

Математическая постановка задачи о нагружении композитов

Уравнения движения: $\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j}$

Уравнение неразрывности: $\dot{V} - \dot{u}_{i,i} = 0$

Соотношения для скоростей деформации: $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

Определяющие соотношения Дюамеля-Неймана: $\dot{\sigma}_{ij} = K(\dot{\epsilon}_{kk} - \alpha \dot{T})\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_{kk}\delta_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p)$

Закон пластического течения: $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} S_{ij}$

Условие текучести: $\sigma_{eq} - \varphi(\epsilon_{eq}^p) = 0$

Функция изотропного упрочнения: $\varphi(\epsilon_{eq}^p) = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_0) \exp(-\epsilon_{eq}^p / \epsilon_r^p)$

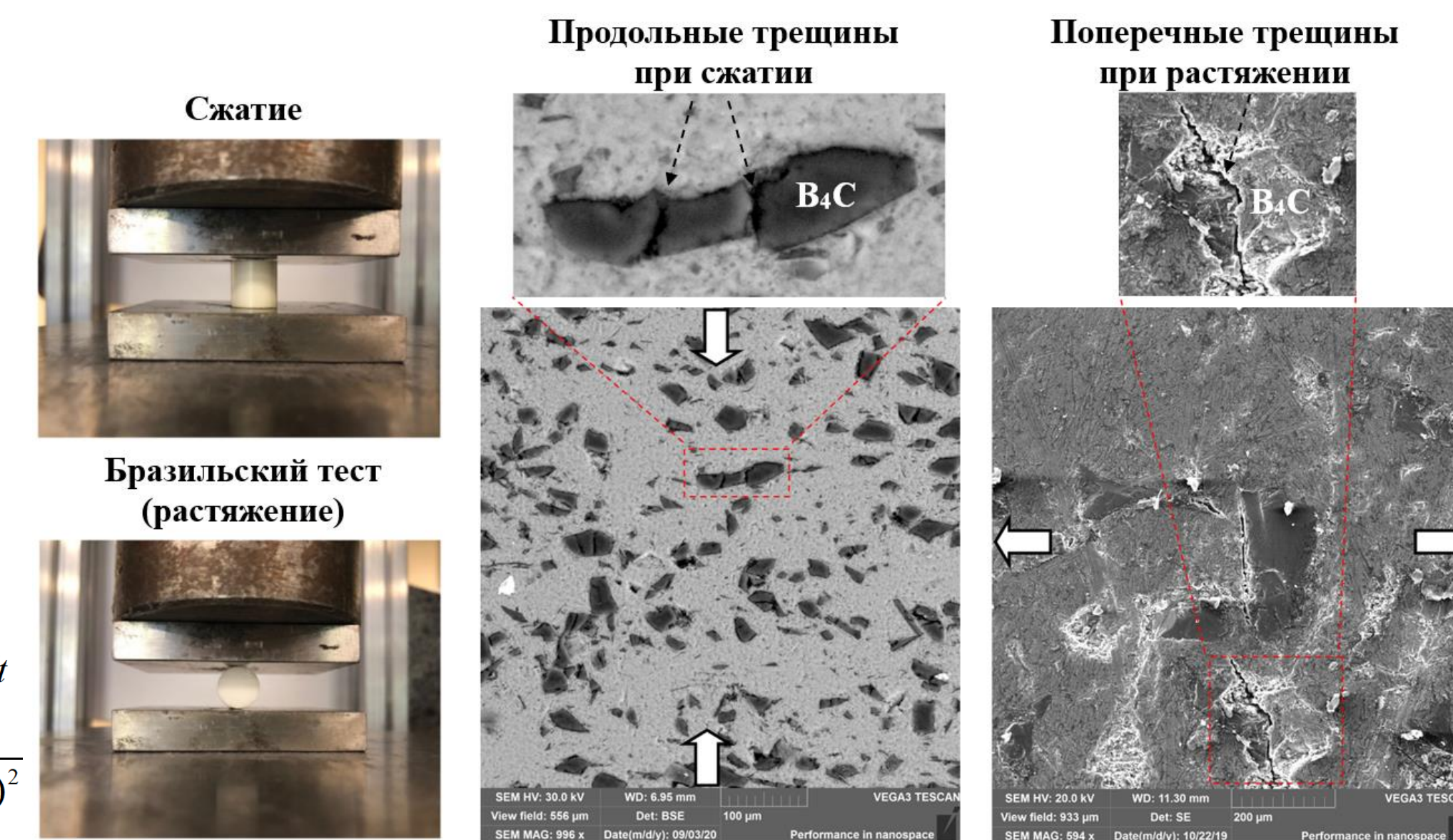
Критерий разрушения частиц типа Губера: $\sigma_{eq} = C_{ten}$, если $\epsilon_{kk} > 0$

