

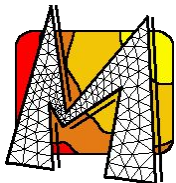
Математическое моделирование физико-механических систем и процессов (приложения в ОМД и медицине)

Е.Н.Чумаченко

(Московский государственный институт электроники и математики)

kommek@miem.edu.ru

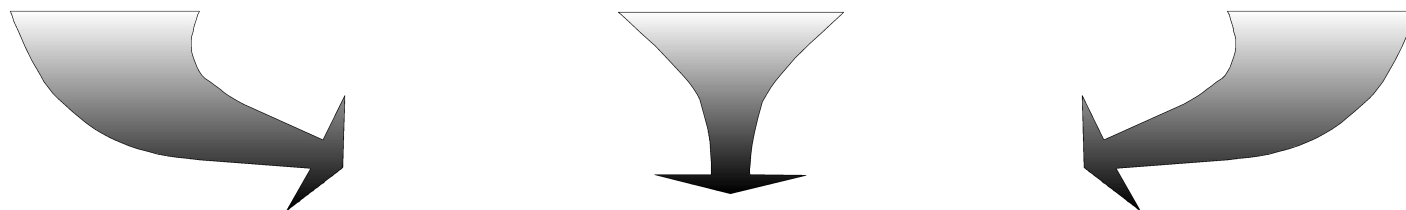
1. История создания многофункционального вычислительного комплекса SPLEN.
2. Некоторые направления развития математических моделей и вычислительных систем серии SPLEN в промышленности и медицине.
 - 2.1 Формоизменение материалов при штамповке в условиях сверхпластичности.
 - 2.2 Моделирование техпроцессов производства подшипниковых колец.
 - 2.3 Прессование с использованием положительного эффекта действия сил трения.
 - 2.4 Газовая формовка оболочек.
 - 2.5 Моделирование НДС зубочелюстной системы человека при протезировании.
 - 2.6 О других направлениях.
3. Заключение.



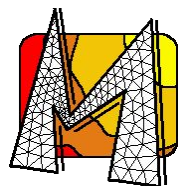
КОММЕК

Семинар ИКИ РАН: Механика, Управление и Информатика. Москва 27.12.2001г.

| МГИСиС | ВНИИМетмаш | МГИЭМ |
|--|--|--|
| Создание теоретических основ моделирования процессов формоизменения материалов, при обработке давлением | Впервые сформулирована и реализована идея создания вычислительных систем для решения задач ОМД, базирующихся на едином архитектурном блочном строении и использующих общие алгоритмические модули | Перевод системы на персональные компьютеры . Расширение круга решаемых задач |



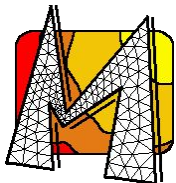
КОММЕК
(КОмпьютерные Методы МЕханики Континуума)



КОММЕК

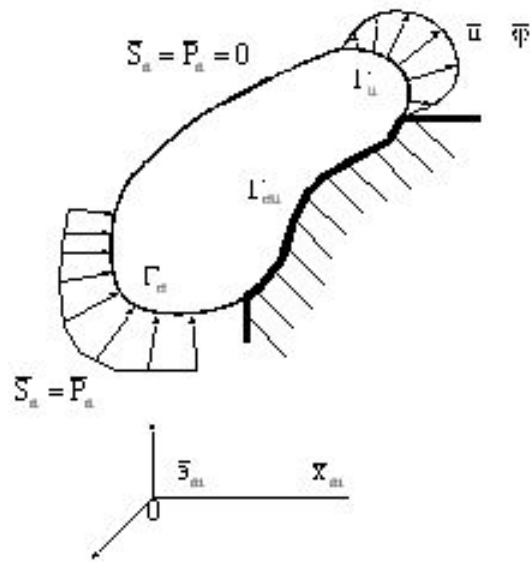
ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ, РЕАЛИЗУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

- 1 Деформирование малопластичных металлов, практически неподдающихся обработке давлением в обычных условиях.
- 2 Штамповка заготовок с элементами небольшой толщины (высокие и узкие ребра, тонкие полотна), которые в обычных условиях можно получать только с большими напусками.
- 3 Повышение точности штамповки, особенно для деталей, из дорогостоящих металлов.
- 4 Штамповка поковок крупногабаритных деталей, требующих в обычных условиях деформирующего оборудования большой мощности.
- 5 Штамповка поковок для изделий, к качеству и надежности которых предъявляются повышенные требования.



КОММЕК

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Граничные условия

$$\begin{aligned} \bar{S}_n = \bar{P}_n; \quad \bar{S}_n = \bar{S}_i \cdot l_{n_i} = \sigma_{ij} \cdot l_{n_i} \cdot \bar{\varepsilon}_j; \quad \bar{P}_n = P_{n_i} \cdot \bar{\varepsilon}_i & \text{ на } \Gamma_\sigma \\ \bar{u} = \bar{\varphi}; \quad \bar{u} = u_i \cdot \bar{\varepsilon}_i; \quad \bar{\varphi} = \varphi_j \cdot \bar{\varepsilon}_j & \text{ на } \Gamma_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_{n_\alpha} = \sigma_{i\alpha} \cdot l_{n_i}; \quad u_\beta = \varphi_\beta; \quad \alpha, \beta = 1, 2; \quad \alpha + \beta = 3 \quad \text{на } \Gamma_{\sigma u}$$

u_i - компоненты скорости перемещения частиц среды

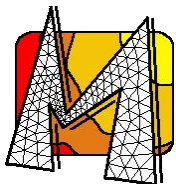
$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2 \quad (2)$$

Девизоры напряжений, скорости деформации и их инварианты обозначим волнистой чертой сверху

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij}; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \cdot \delta_{ij}; \quad \sigma = \sqrt{\tilde{\sigma}_{ij} \cdot \tilde{\sigma}_{ij}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_u; \\ \tilde{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon \cdot \delta_{ij}; \quad \varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \cdot \delta_{ij} = \frac{1}{3} \dot{\theta}; \quad \varepsilon = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{ij} \cdot \tilde{\varepsilon}_{ij}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \dot{\varepsilon}_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 2\mu \cdot \tilde{\varepsilon}_{ij} \Rightarrow 2\mu = \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{\varepsilon}} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\varepsilon}_u} \quad \text{или} \quad \sigma_u = 3\mu \cdot \dot{\varepsilon}_u$$

$$\text{Следовательно} \quad \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\varepsilon}_u} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon \cdot \delta_{ij}). \quad (4)$$



Для шаровых частей тензора напряжений и деформаций примем

$$\sigma = K \cdot \theta = K \int_0^t \dot{\theta} dt = K \left[\int_0^{t_1} \dot{\theta} dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{\theta} dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^t \dot{\theta} dt \right] = K \sum_{i=0}^{n-1} \Delta t_i \cdot \dot{\theta}_i + K \cdot \Delta t_n \cdot \dot{\theta}_n = \sigma^* + K \cdot \Delta t \cdot \dot{\theta}. \quad (5)$$

тогда
$$\sigma_{ij} = \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) + \left[\left(K \cdot \Delta t - \frac{2}{3} \mu \right) u_{pp} + \sigma^* \right] \delta_{ij} \quad (6)$$

Поле температур $T(\bar{x}, t)$ считается известным

$$K = K(T, \rho, \dots), \quad \mu = \mu(\dot{\epsilon}_u, \epsilon_u, T, d, \dots) \quad (7)$$

$$\mu = [\sigma_s(T) \cdot (\sigma_0(T) + k(T) \cdot \dot{\epsilon}_u^{m(T)})] / [3\dot{\epsilon}_u \cdot (\sigma_s(T) + k(T) \cdot \dot{\epsilon}_u^{m(T)})];$$

$$\mu = \sigma_0(T) / 3\dot{\epsilon}_u + f_1(T) \cdot \dot{\epsilon}_u^{m-1} \cdot d^n, \quad d = \int_0^t f_2(d_0, T, \dot{\epsilon}_u, \tau) d\tau \quad (8)$$

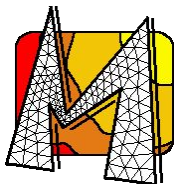
$$\mu = A(T) \cdot \dot{\epsilon}_u^{m-1} \cdot \epsilon_u^n \cdot f(d_0, T);$$

Для $\forall \Delta t \in [0, t]: \quad \sigma_{ij,j} = 0 \quad (9)$

При $3\mu_0 \geq \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \geq \frac{d\sigma_u}{d\dot{\epsilon}_u} > 0$ система уравнений (9) эллиптического типа, причем решение (9)+(1)

с учетом (2), (6), (7) существует, если существует решение при $\mu = \text{Const}$.

