

# Применение конечно-элементного анализа к прокатке в калибрах

Чумаченко Е.Н.

Фирма

КОММЕК ЛТД.

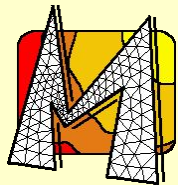
[www.kommek.ru](http://www.kommek.ru)

[kommek@miem.edu.ru](mailto:kommek@miem.edu.ru)

Московский государственный  
институт электроники и математики  
(Технический Университет),  
кафедра Математического  
моделирования

[www.miem.edu.ru](http://www.miem.edu.ru)

[mmkaf@miem.edu.ru](mailto:mmkaf@miem.edu.ru)



КОММЕК

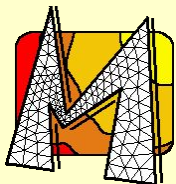
# Введение

Обсуждаются основные соотношения и результаты моделирования процесса прокатки в калибрах с помощью вычислительной системы SPLEN, созданной на основе МКЭ.

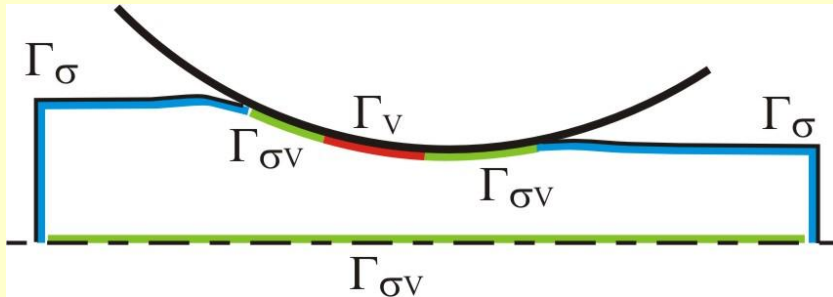
Вычислительная система позволяет задавать любую конфигурацию профиля валка и, в настоящее время, используется для изучения изотермических и неизотермических процессов прокатки двумя симметричными валками. В модели используется жестко-вязко-пластическая формулировка задачи и специальная система реализации трения.

Компьютерная система, моделирующая процесс деформирования металла в калибрах, позволяет избежать трудоемких и дорогостоящих промышленных экспериментов и уменьшает время принятия технологических решений. Кроме того, уже на стадии проектирования можно выявить дефекты формы проката и степень проработки металла и, тем самым, максимально приблизить технологический проект к рабочему.

Для увеличения быстродействия алгоритма решения использован полуаналитический метод конечных элементов.



# Математическая модель горячего деформирования



Граничные условия

$$\sigma_{ij} \cdot l_{n_i} \cdot \bar{\varepsilon}_j = \bar{P}_{n_i} \cdot \bar{\varepsilon}_i \quad \text{на } \Gamma_\sigma$$

$$\bar{V} = V_i \cdot \bar{\varepsilon}_i = \varphi_j \cdot \bar{\varepsilon}_j \quad \text{на } \Gamma_v$$

$$(\bar{V} - \bar{V}_{roll}) \cdot \bar{n} = 0, \quad \bar{\sigma}_\tau = -\tau^L \frac{\bar{V} - \bar{V}_{roll}}{u_i |\bar{V} - \bar{V}_{roll}|}, \quad \tau^L = 0.58 \cdot f \cdot \sigma_e \left[ 1 - \exp\left(\frac{-1.25|\bar{P}|}{\sigma_e}\right) \right] \quad \text{на } \Gamma_{\sigma v}$$

$\bar{V}$  - скорость перемещения частиц среды;  $\bar{V}_{roll}$  - скорость движения валка;

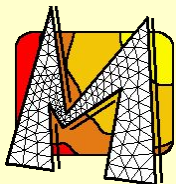
$\bar{P}$  - нормальное давление;  $\bar{n}$  - нормаль к валку;  $\sigma_\tau$  - касательное напряжение;

$l_{n_i}$  - направляющие косинусы;  $\bar{\varepsilon}_i$  - ортонормированный репер;  $\tau^L$  коэффициент трения.