Определяющие соотношения Дюамеля-Неймана: $\epsilon_{eq}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \int_0^t \sqrt{(\epsilon_{11}^p - \epsilon_{22}^p)^2 + (\epsilon_{22}^p - \epsilon_{33}^p)^2 + (\epsilon_{33}^p - \epsilon_{11}^p)^2 + 6(\epsilon_{12}^p + \epsilon_{23}^p + \epsilon_{31}^p)^2} dt$

$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(S_{11} - S_{22})^2 + (S_{22} - S_{33})^2 + (S_{33} - S_{11})^2 + 6(S_{11} + S_{22} + S_{33})^2}$

Задание скорости деформации: $\dot{u}_x(x, y, t) = const = \pm V$; $\sigma_{ij}(x, y, t) \cdot n_j = 0$; $\sigma_{xy}(x, y, t) = 0$; $V = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см / мкс}$

Экспериментальные данные. Картины разрушения композита с алюминиевой матрицей и частицами В4С при сжатии и растяжении

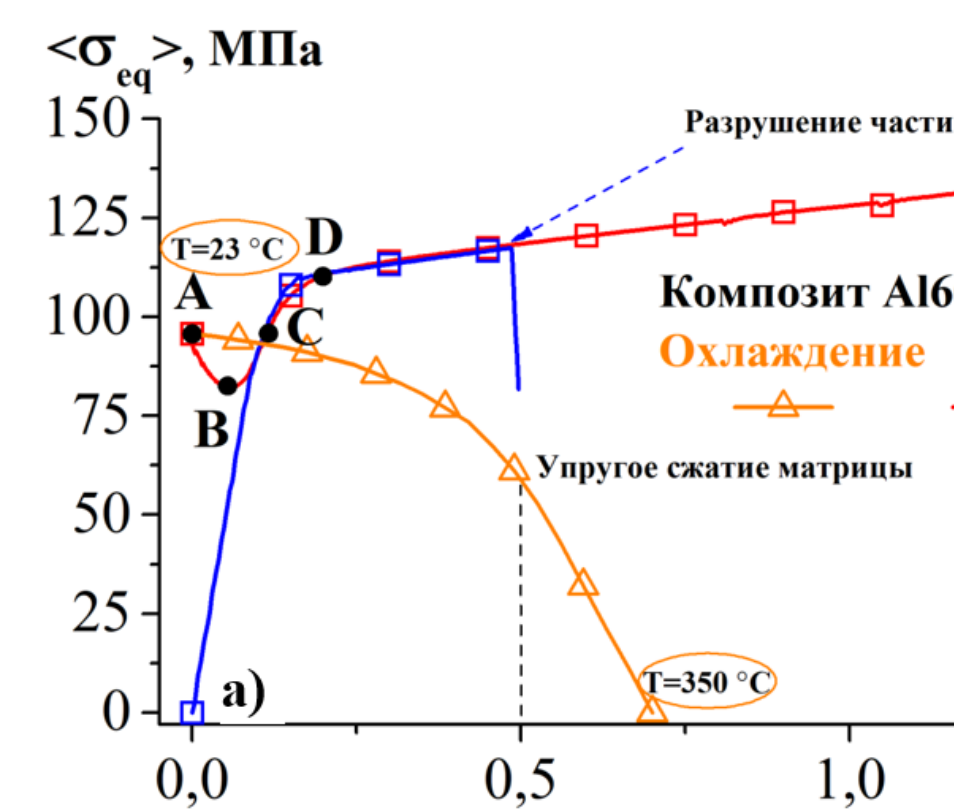


Экспериментальная (а) и модельные структуры материала с покрытием на различных масштабных уровнях (б)-(г) и пример расчетной сетки NX×NY= 300×234 (д)

Расчетные кривые течения композита при охлаждении, с учетом и без учета остаточных напряжений (а) и участок кривой течения на начальной стадии механического нагружения после охлаждения (б)