Ограничения: $t > 2\mu_0 / 3K$, где $2\mu / 3K \ll 1$ сек (10)



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

$$\tau = k \cdot p \quad \text{формула Амонтона-Кулона,} \quad (11)$$

$$\tau = \mu^* \cdot \tau_S \quad \text{формула Зибеля} \quad (12)$$

$$\tau = \eta \cdot \frac{V_{СК}}{h} \quad \text{формула Ньютона} \quad (13)$$

$$\tau = k_{ТР} \cdot 0,58 \cdot \sigma_u \cdot \left[1 - \exp\left(-1,25 \frac{|\bar{P}|}{\sigma_u}\right) \right] \quad \text{формула Леванова-Колмогорова} \quad (14)$$

$$\tau = (1 - \gamma) \cdot k_{ТР} \cdot \left(1 - \exp\left(-1,25 \frac{P}{\sigma_u}\right) \right) \cdot \tau_u + \gamma \frac{\eta}{h} V_{СК} \quad (15)$$

τ_S - сопротивление срезу

P - нормальное давление

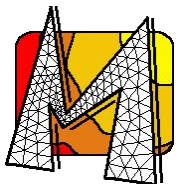
$k, k_{ТР}, \mu^*$ - коэффициенты и показатель трения

η - динамическая вязкость смазки

h - толщина смазочной пленки

$V_{СК}$ - скорость скольжения поверхностей относительно друг друга

γ - коэффициент непрерывности смазочного слоя



КРИТЕРИАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для зон прилипания:

$$\bar{u}|_{t+\Delta t} = \bar{v}|_{t+\Delta t} \quad , \text{ если } \begin{cases} u^K|_t = 0 & \text{и} & |\tau|_t \leq \tau^*|_t \\ \text{или} \\ u^K|_t \neq 0 & \text{и} & \exists t^* \in [t - \Delta t, t] : |\tau|_{t^*} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Для зон скольжения:

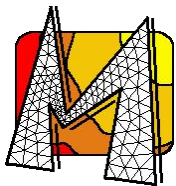
$$\begin{aligned} (\bar{u}|_{t+\Delta t} - \bar{v}|_{t+\Delta t}) \cdot \bar{n} &= 0 \\ \tau|_{t+\Delta t} &= -\tau^*|_t \cdot L \end{aligned} \quad \text{если } \begin{cases} u^K|_t = 0 & \text{и} & |\tau|_t > \tau^*|_t \\ \text{или} \\ u^K|_t \neq 0 & \text{и} & \text{для } \forall t^* \in [t - \Delta t, t] : |\tau|_{t^*} \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

\bar{n} - вектор нормали к поверхности

\bar{v} - скорость движения штампа

u^K - касательная компонента скорости контактной точки

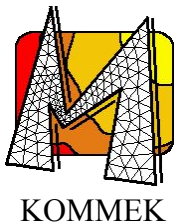
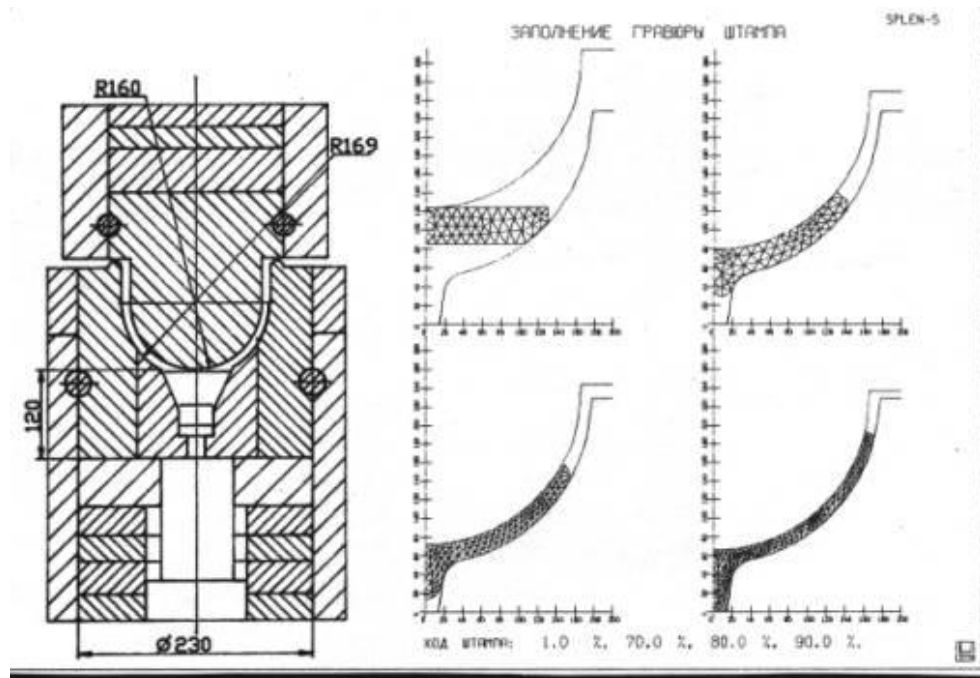
$$L = \frac{\bar{u} - \bar{v}}{|\bar{u} - \bar{v}|_t}$$



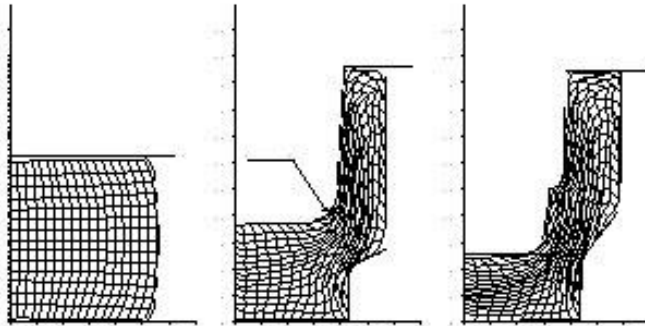
ПРЕСС ДЛЯ ШТАМПОВКИ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ



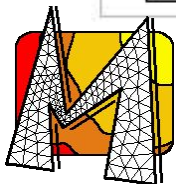
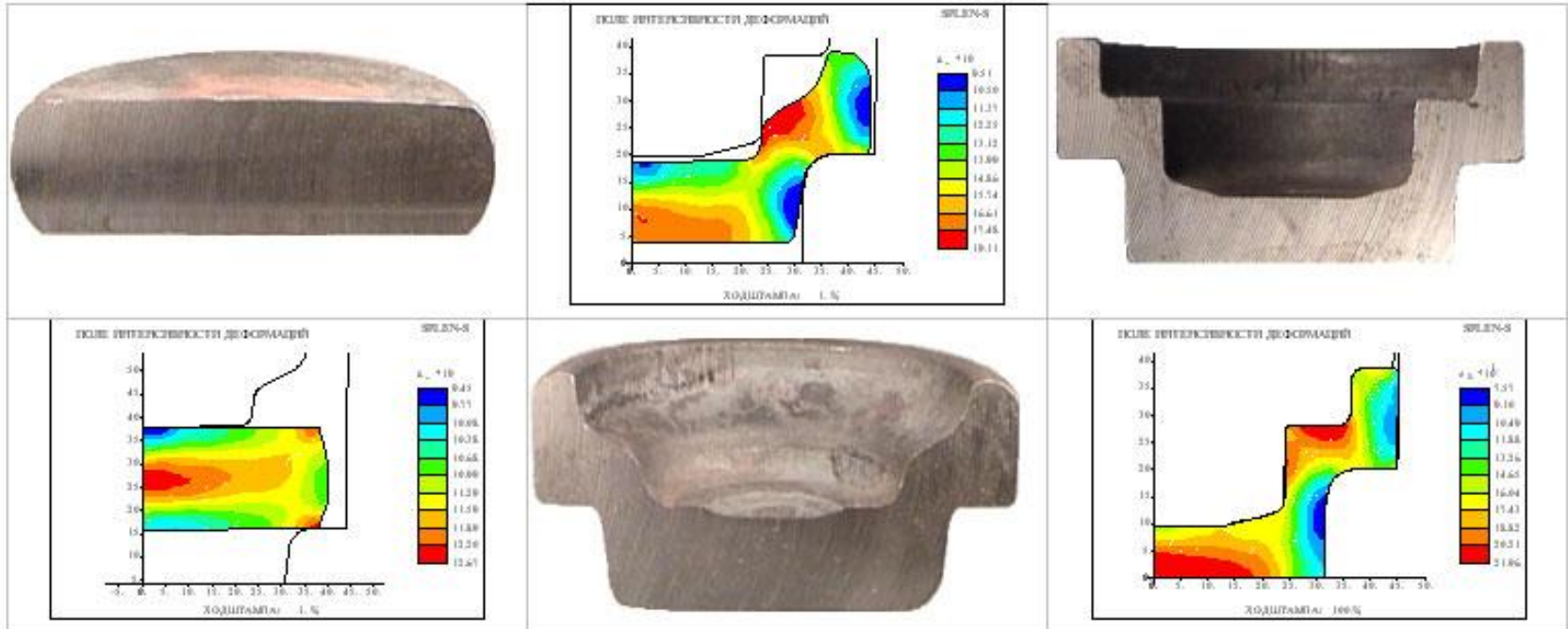
Разработанная система привода специализированного пресса для штамповки в условиях сверхпластичности защищена патентами и на способ и на устройство