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij}; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \cdot \delta_{ij}; \quad \tilde{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon \cdot \delta_{ij}; \quad \varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \cdot \delta_{ij} = \frac{1}{3} \theta; \quad (2)$$

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{ij} \cdot \tilde{\sigma}_{ij}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_e; \quad \tilde{\varepsilon} = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{ij} \cdot \tilde{\varepsilon}_{ij}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \varepsilon_e; \quad \tilde{\sigma}_{ij} = 2\mu \cdot \tilde{\varepsilon}_{ij} \Rightarrow \sigma_e = 3\mu \cdot \varepsilon_e \quad (3)$$

Тогда  $\sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon \cdot \delta_{ij})$  и выполнено  $\sigma_{ij,j} = 0$ . (4)



# Теплообмен

Теплообмен полосы с валками и с окружающей средой описывается следующим вариационным уравнением :

$$\int_S \left[ \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial \delta T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial \delta T}{\partial z} \right) + (c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \delta T - Q_{pl}) \delta T \right] r dS + \int_{L_{air}} \{ \Omega [(T + 273)^4 - (T_{roll} + 273)^4] + \alpha_{air} (T - T_{air}) \} \delta T r dL + \int_{L_{roll}} [ \alpha_{roll} (T - T_{roll}) - q_{fr} ] \delta T r dL = 0 \quad (5)$$

$$\partial S = L_{roll} \boxtimes L_{air} \quad q_{fr} = 0.5 |V - V_{roll}| \sigma_{\tau}^L \quad Q_{pl} = k_{pl} \sigma_u \boxtimes u$$

где  $\lambda$  коэффициент теплопроводности;

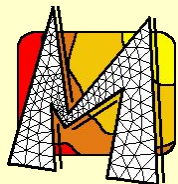
$c, \rho$  - теплоемкость и плотность материала полосы;

$\Omega$  - обобщенный параметр, зависящий от разности температур полосы и окружающей среды, постоянной Стефана-Больцмана, коэффициента черноты тела и взаиморасположения поверхностей при излучении;

$\alpha_{roll}, \alpha_{air}$  - коэф. линейного расширения для валков и окружающей среды;

$|V - V_{roll}|$  модуль относительной скорости движения при трении;

$k_{pl}$  - коэф., учитывающий долю выделяемой энергии в виде тепла.



Для произвольного элемента очага деформации  $\Delta z$ , достаточно малой толщины, величина  $\dot{\epsilon}_z$ , характеризующая скорость относительного удлинения волокон в элементе толщиной  $dz$ , постоянна:  $\dot{\epsilon}_z|_{z=\bar{z}} = C$ . При этом, в каждом сечении  $z = \bar{z}$ , константа  $C$  имеет свое значение. В любом фиксированном элементе  $\Delta z$  компоненты скоростей перемещения частиц относительно поверхности валков имеют вид:

$$v_x = v_x(x, y); \quad v_y = v_y(x, y); \quad v_z = C\bar{z}; \quad \bar{z} \in [z, z + \Delta z] \quad (6)$$

a)

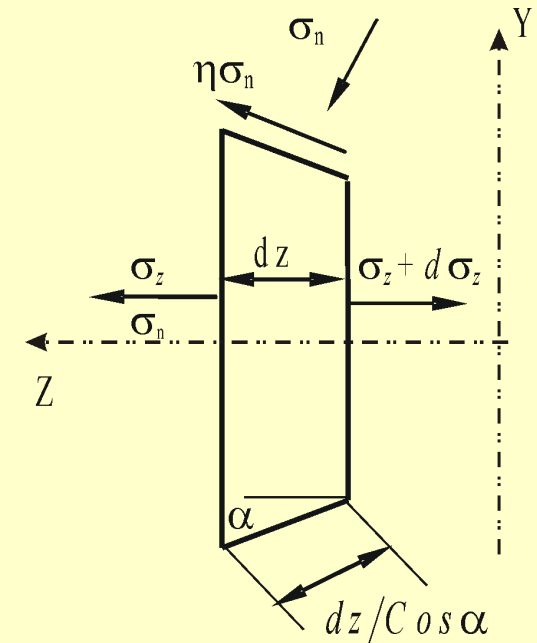
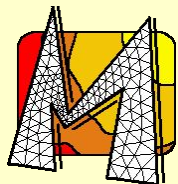


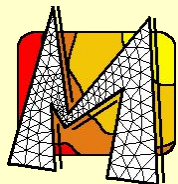
Схема очага деформации при продольной прокатке (a) и напряжения (b), действующие на слой б.м. толщины.



