Gurson (G) | $12/(5 - R)$ | $(1 - R)/(5 - R)$ | $4R^2/(5 - R)$ |
| Shima (S) | $\dfrac{3}{1 + (2.49/3)^2(1 - R)^{1.028}}$ | $\dfrac{(2.49/3)^2(1 - R)^{1.028}}{1 + (2.49/3)^2(1 - R)^{1.028}}$ | $\dfrac{R^2}{1 + (2.49/3)^2(1 - R)^{1.028}}$ |
| Tvergaard (T) | $\dfrac{12}{4 + 1.5(1 - R)}$ | $\dfrac{1.5(1 - R)}{4 + 1.5(1 - R)}$ | $\dfrac{4[1 - 3(1 - R) + 2.25(1 - R)^2]}{4 + 1.5(1 - R)}$ |

R-относительная плотность

1. **<u>Традиционный двухстадийный подход</u>**

<u>Первая стадия</u>

а) построение реологических соотношений материала в аналитической форме

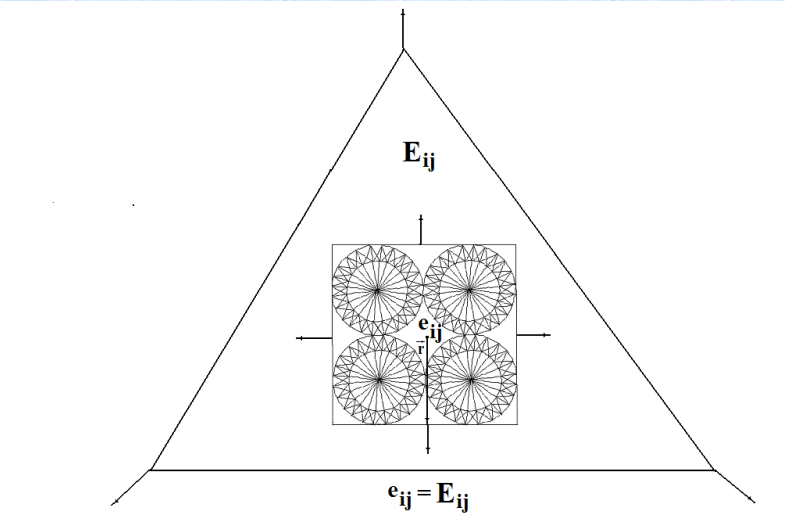
б) получение уравнений эволюции для всех внутренних параметров в аналитической форме

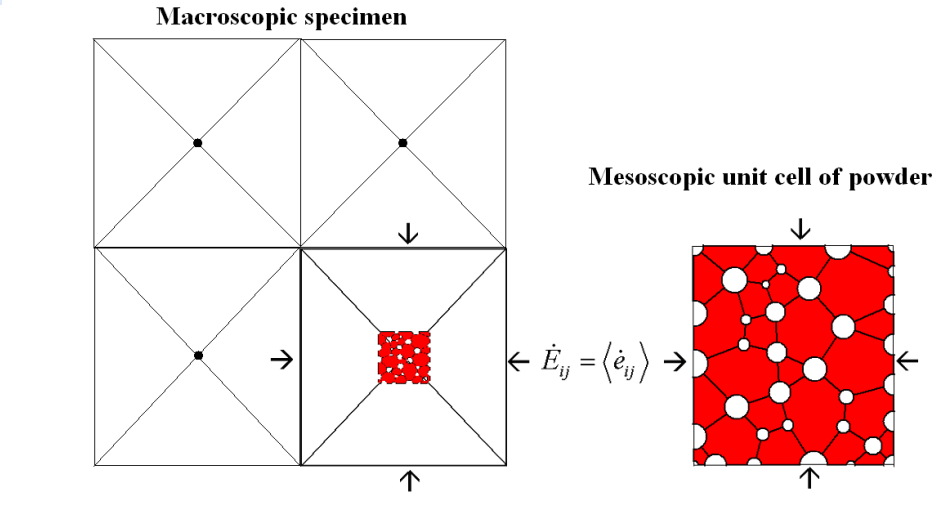
<u>Вторая стадия</u>

Макроскопическое моделирование при заданных реологических соотношениях

**Одностадийный подход (прямое многомасштабное моделирование)**

Параллельное численное моделирование на макроскопическом уровне и представительных ячейках без получения аналитических выражение