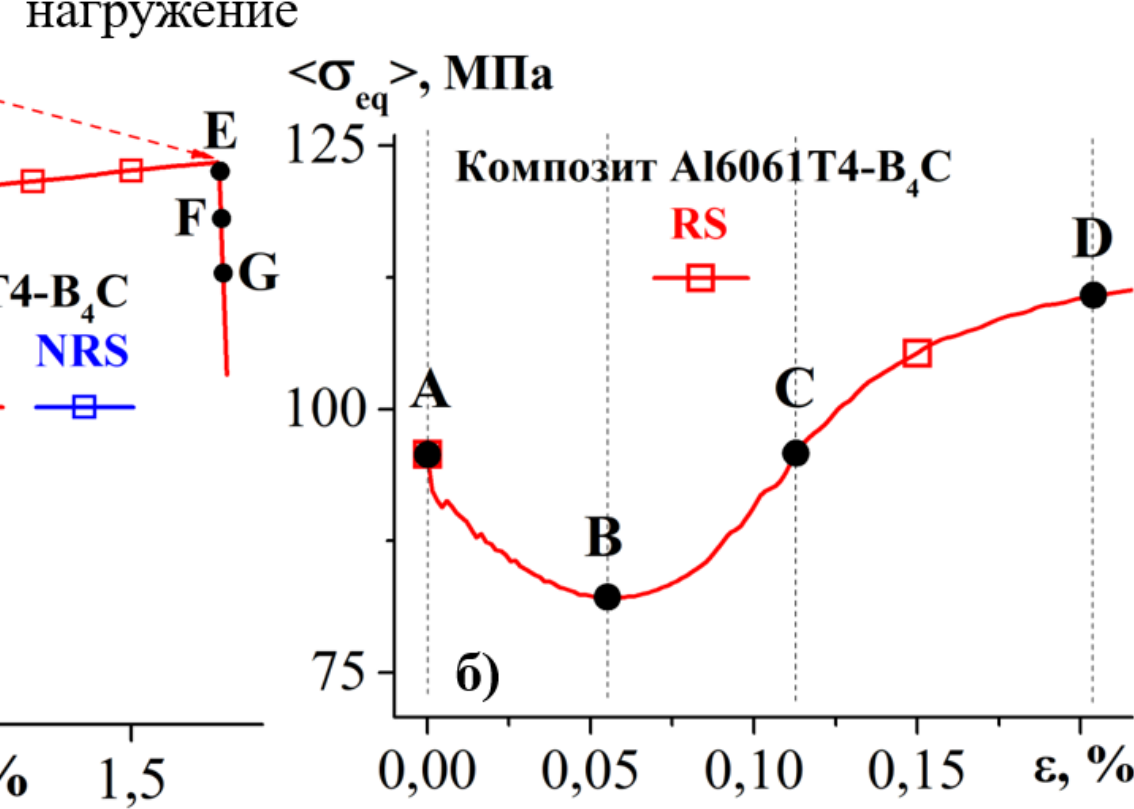
«NRS» (no Residual stress)
Расчеты БЕЗ учета остаточных напряжений

- Механическое нагружение из начального ненапряженного и недеформированного состояния