# Полуаналитический метод конечных элементов

Таким образом, трехмерное поле скоростей элемента  $\Delta z$  разбивается на две составляющие. Поле скоростей  $\{v_x, v_y\}$  в сечении, перпендикулярном направлению прокатки, получается из конечно-элементной аппроксимации. Компонента скорости  $v_z$  в направлении прокатки, вычисляется с помощью итерационной процедуры при поиске константы  $C$ . Из исходной объемной задачи для элемента  $\Delta z$  получили обобщенную двумерную задачу, которая может быть решена с использованием метода конечных элементов.

Для построения пространственного напряженно-деформированного состояния, очаг деформации по длине делят на  $m$  частей поперечными сечениями, и в каждом сечении при  $z = z_k = \text{const}$  определяют величину  $\varepsilon_z : \varepsilon_z^k \Big|_{z=z_k} = C_k \cdot$



Алгоритм решения пространственной задачи для каждого отдельного элемента

основан на минимизации функционала:

$$\Phi(C_k) = \int_S \sigma_z dx dy + 2 \overset{(7)}{(\operatorname{tg} \alpha \pm \eta)} \int_{\Gamma} \sigma_n dl - \sigma_z^H S$$

Окончательно скорость продольного перемещения частиц в произвольном сечении

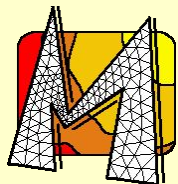
$z = \tilde{z}$  определяется соотношением:  $v_z^k = C_k \tilde{z} + f_k(z)$  (8)

где

$\tilde{z} \in \Delta z_k$  ;  $f_k(z)$  - скорость перемещения элемента  $\Delta z_k$

на входе в очаг деформации

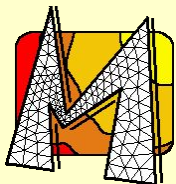
$$f_o(l_o) = v_o$$



# Экспериментальная проверка

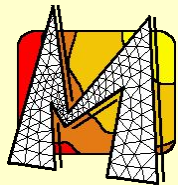
Для проверки достоверности алгоритмов использованы экспериментальные данные, полученные в опытах по исследованию напряженного состояния при прокатке в гладких валках, полученные ранее профессором Тарновским И.Я.

$H_0, B_0$  – начальные ширина и высота полосы;  
 $B_{CP}$  – усредненная конечная ширина полосы