# Моделирование уплотнения при спекании

$$\sigma_{ij} = 2\eta(e_{ij} - \frac{1}{3} e\,\delta_{ij}) + \zeta e\,\delta_{ij} + P_L \delta_{ij}$$

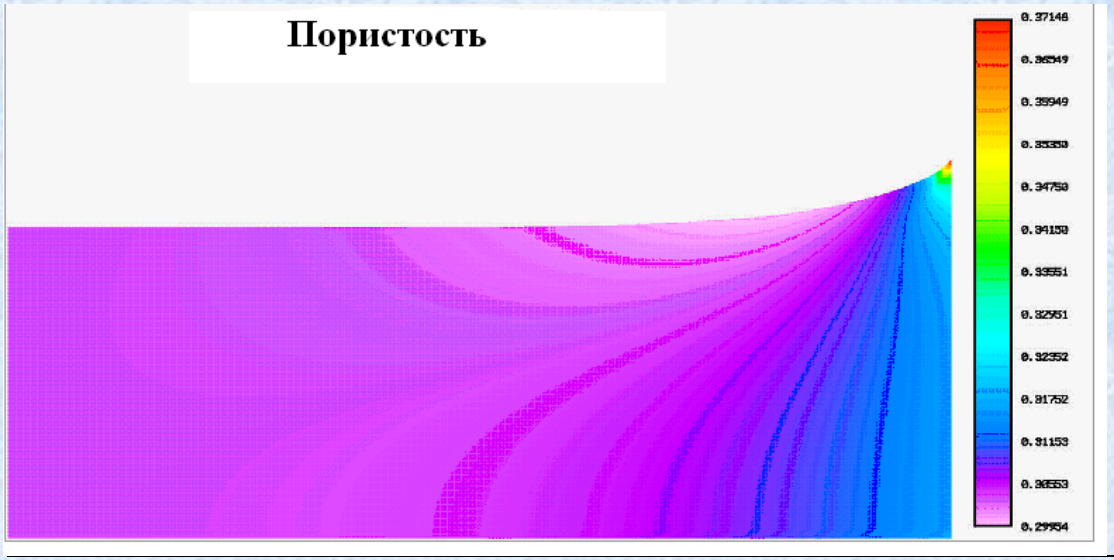
$\eta = \eta_m (1-\theta)^2$ Коэффициент сдвиговой вязкости