РАСЧЕТ ЭТАПОВ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ

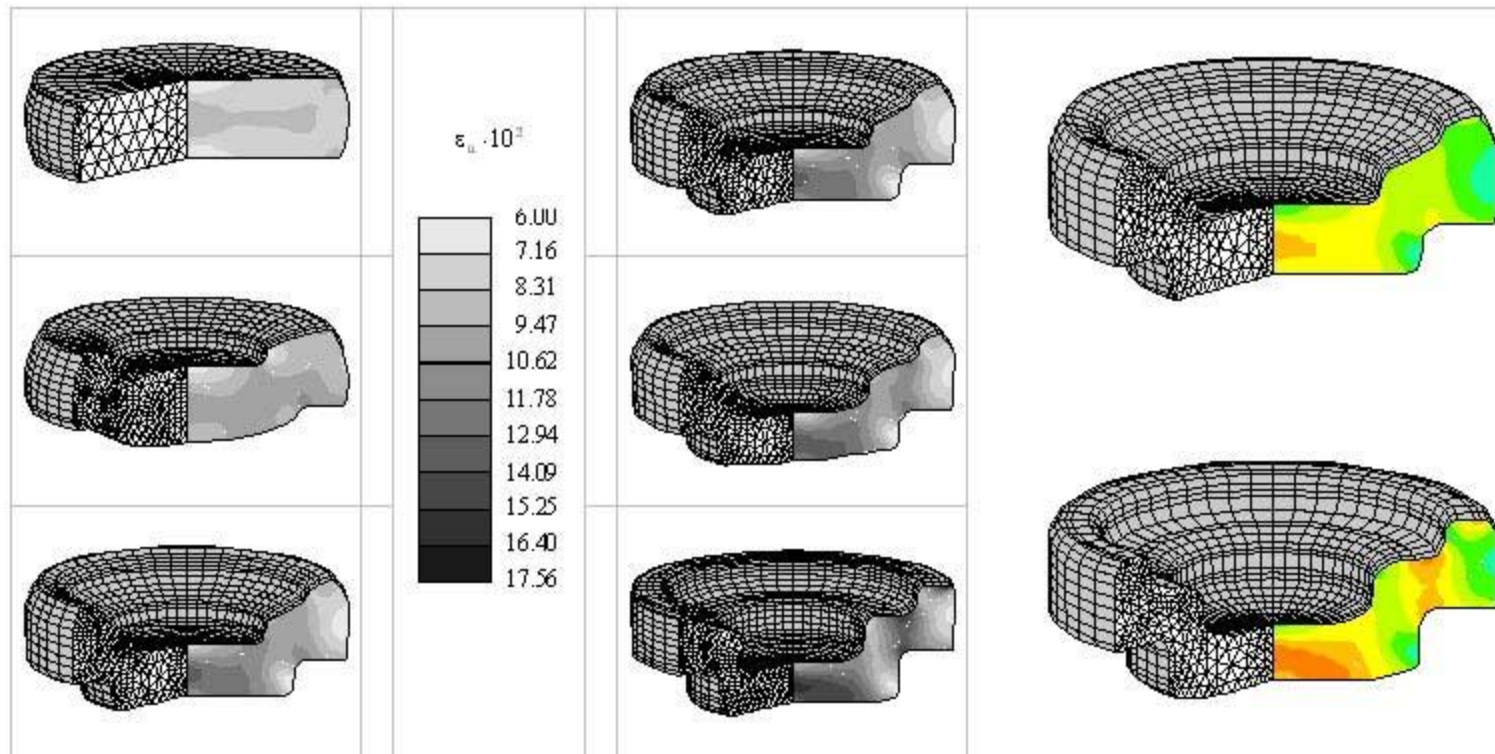


Вычислительная система
SPLIN-S(Bearing)
ориентирована на
многопереходную штамповку
подшипниковых колец на
кривошипных
горячештамповочных прессах

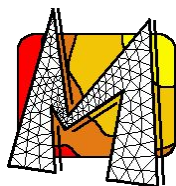


КОММЕК

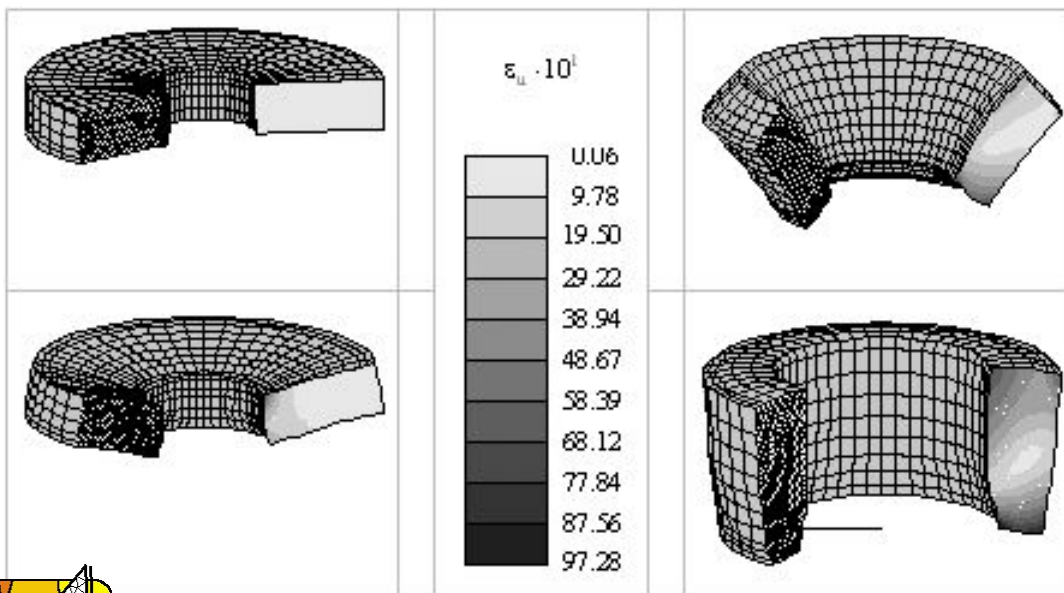
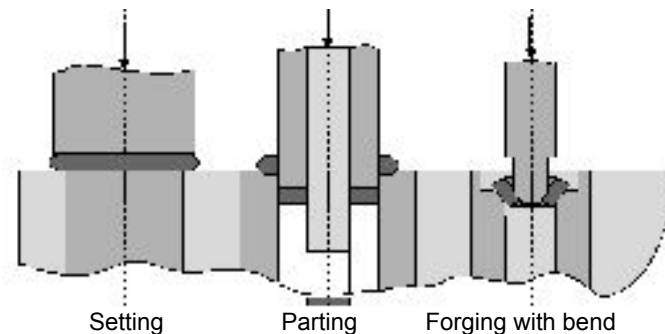
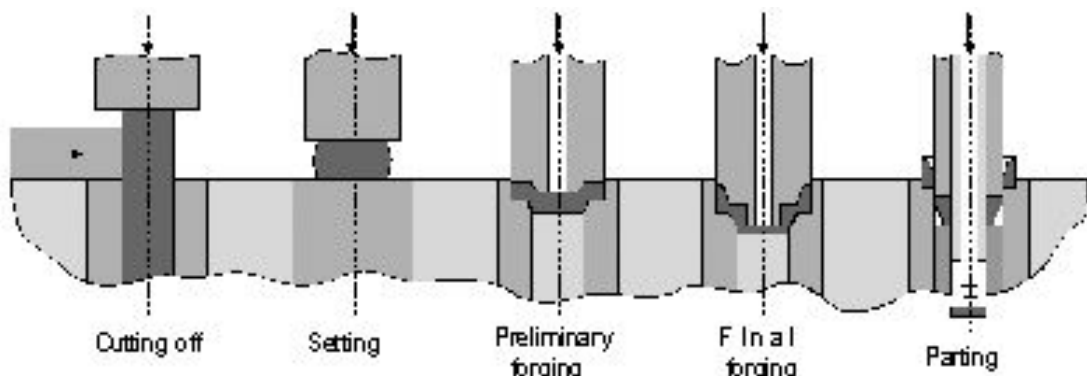
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ 2-ГО И 3-ГО ПЕРЕХОДОВ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ШТАМПОВКИ



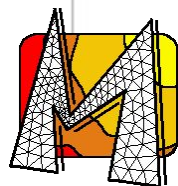
Эксплуатация в промышленных условиях вычислительного комплекса позволила оптимизировать ответственные элементы технологических процессов, оптимизировать форму промежуточных штампов, повысить долговечность оборудования и сократить сроки его простоя при переналадках



КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРУТКА ПРИ ШТАМПОВКЕ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ

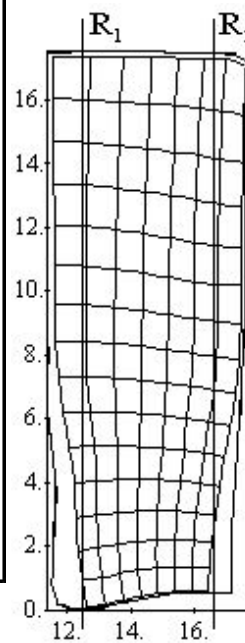
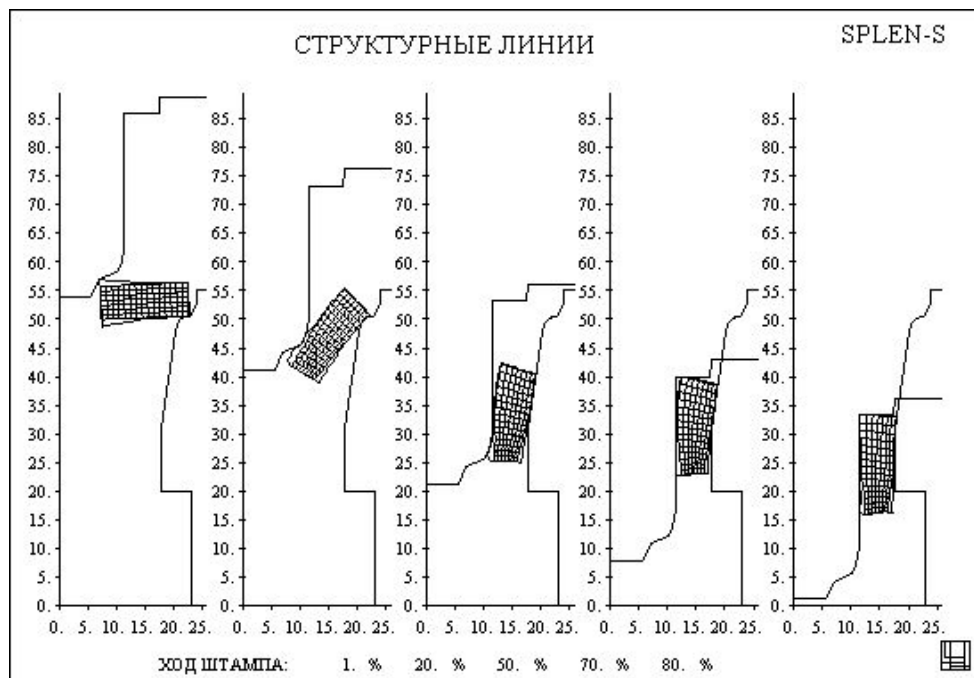
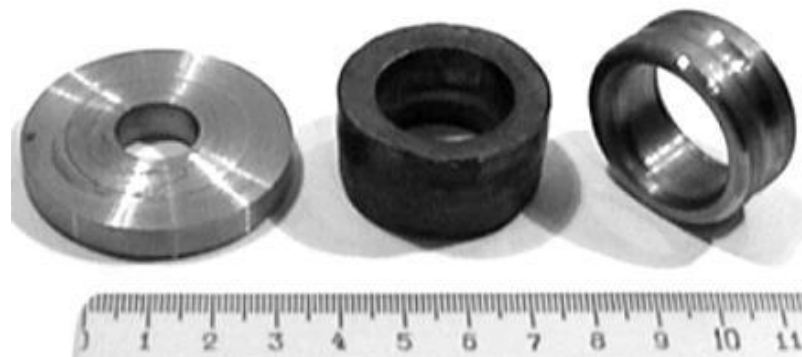