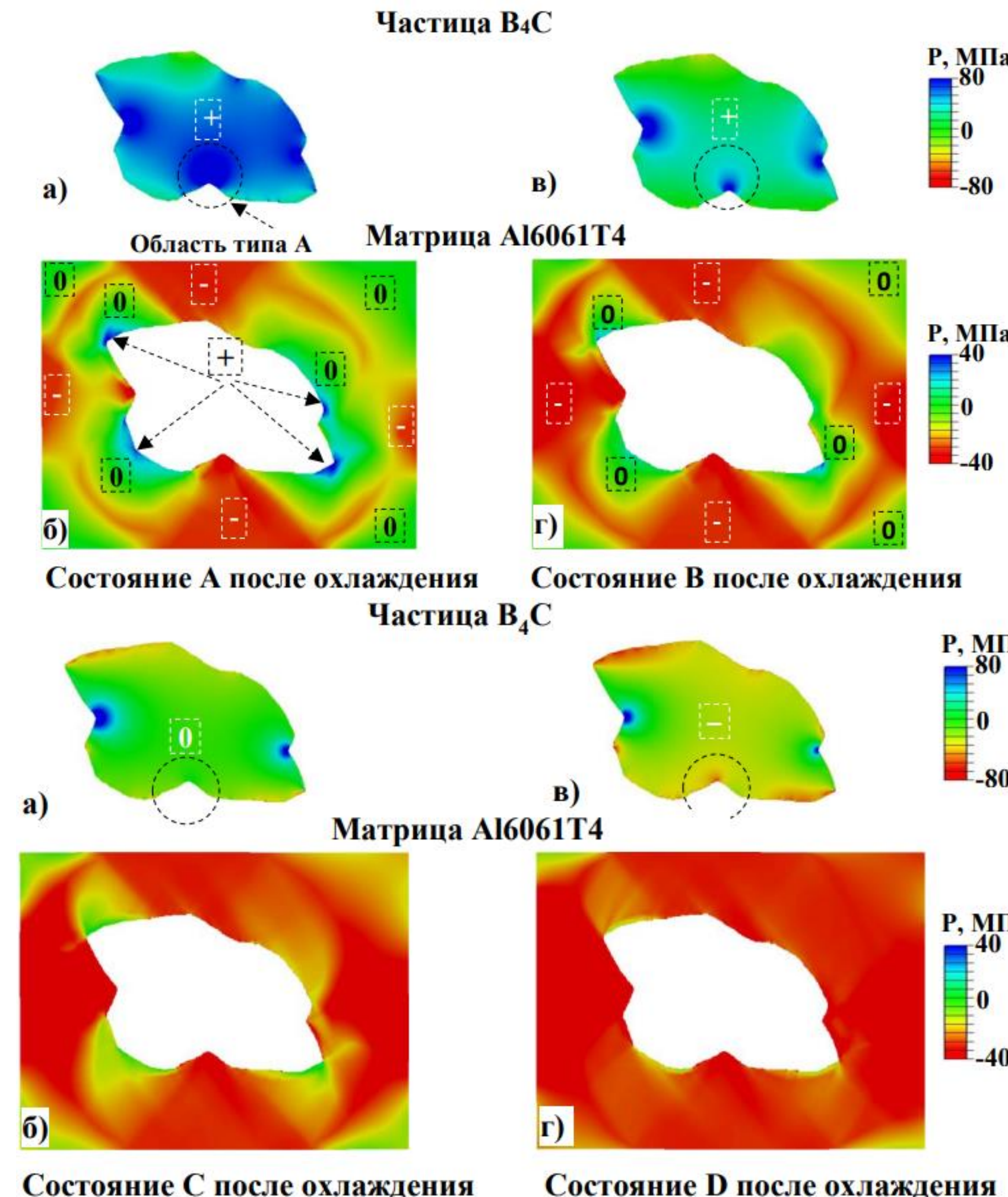
«RS» (Residual stress)
Расчеты С учетом остаточных напряжений

- Термомеханическое нагружение, на первом шаге происходит охлаждение композита от 350 °С до 23 °С, на втором - механическое нагружение



Точке А соответствует состояние композита после охлаждения, точкам В, С и D – состояние композита при последующем растяжении, а точкам Е, F и G на ниспадающем участке кривой течения для случая «RS» – процесс распространения трещины в частице. Показано, что остаточные напряжения оказывают положительное влияние на механическое поведение композита. В случае растяжения композита из ненапряженного состояния разрушение частицы происходит при общей деформации композита $\epsilon = 0,5\%$, а в случае нагружения после предварительного охлаждения деформация составляет более 1,5% (рис. 7а). Остаточные напряжения задерживают появление трещины в композите приблизительно в 3 раза.

Распределение давления в частице В4С и матрице Al6061T4 после охлаждения для состояния А (а, б) и состояния В (в, г)