# *Экспериментальная проверка*



KOMMEK

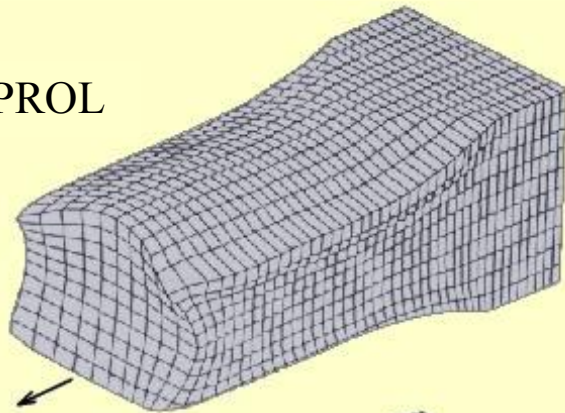
---

Семинар ИКИ РАН «Механика, Управление и Информатика» 9 Москва 2005

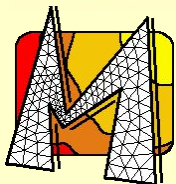
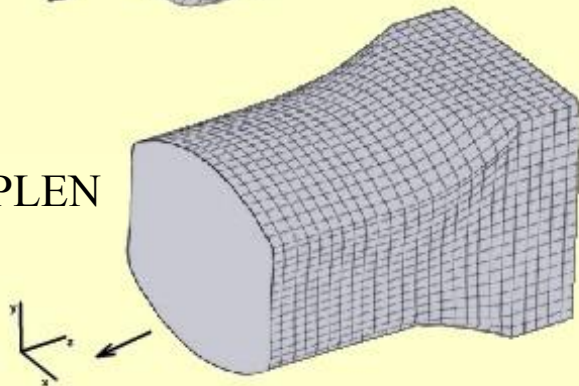
# Сравнение 3D и 2.5D моделей

Проведено сравнение рассмотренной модели с трехмерной моделью