Впервые с применением вычислительных систем **SPLIN-S(Bearing)** и **SPLIN-S(V)** решена задача комплексного использования дисковых отходов после штамповки башенных поковок под подшипниковые кольца



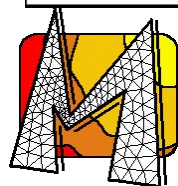
ПОЛУЧЕНИЕ КОЛЕЦ БЛИЗКИХ К ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ИЗ ШАЙБ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Трудности при реализации малоотходной технологии связаны в основном с одной операцией, операцией штамповки с разворотом. При неправильном выборе размера шайбы и профиля штамповой оснастки, штамповка с разворотом приводит к неустранимому браку либо в виде больших внутренних утяжин в верхней части кольца и даже к срезу части металла, либо к высокому заусенцу, обработка которого требует дополнительных операций, усложняющих процесс изготовления подшипниковых колец



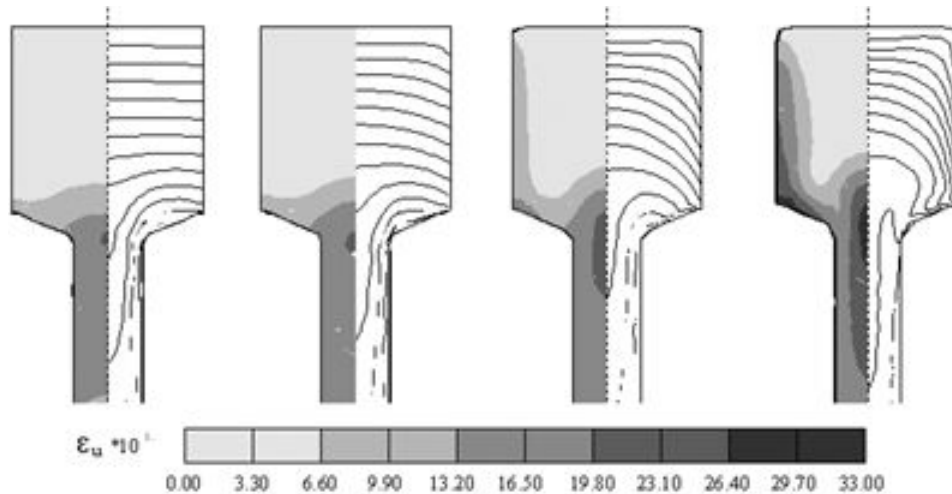
С помощью математического моделирования была отработана технология получения колец близких к цилиндрическим из шайб переменного сечения.

Технология переработки отходов внедрена на Курском подшипниковом заводе, а методика ее разработки защищена патентом.



КОММЕК

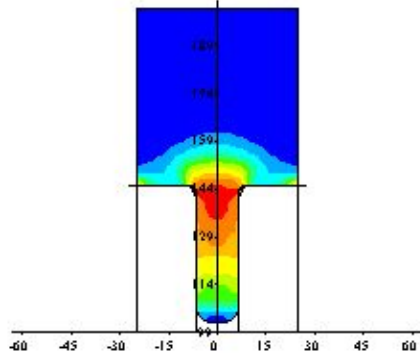
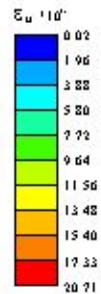
ПРЕССОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ТРЕНИЯ КАК АКТИВНОЙ СИЛЫ



Впервые с использованием математической модели и модернизированной системы **SPLIN-S(Press)** построены режимы прессования СПАТ сплава Амгб, обеспечивающие требуемую однородность получаемых пресс-изделий по длине и поперечному сечению

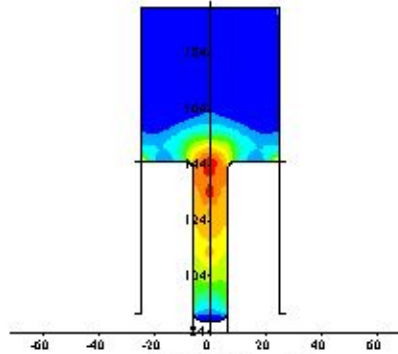
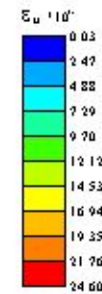
ПОЛЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГИДРОФОРМАЦИЙ

SPLIN-S



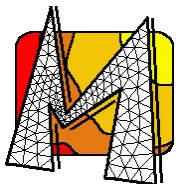
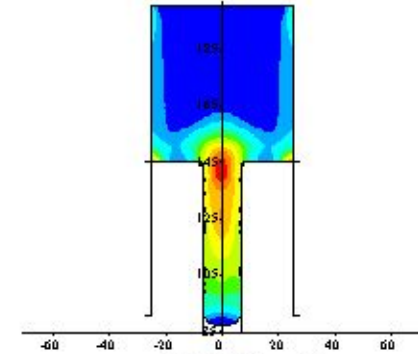
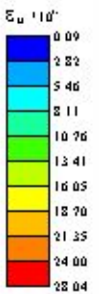
ПОЛЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГИДРОФОРМАЦИЙ

SPLIN-S



ПОЛЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГИДРОФОРМАЦИЙ

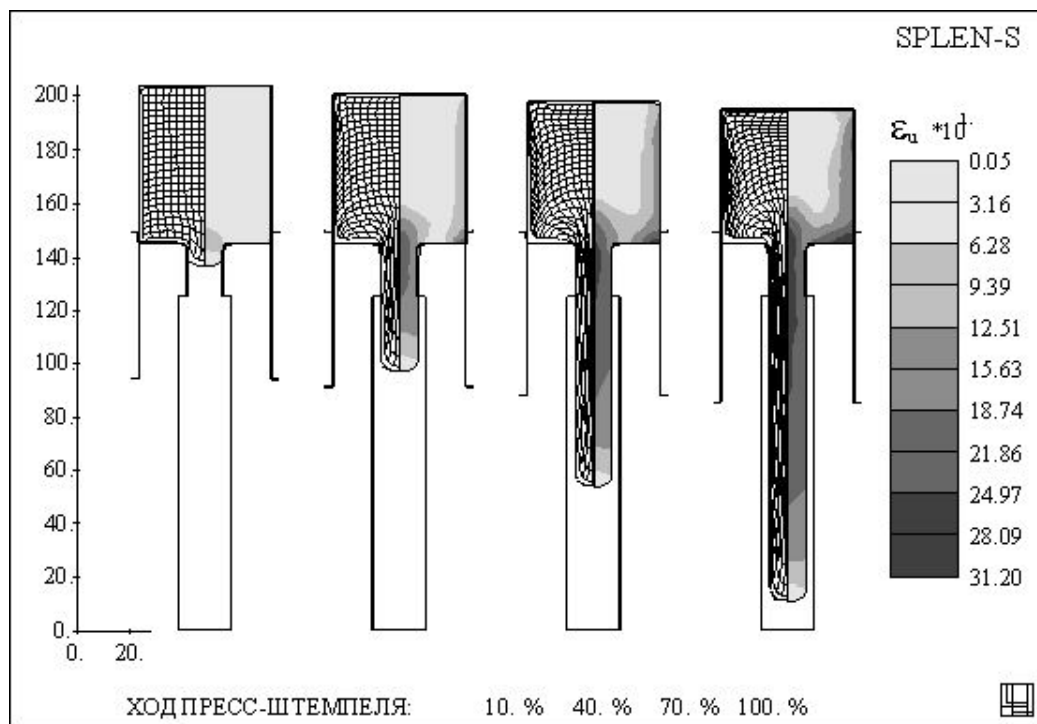
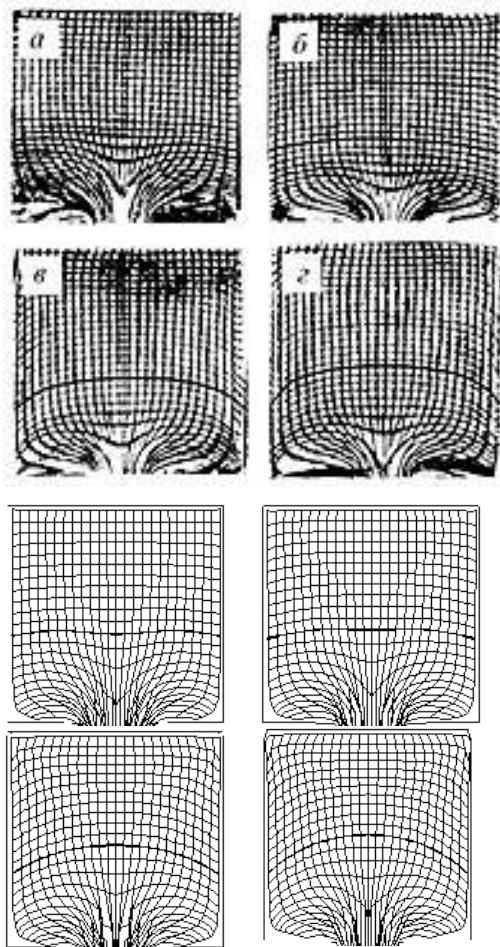
SPLIN-S