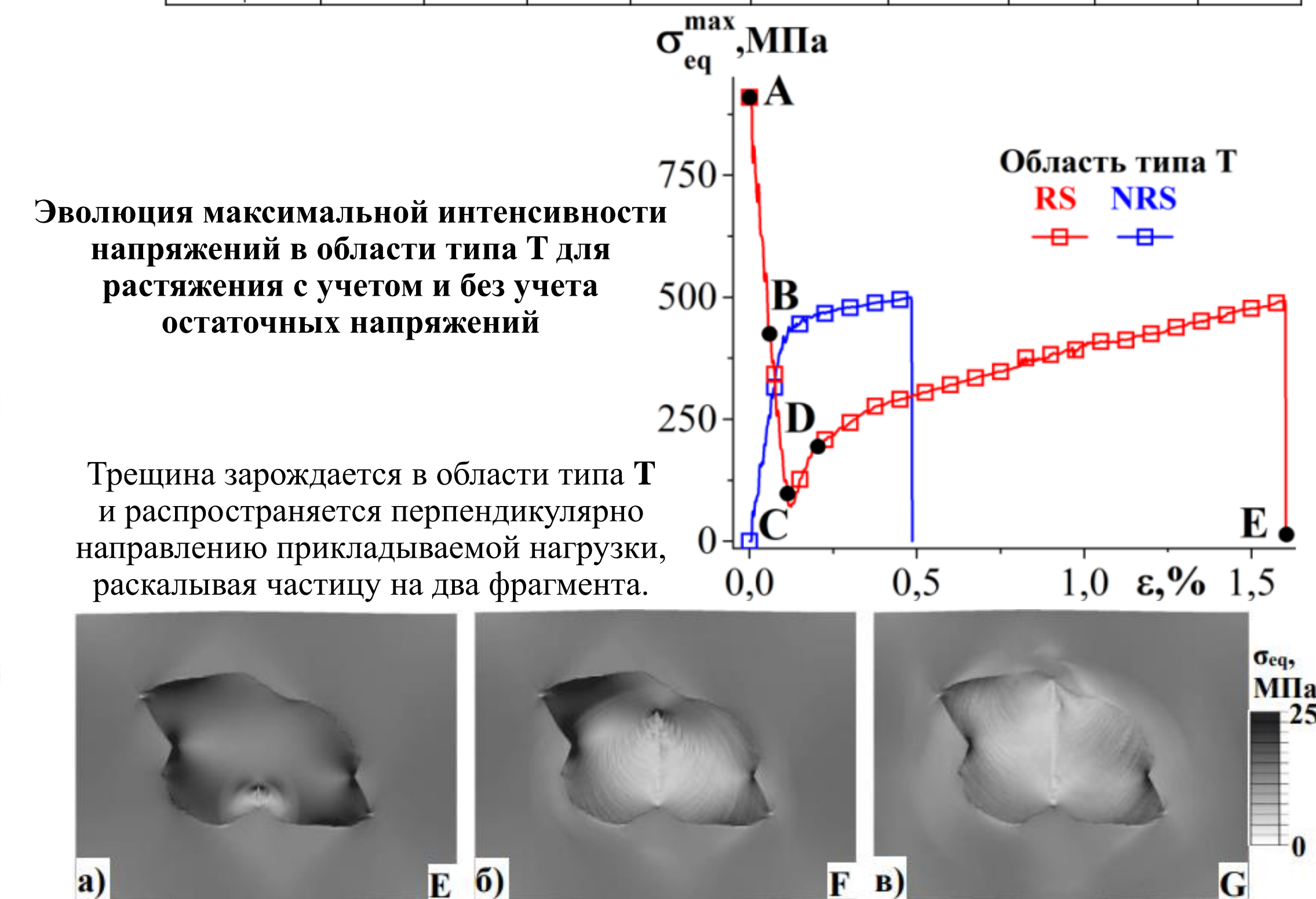
Распределение давления в частице В4С и матрице Al6061T4 после охлаждения для состояния С (а, б) и состояния D (в, г)

Механические свойства материалов и экспериментальные константы, используемые в численных расчетах

| Материал/Свойства | ρ , г/см ³ | K, ГПа | μ , ГПа | σ_s , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | ϵ_r^p , % | C_{ten} , МПа | C_{com} , ГПа | α , 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ |
|-------------------|----------------------------|--------|-------------|------------------|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------|--|
| Матрица | | | | | | | | | |
| Al6061T4 | 2.7 | 66 | 26 | 231 | 107 | 9.8 | - | - | 22 |
| Частица | | | | | | | | | |
| В ₄ С | 2.6 | 235 | 197 | - | - | - | 500 | 5 | 4.5 |

Эволюция максимальной интенсивности напряжений в области типа Т для растяжения с учетом и без учета остаточных напряжений

Трещина зарождается в области типа Т и распространяется перпендикулярно направлению прикладываемой нагрузки, раскалывая частицу на два фрагмента.



Распространение трещины в частице карбида бора при растяжении после охлаждения. Состояния Е-Г