прокатки в калибрах J.J.Park и S.I.Oh, реализованной в программе SHPROL на основе МКЭ.

SHPROL

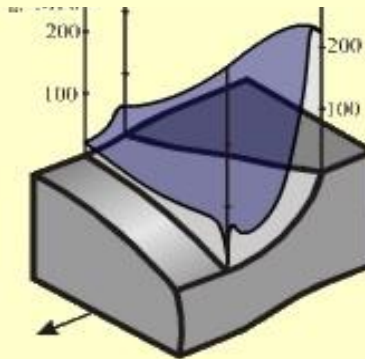


SPLIN

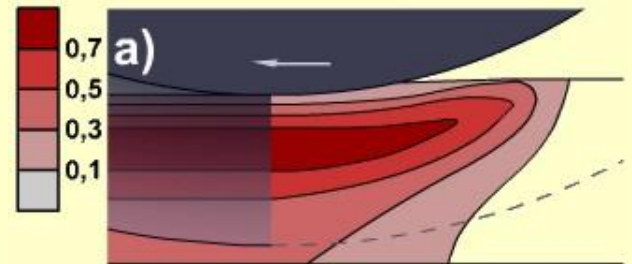
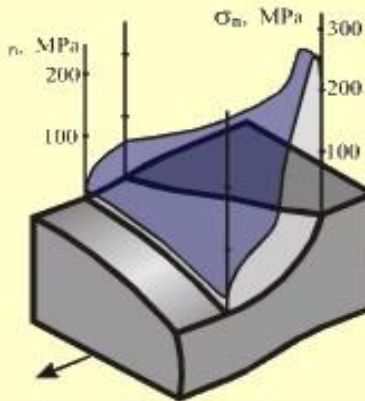


KOMMEK

а)



б)

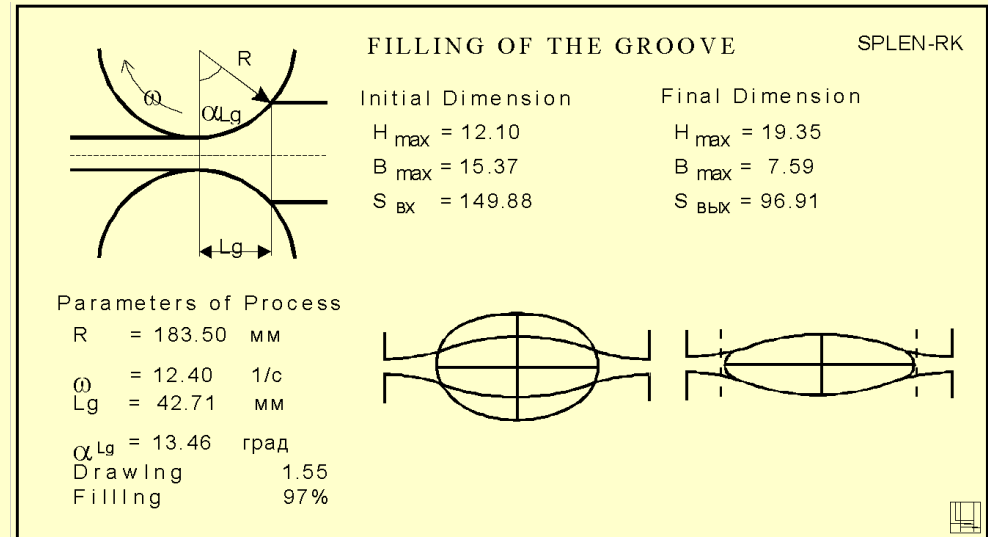
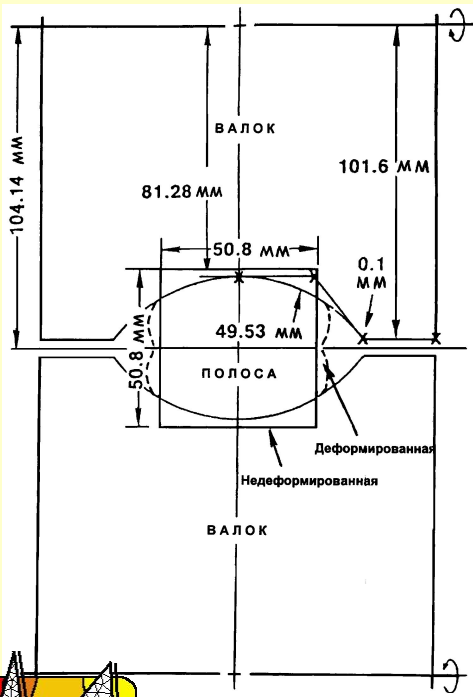