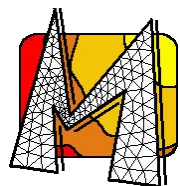
КОММЕК

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

СПАТ



Реальной возможностью для получения равномерной структуры является разработка такого технологического процесса, который за счет регулируемых скоростей движения пуансона и контейнера позволил бы управлять кинематикой истечения металла с целью уменьшения неравномерности распределения деформаций по объему прессуемой заготовки



КОММЕК

Формулировка задачи

Начальное состояние $\Gamma = \Gamma(t) = \Gamma_u(t) \cup \Gamma_\sigma(t) \cup \Gamma_{\sigma u}(t)$ (18)

$$\sigma = \sigma(x, t), \quad \tau = \tau(x, t) \Big|_{x \in \Gamma_{\sigma u}(t)}$$

Ограничения $\Gamma(t + \Delta t) \leq f$ (19)

$$P_{\min} \leq P(t) \leq P_{\max} \quad (20)$$

$$P'_{\min} \leq \frac{dP(t)}{dt} \leq P'_{\max} \quad (21)$$

$$\Omega_K(t): \hat{\epsilon}_u^{\text{opt}}(t) - \Delta_1 \leq \hat{\epsilon}_u(x, t) \leq \hat{\epsilon}_u^{\text{opt}}(t) + \Delta_2, \quad x \in \Omega_K(t) \subset \mathcal{R}^3 \quad (22)$$

f - поверхность штампа; Δ_1, Δ_2 - параметры;

Ω_K - контролируемые зоны

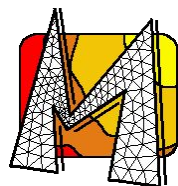
Условие заполняемости штампа $|\Gamma(x, t^*) - D(x)| \leq \Delta$ (23)

$D(x)$ - желаемая конфигурация,

t^* - время формовки

Ограничения на разнотолщинность $|\Delta\Gamma(x, t)_{\max} - \Delta\Gamma(x, t)_{\min}| \leq \delta_2$ (24)

и качество $|\Gamma(x, t, \epsilon, \hat{\epsilon}, \sigma, \dots) - \mathfrak{F}_f| > \lambda$ (25)



ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ

Найти $P(t): \Gamma(x_0, t_0) \rightarrow \Gamma(x, t^*)|_{(1),(6),(7),(9),(18)-(25)}$

| | |
|---|---|
| <p>∃ такой теории (численное зондирование не приемлемо) ⇒</p> | <p><u>Упрощения</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $P(t) _{t \in [t, t+\Delta t]} : \Gamma(x, t) \rightarrow \Gamma(x, t + \Delta t)$ (27) 2. Смягчение ограничений 3. Выделение основного параметра |
|---|---|

Гипотеза $\dot{\epsilon}_{ij}(x(\xi, t), t) = \nu \cdot \nu_{ij}(x(\xi, t), t) \cdot \dot{\epsilon}_{ij}(x(\xi, t - \Delta t), t - \Delta t),$ (28)

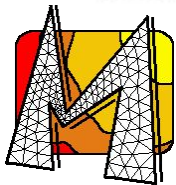
где $\nu_{ij}(x(\xi, t - \Delta t), t - \Delta t) = \frac{\dot{\epsilon}_{ij}(x(\xi, t - \Delta t), t - \Delta t)}{\dot{\epsilon}_{ij}(x(\xi, t - 2\Delta t), t - 2\Delta t)},$

и полагается $\nu_{ij}(x(\xi, t - \Delta t), t - \Delta t) = \nu_{ij}(x(\xi, t), t),$

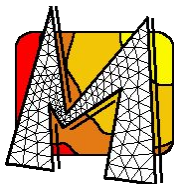
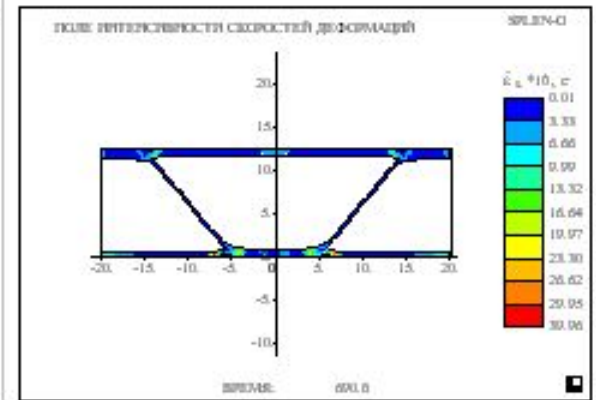
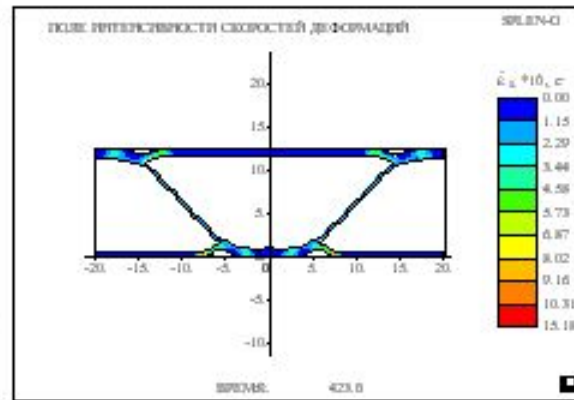
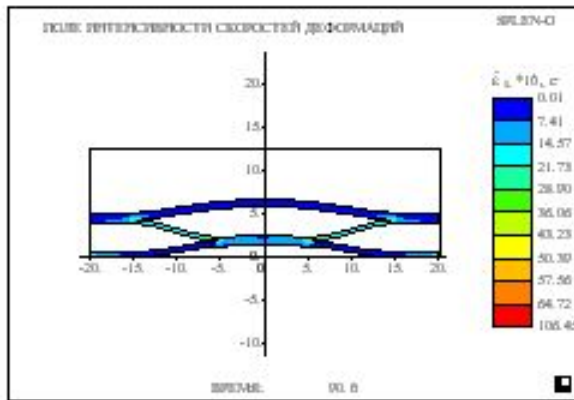
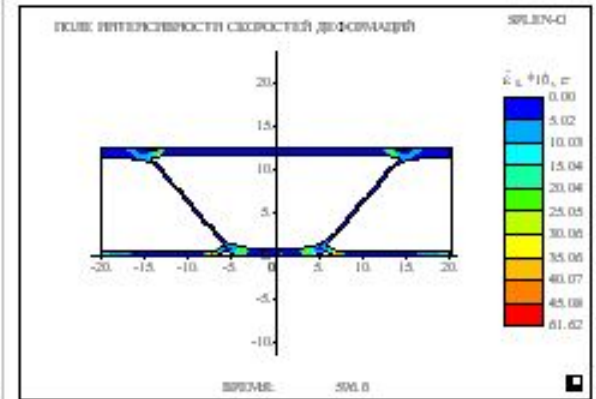
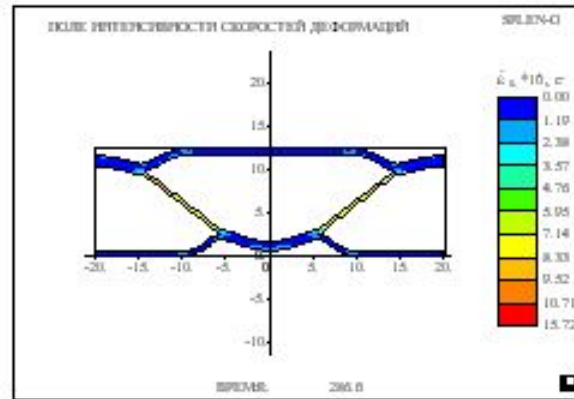
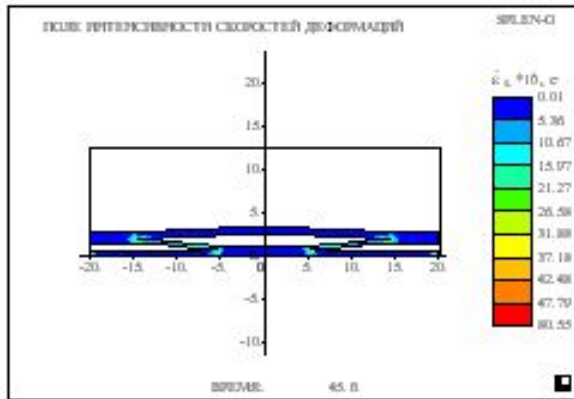
по i и j суммирование нет, а ν находится из условия минимума $J(\nu):$

$$J(\nu) = \frac{1}{\sum_{i \in \Omega_K} V(e^{(i)})} \cdot \sum_{i \in \Omega_K} \int_{V(e^{(i)})} (\dot{\epsilon}_u^{(i)}(t) - \dot{\epsilon}_u^{opt})^2 dV. \quad (29)$$

Далее $\dot{\epsilon}_{ij}(x, t) \Rightarrow \dot{\epsilon}_u(x, t), \quad \text{предыстория нагружения} \Rightarrow \sigma_{ij}(x, t) \Rightarrow P(t)$ (30)