$\zeta = \frac{4}{3}\eta \frac{1-\theta}{\theta}$ Коэффициент объемной вязкости

$P_L$ лапласовское давление

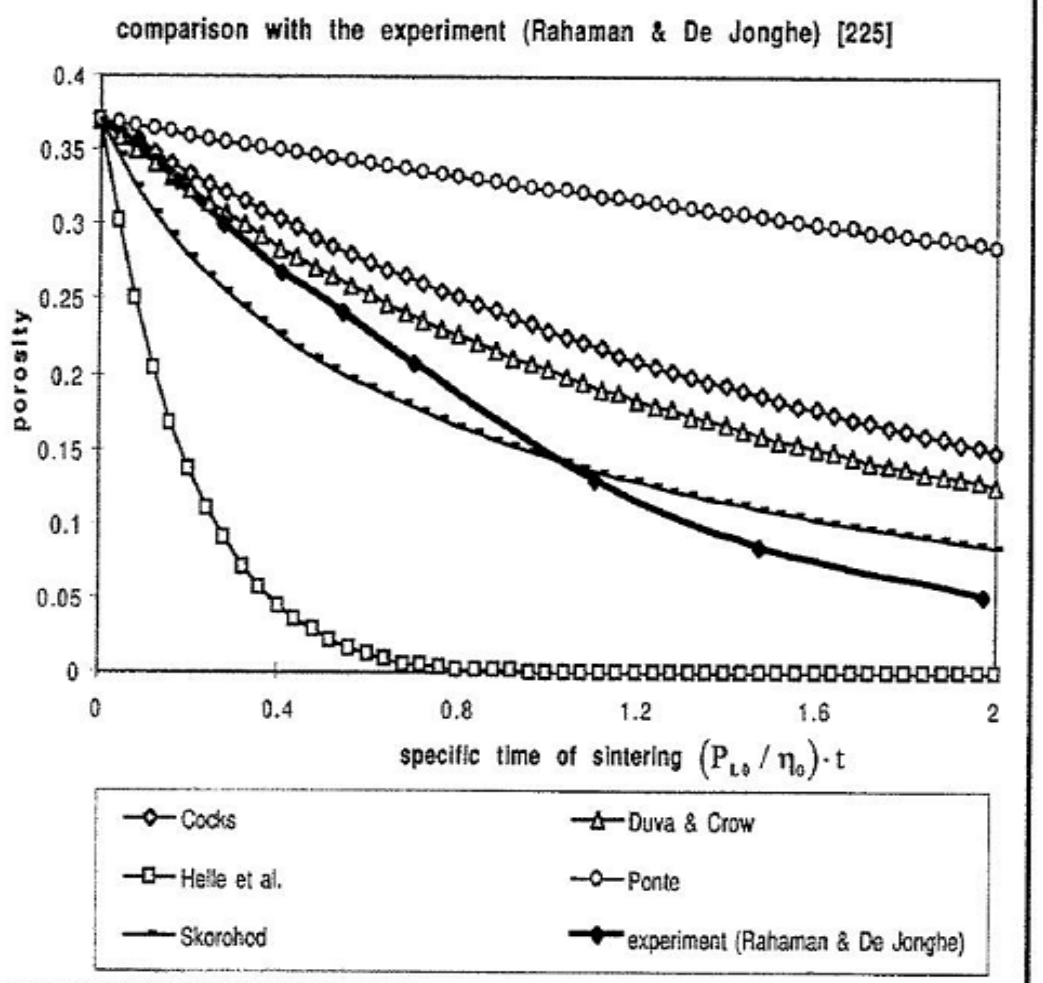
$\theta$ пористость

$\eta_m$ сдвиговая вязкость частиц порошка



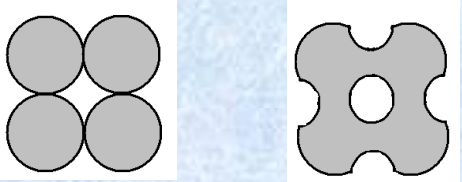
# Сравнение результатов полученных в рамках различных моделей спекания