▲ Распределение интенсивности деформации полосы (овал-квадрат) при установившемся режиме.

◀ Эпюры нормальных напряжений в очаге деформации.

Экспериментальная проверка результатов расчета показала достаточно высокую точность прогнозов заполняемости калибров при сортовой прокатке. В лабораторных и промышленных условиях максимальная ошибка величин, характеризующих геометрические параметры полосы при выходе из очага деформации, не превышала 6.4%.

**Осевое сечение валков при прокатке полосы квадратного сечения в овальном калибре:**



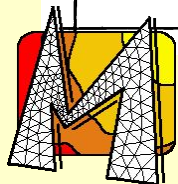
ма **SPLEN** позволяет:

елировать прокатку в калибрах;

пизировать и оптимизировать калибровки с

ества проката и

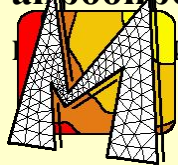
эффективности работы



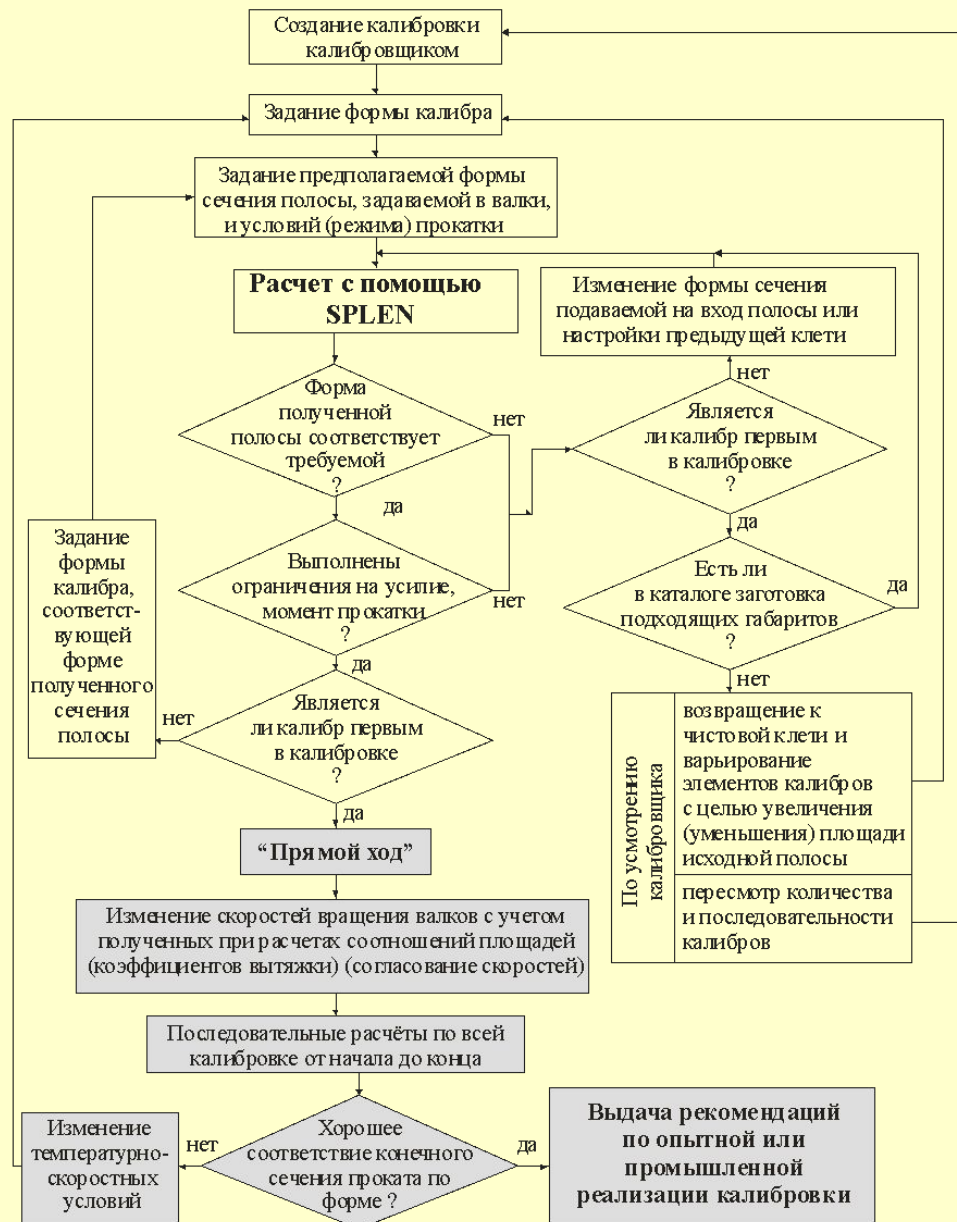
При разработке новой промышленной калибровки валков на сортопрокатном стане 320/250 завода «Серп и молот» для прокатки полосовой стали размером 18x36 мм из стали 35, решили провести предварительный анализ на основе имитационного моделирования с помощью вычислительной системы SPLEN.

В соответствии с алгоритмом численного опробования калибровки, поиска и уточнения формы промежуточных калибров, выполнили последовательное изменение исходной калибровки и решили задачи имитационного моделирования.