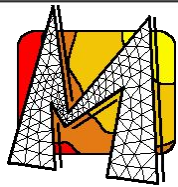
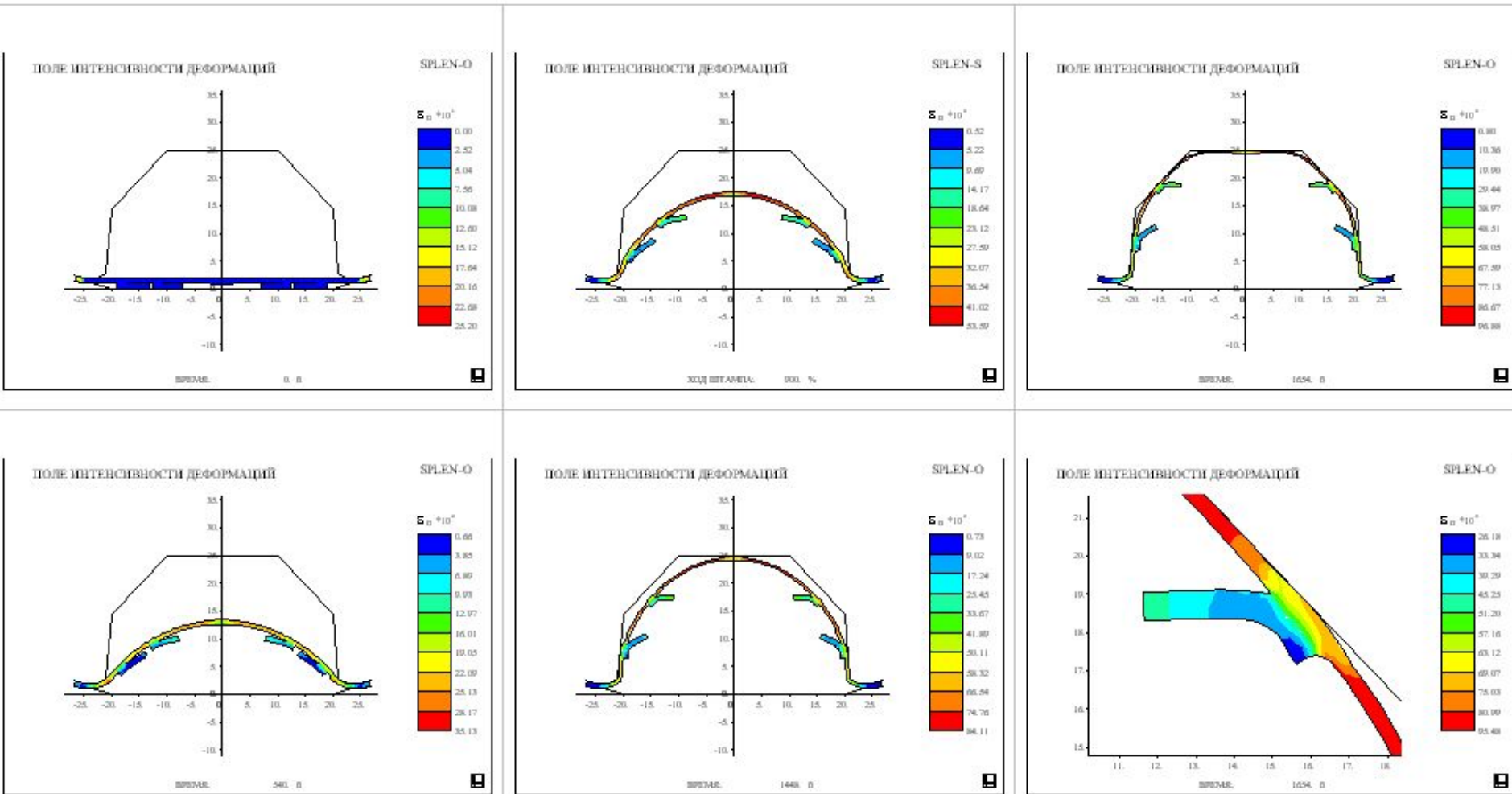


ФОРМОВКА ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ



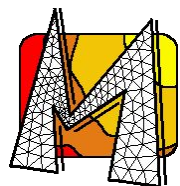
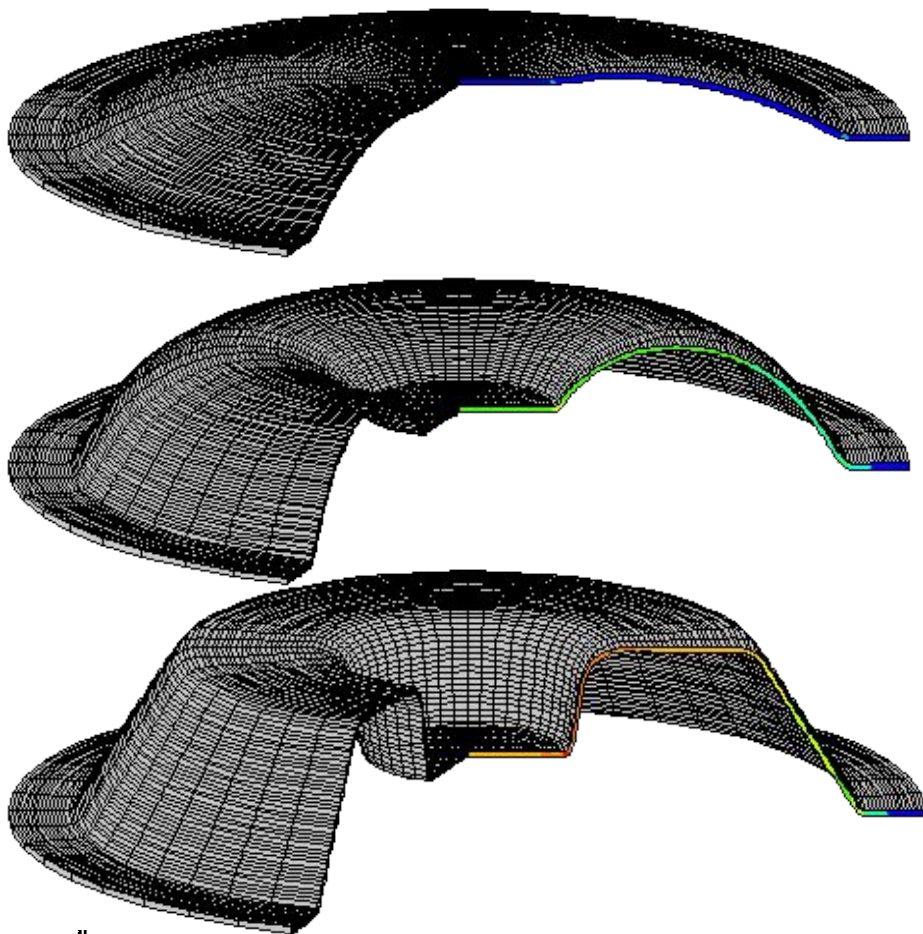
КОММЕК

ФОРМОВКА ПРИБОРНОГО ОТСЕКА С ДВУМЯ ПЛАТФОРМАМИ



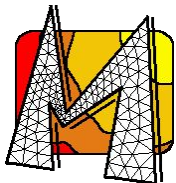
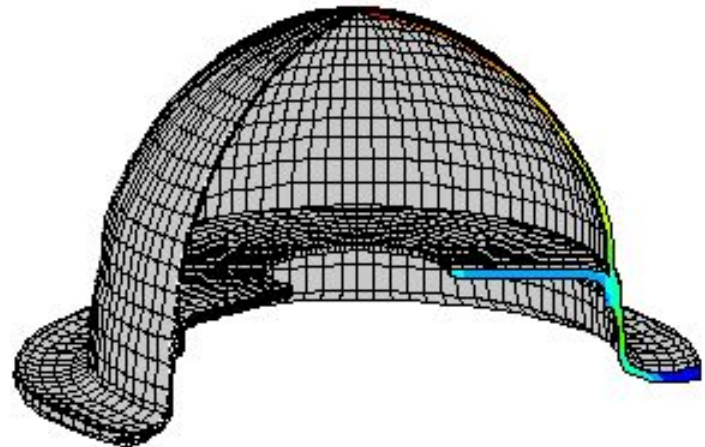
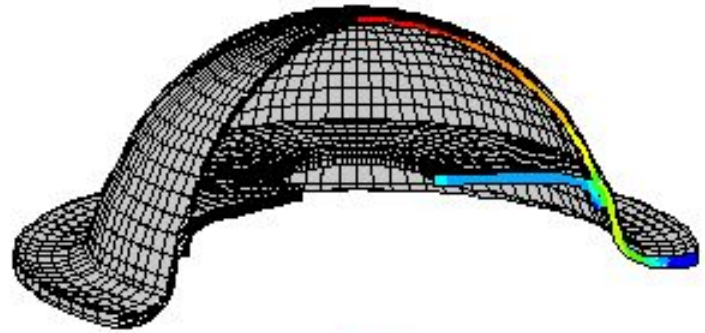
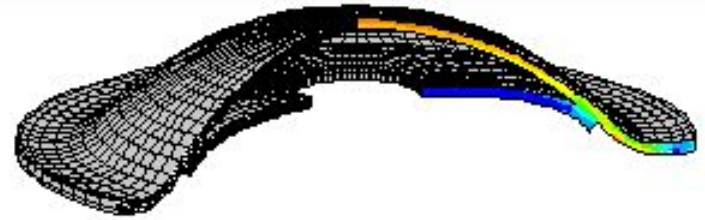
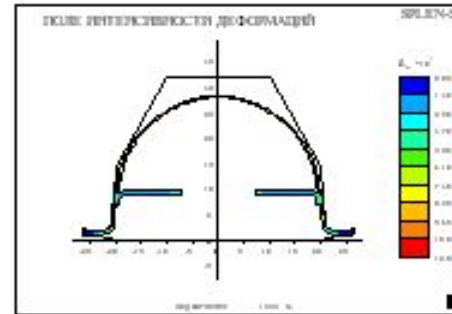
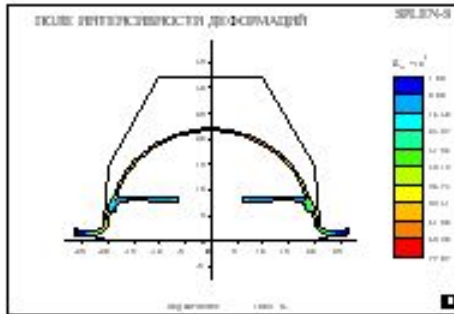
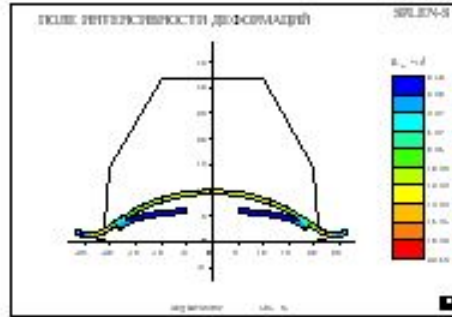
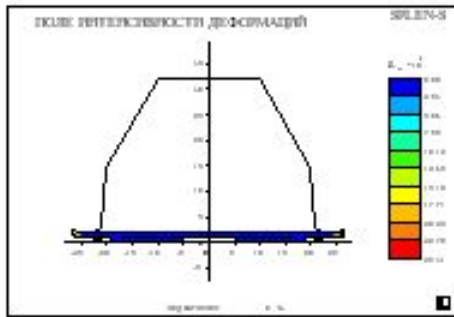
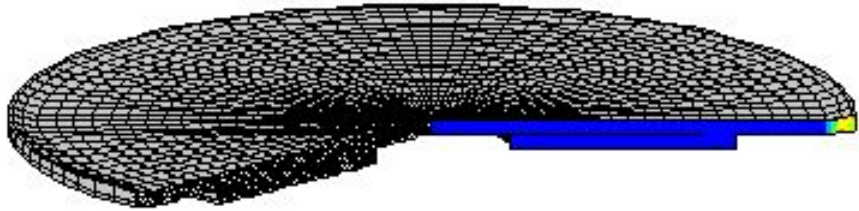
КОММЕК