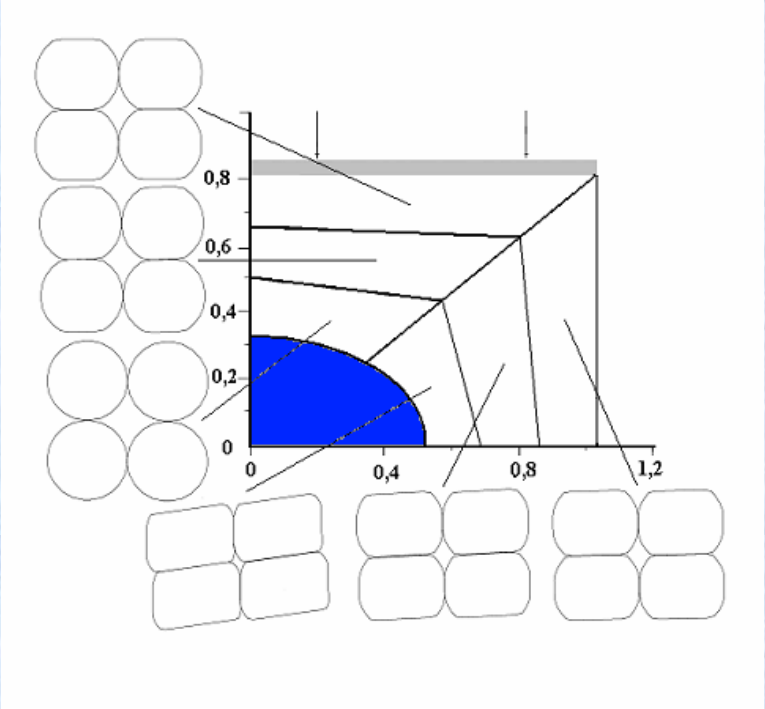
| | sintering stress / bulk modulus | ASHBY FIRST STAGE [96] | ASHBY SECOND STAGE [96] | BOUVARD & MCMEEKING [212] | SVOBODA & RIEDEL [106] | SKOROHOD [19] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $(1-\theta)^2\frac{2(1-\theta)-(1-\theta_0)}{\theta_0}$ | $\sqrt[3]{\frac{6(1-\theta)}{\theta}}$ | $(1-\theta)^{\frac{5}{3}}$ | $\sqrt[3]{1-\theta}\left(\frac{a}{\sqrt[3]{\theta}}+b\right)$ | $(1-\theta)^2$ |
| COCKS [157] | $\frac{(m+1)(1+\theta)(1-\theta)^{\frac{2}{m+1}}}{3\theta}$ | | | | | |
| DU & COCKS [103] FIRST STAGE | $(1-\theta)^{5.26}$ | | | | | |
| DU & COCKS [103] SECOND STAGE | $\frac{(1-\theta)^{5.26}}{b\theta^{\alpha}}$ | | | | | |
| DUVA & CROW [190] MCMEEKING & SOFRONIS [142] WILKINSON & ASHBY [146] (MACKENZIE, m=1) [6] | $\frac{2}{3}\left(\frac{1-\theta^m}{m\theta^m}\right)^{\frac{2}{m+1}}$ | | | | | |
| HELLE ET. AL. [86] FIRST STAGE | $\frac{(1-\theta)(\theta_0-\theta)^2}{b\theta_0^2}$ | | | | | |
| HELLE ET. AL. [86] SECOND STAGE | $\frac{1-\theta}{b\sqrt{\theta}}$ | | | | | |
| HSUEH ET. AL. [66] | $\frac{1-\theta}{2b\theta^{\alpha}}$ | | | | | |
| MCMEEKING & KUHN [101] FIRST STAGE | $\frac{3(1-\theta)^2(\theta_0-\theta)}{\theta_0}\left[\frac{16\sqrt{\theta_0}}{27\pi}\frac{1}{\sqrt{\theta_0-\theta}}\right]$ | | | | | |
| PONTE CASTANEDA [159] | $\frac{27(1-\theta)^{\frac{2}{m+1}}}{8\theta}$ | | | | | |
| RAHAMAN ET.AL. [71] | $(1-\theta)\exp(-2\theta)$ | | | | | |
| SKOROHOD [19] | $\frac{2}{3}\frac{(1-\theta)^3}{\theta}$ | | | | | |
| VENKATACHARI & RAJ [67] | $\frac{\ln\theta+0.5(1-\theta)(3-\theta)}{b(\theta-1)}$ | | | | | |