### Технологическая схема апробирования и уточнения калибровки.

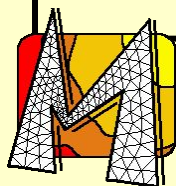


КОММЕК

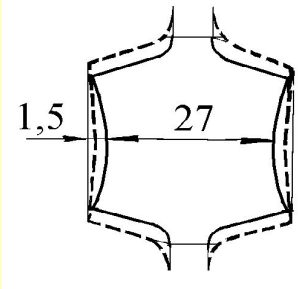
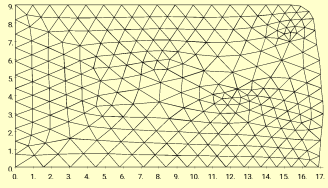
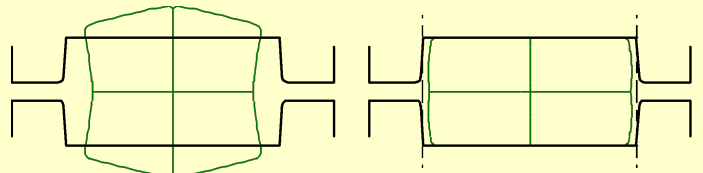
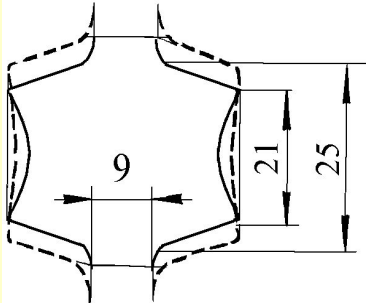
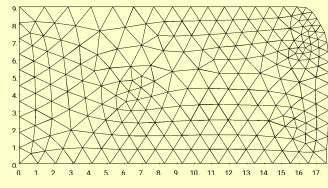
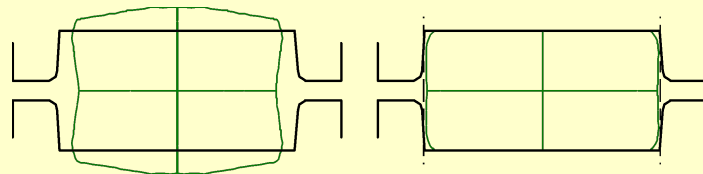
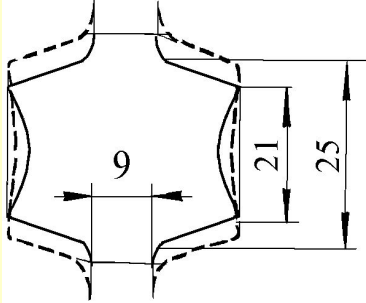
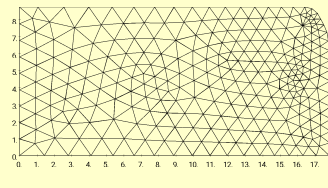
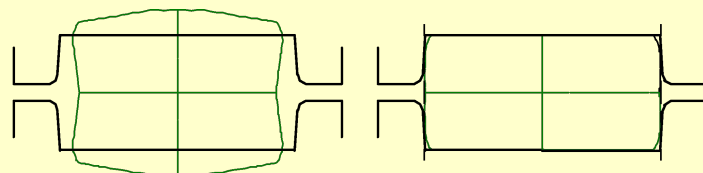


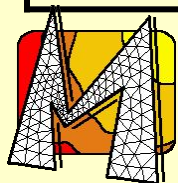
# Последовательное изменение предчистового калибра

	Внесенные изменения	Расчетное сечение полосы	Параметры формоизменения
Исходная калибровка			<p> <math>H_{max}/2 = 9.00</math>   <math>V_{max}/2 = 18.57</math>   <math>S_{1/4} = 162.7</math>                      Коэф. вытяжки 1.23   Заполняемость 99.1%                 </p>
Уменьшена ширина калибра по дну			<p> <math>H_{max}/2 = 9.00</math>   <math>V_{max}/2 = 18.07</math>   <math>S_{1/4} = 159.2</math>                      Коэф. вытяжки 1.18   Заполняемость 94.5 %                 </p>
Уменьшена общая ширина калибра			<p> <math>H_{max}/2 = 9.00</math>   <math>V_{max}/2 = 17.71</math>   <math>S_{1/4} = 156.9</math>                      Коэф. вытяжки 1.19   Заполняемость 90.8 %                 </p>



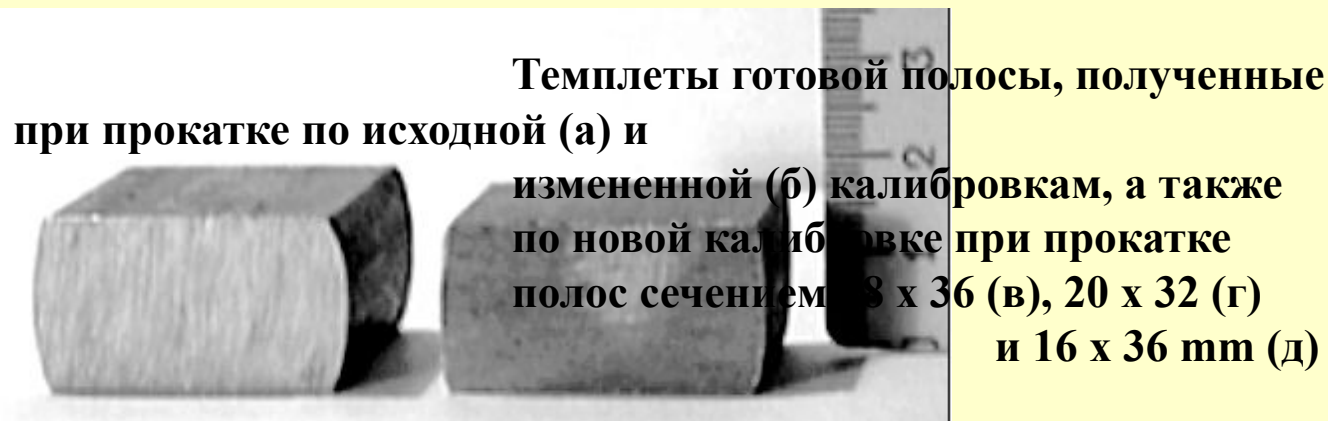
# Последовательное изменение предчистового калибра