ФОРМОВКА ТЕСТОВОГО ИЗДЕЛИЯ С БОЛЬШОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ВЫТЯЖКИ



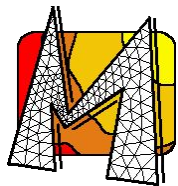
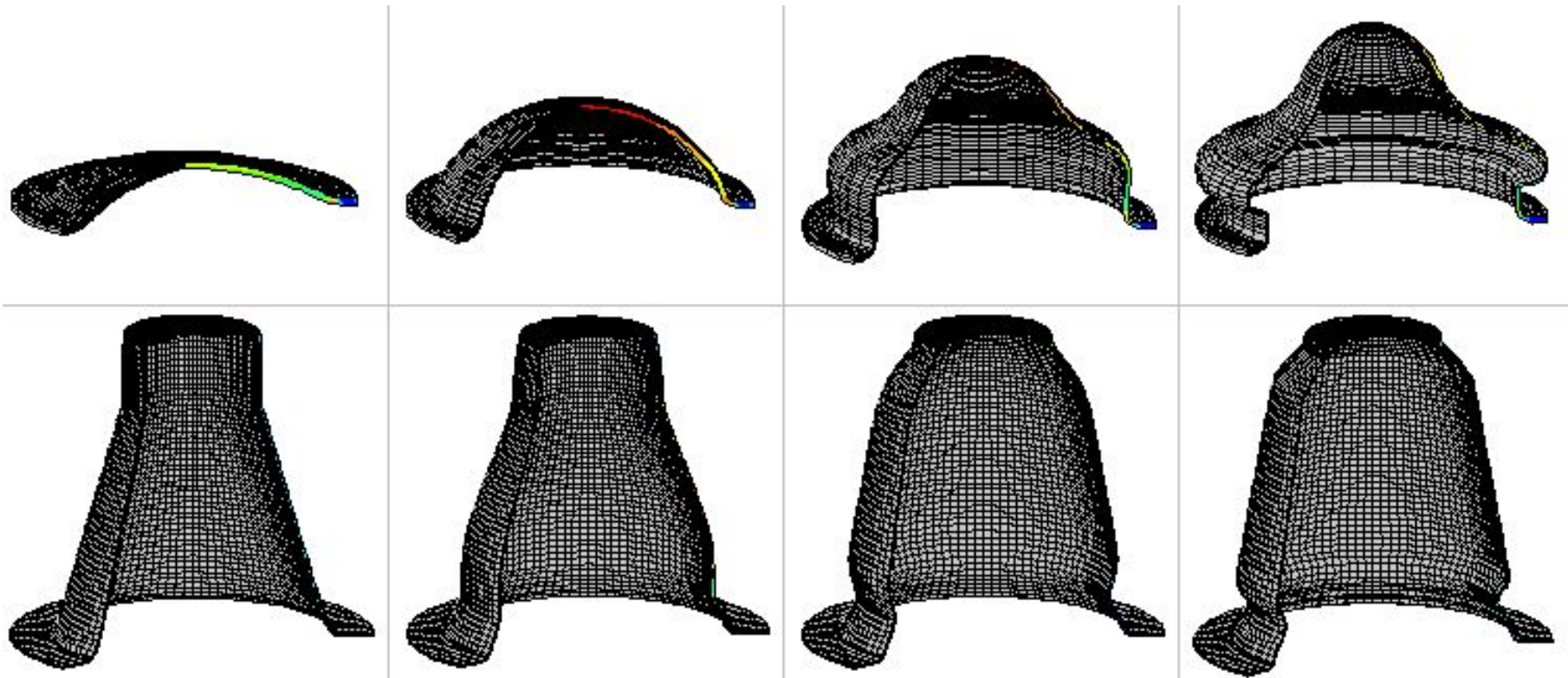
КОММЕК

ФОРМОВКА ПРИБОРНОГО ОТСЕКА С ОДНОЙ ПЛАТФОРМОЙ



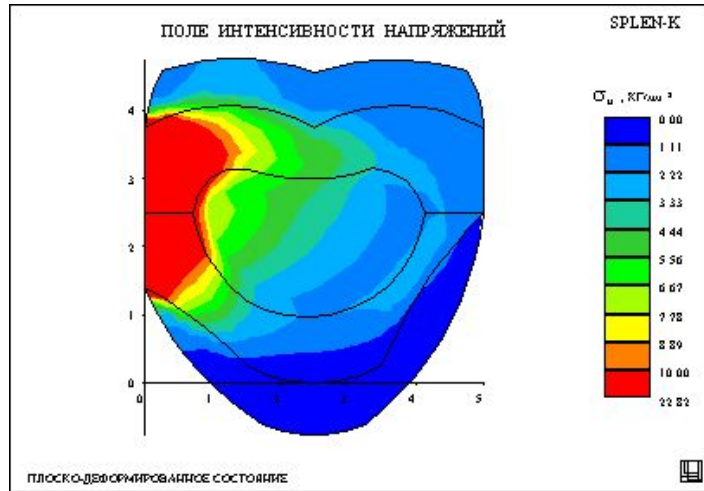
КОММЕК

ФОРМОВКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛАТУНИ

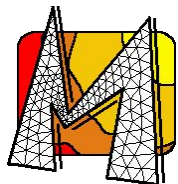
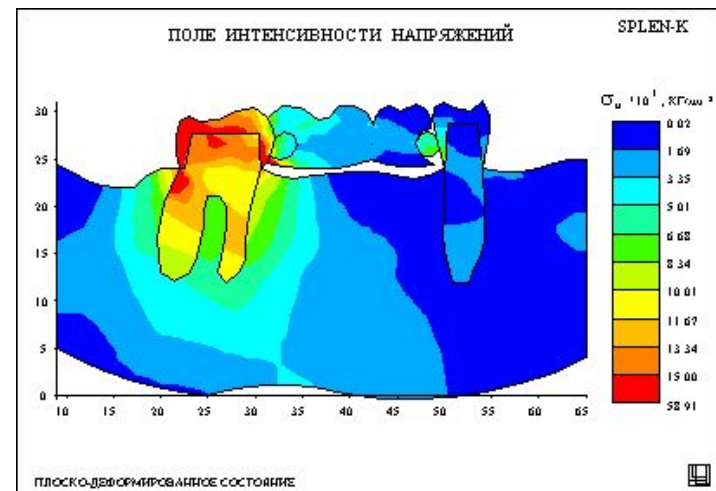
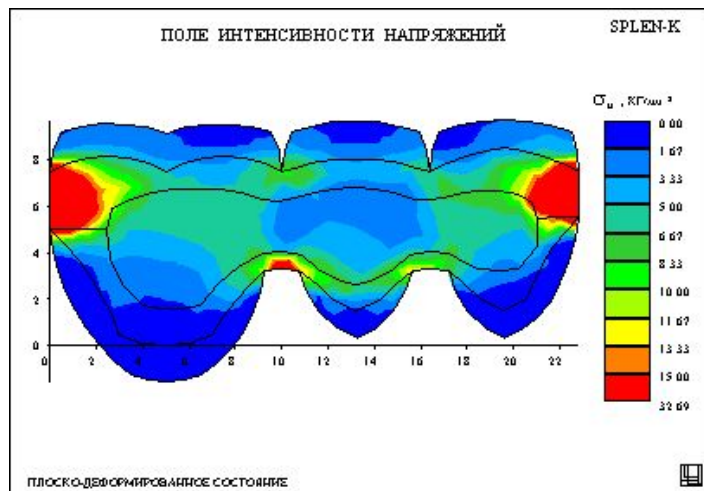