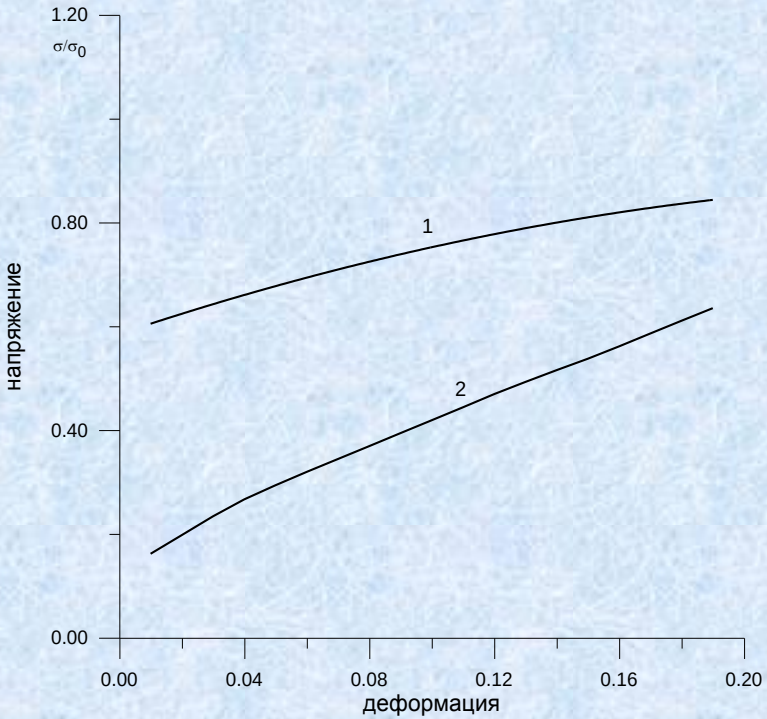


# Прессование порошкового композита с жесткими включениями

2 1

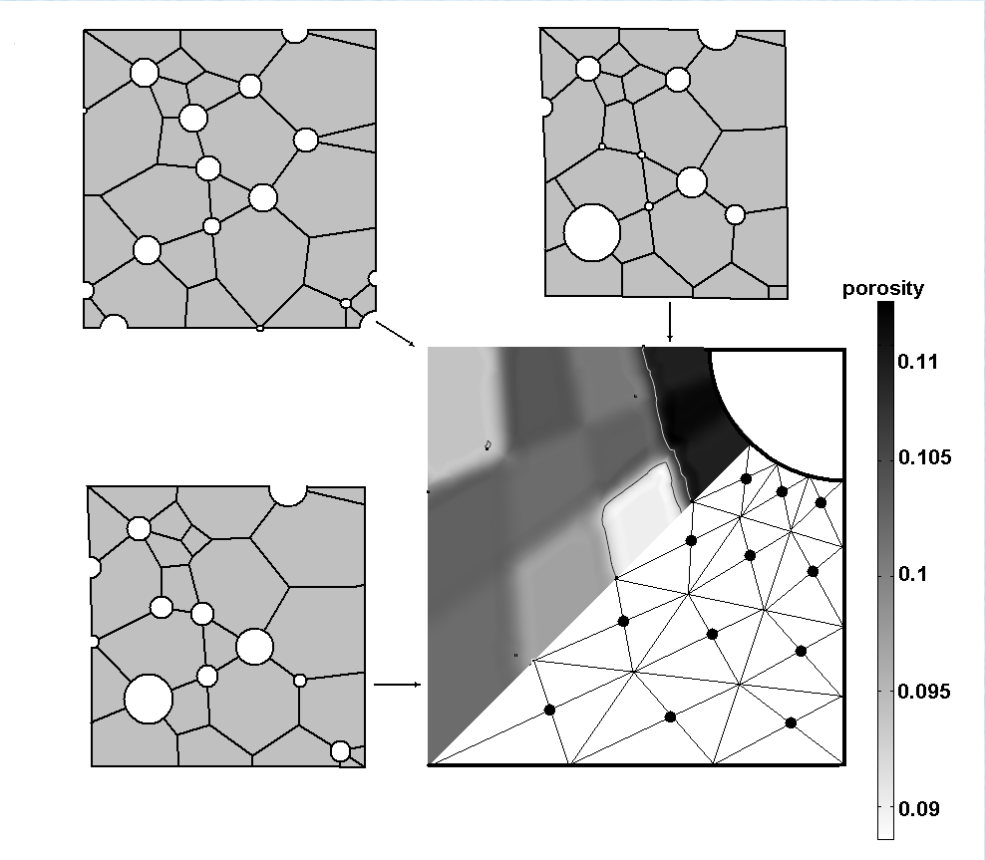





Зависимость давления прессования от начальной формы пор

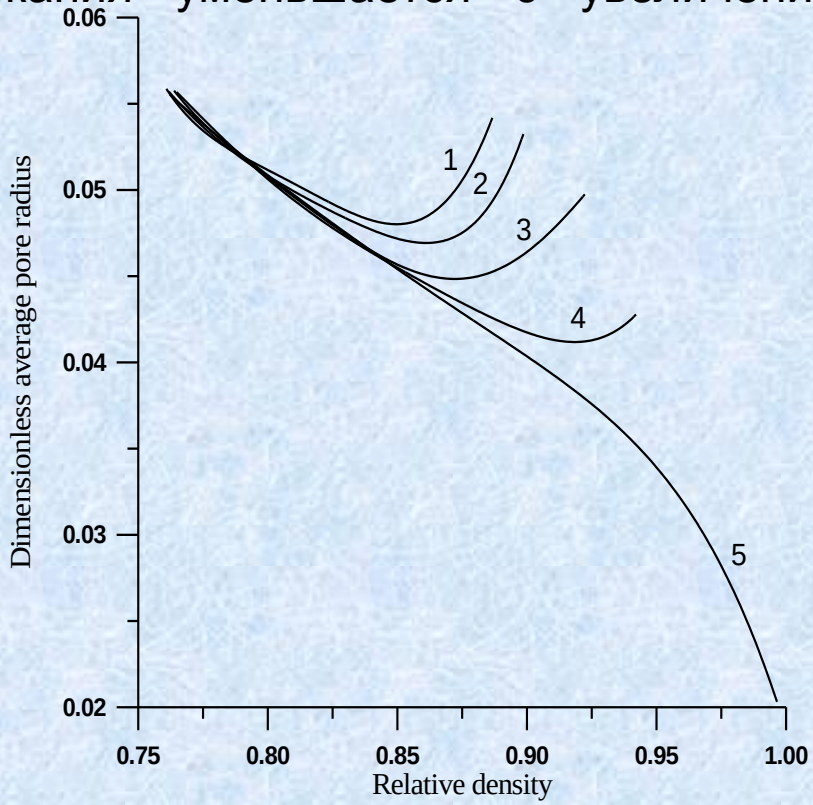
Замедления усадки возле твердого включения: результаты моделирования




Распределения пор и представительные ячейки соответствующие различным элементам матрицы. Рисунок соответствует моменту $t_M$ : это момент времени когда плотность материала матрицы при спекании без включения становится > 0.99

# МЕХАНИЗМ ЗАМЕДЛЕНИЯ УСАДКИ ВОЗЛЕ ТВЕРДОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ СПЕКАНИИ КОМПОЗИТОВ

Средний радиус пор и, следовательно, напряжение спекания в матрице во время спекания керамических композитов зависят не только от общей пористости: средний радиус пор увеличивается и напряжение спекания уменьшается с увеличением концентрации включений




Средний радиус пор в матрице как функция общей пористости
1-c=0.06; 2-c=0.03; 3-c=0.004; 4-c=0.0005; 5-c=0

## Выводы

Прямое многомасштабное моделирование позволяет решать задачи макроскопического поведения микронеоднородных тел на основании более точно заданных предположений о внутренней структуре материала и ее эволюции. При этом может учитываться любое число внутренних параметров материала.