КОММЕК

РАСЧЕТ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ

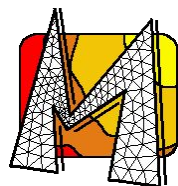
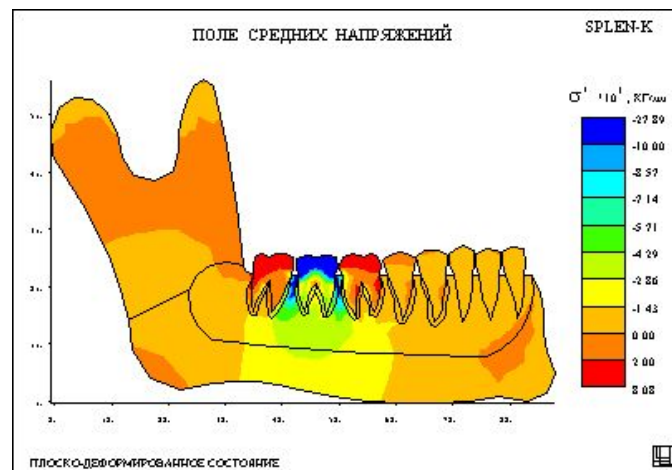
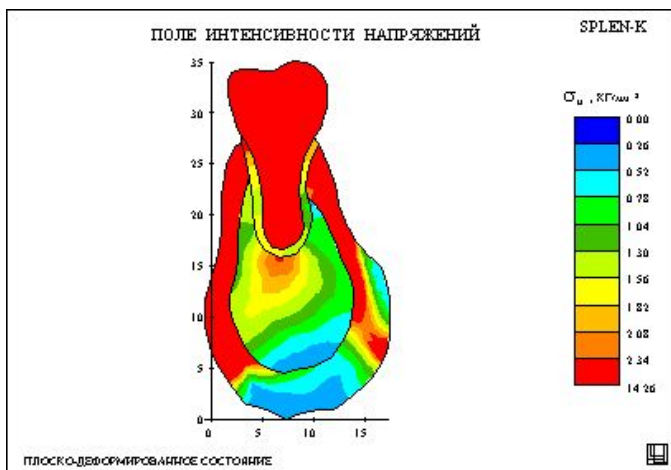
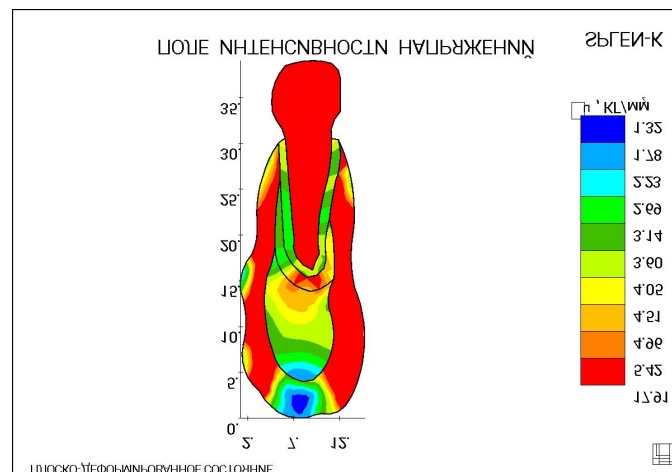
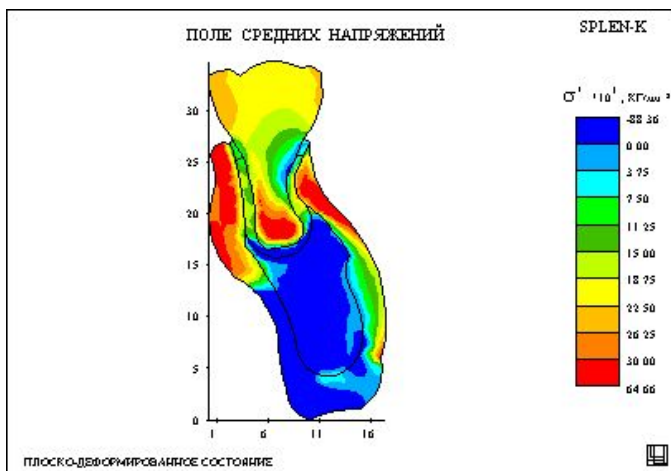


Оптимизация формы каркасов из сплавов на основе драгоценных металлов (СУПЕРПАЛ) в металлокерамических мостовидных протезах и консольных фасетках. Снижение расхода золота для некоторых инзом удалось довести до 40-50%



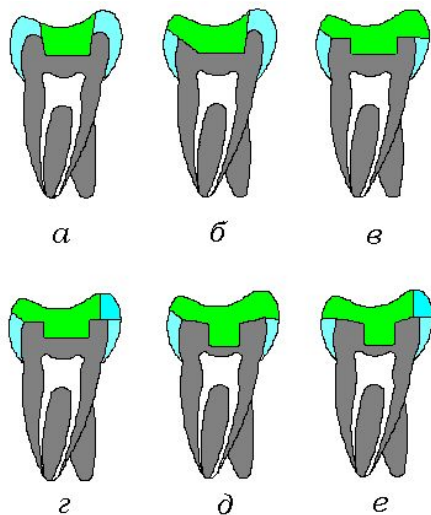
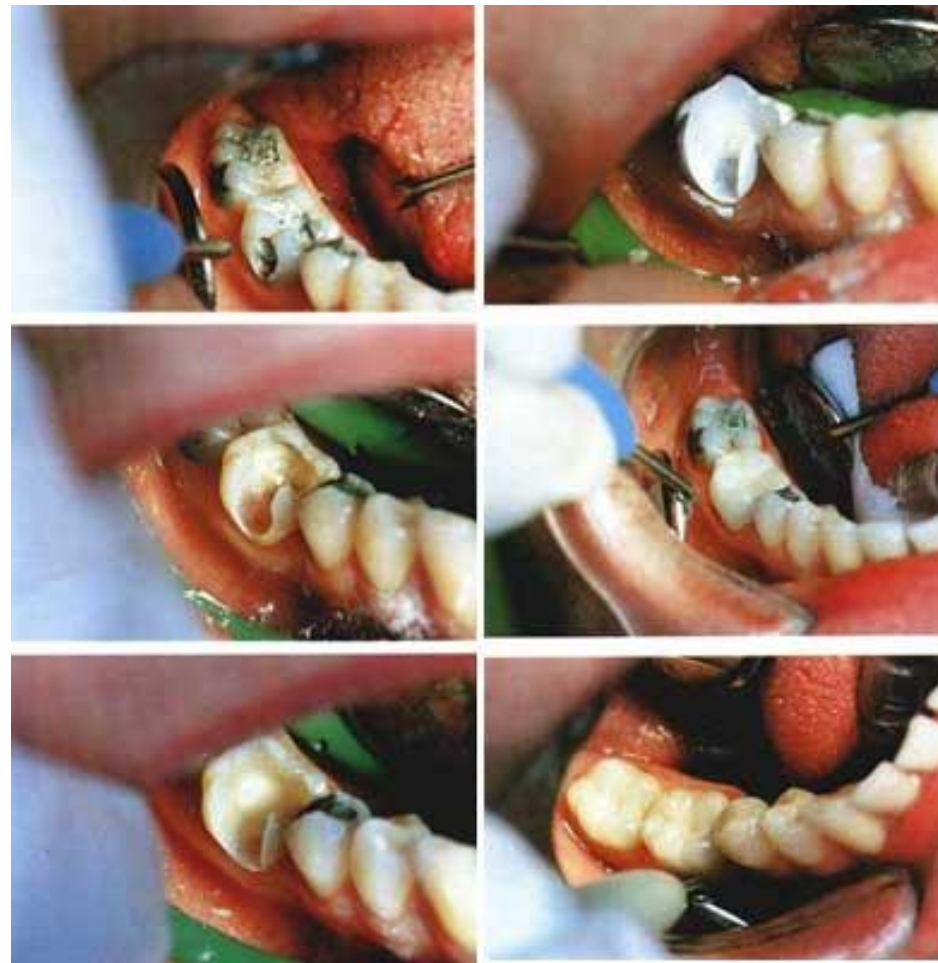
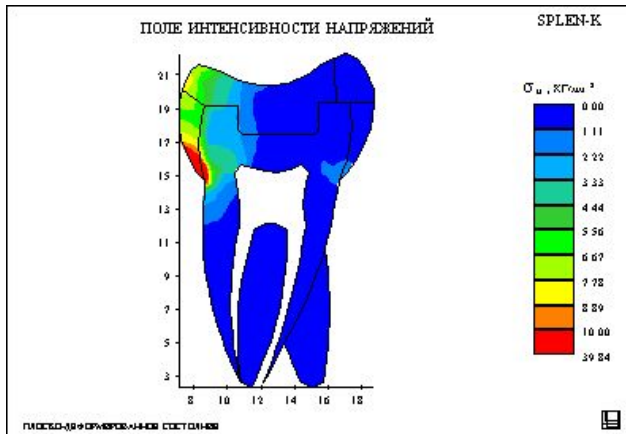
КОММЕК

ВЫБОР ПЛОМБИРОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА И СПОСОБ ЛЕЧЕНИЯ ПРИ ДЕПУЛЬПИРОВАНИИ ЗУБА В СЛУЧАЕ КАРИЕСА ИЛИ ПЕРЕД ПРОТЕЗИРОВАНИЕМ С УЧЕТОМ СТРОЕНИЯ ЧЕЛЮСТИ ПАЦИЕНТА И СОСТОЯНИЯ ЕГО КОСТНЫХ ТКАНЕЙ



КОММЕК

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРАЖЕННЫХ КАРИЕСОМ И ВОССТАНОВЛЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИМИ ВКЛАДКАМИ ЗУБОВ БОКОВОЙ ГРУППЫ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ К ОККЛЮЗИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА НАГРУЗКЕ И С УЧЕТОМ БОКОВОЙ НАГРУЗКИ СО ЩЕЧНОЙ СТОРОНЫ



ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИМПЛАНТАНТОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ УТРАЧЕННЫХ ПАЦИЕНТОМ ЗУБОВ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРОТЕЗИРОВАНИЕМ МОСТОВИДНЫМИ ПРОТЕЗАМИ