	Внесенные изменения	Расчетное сечение полосы	Параметры формоизменения
Углублена выемка			$H_{\max}/2 = 9.00$ $V_{\max}/2 = 17.16$ $S_{1/4} = 152.2$ Коэф. вытяжки 1.19 Заполняемость 93.8 % 
Увеличен зазор, уменьшена ширина			$H_{\max}/2 = 9.00$ $V_{\max}/2 = 17.69$ $S_{1/4} = 157.8$ Коэф. вытяжки 1.17 Заполняемость 93.2 % 
Высота конечной полосы уменьшена до 17.5 мм			$H_{\max}/2 = 8.75$ $V_{\max}/2 = 17.93$ $S_{1/4} = 155.5$ Коэф. вытяжки 1.18 Заполняемость 98.7 % 



# Реализация теоретических разработок

По измененной калибровке была проведена прокатка, в результате которой получили полосу, удовлетворяющую всем заданным требованиям. Ошибка в прогнозах геометрии контура темплета при одинаковой настройке стана не превысила 1.5%.



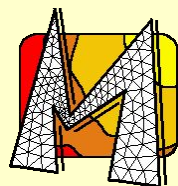
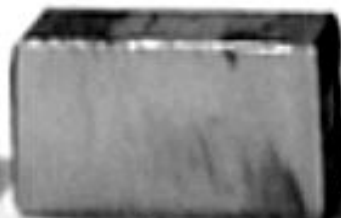
а)

б)

в)

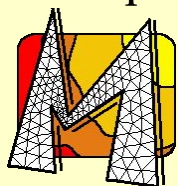
г)

д)



KOMMEK

Опытно-промышленное опробование системы SPLEN на действующих калибровках сортовых станов 500, 300-2, 250-1 и проволочного стана 250-2 выполнено в калибровочном бюро Магнитогорского металлургического комбината. Специалисты комбината сделали заключение, что полученные результаты обладают высокой степенью достоверности, а графические возможности представления результатов расчетов удобны при эксплуатации.



КОММЕК



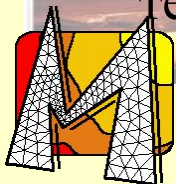
# Выводы

Разработана математическая модель и алгоритмы, позволяющие осуществлять имитационное моделирование установившегося процесса прокатки в калибрах.



Быстродействие разработанных систем на порядок превосходит быстродействие существующих алгоритмов пространственного моделирования в калибрах, что является важным преимуществом при решении задач оптимизации.

На основе вышеизложенной методики ведутся работы по созданию промышленной сервисной системы моделирования и оптимизации технологических процессов прокатки в калибрах.



## *В своих работах мы используем положительный опыт научно-технического сотрудничества с:*

- Национальным Институтом Авиационных Технологий (НИАТ), Москва, Россия
- ВНИИ Металлургического машиностроения (ВНИИМетмаш), Москва, Россия
- Московским Институтом Высоких Технологий (МИТ), Москва, Россия
- Харьковским заводом им. Малышева, Харьков, Украина
- ГП «НПО Техномаш», Москва, Россия
- КБ Машиностроения, Миасс, Россия
- Машиностроительным заводом им. Ленина, Златоуст, Россия

### AIRBUS INDUSTRY

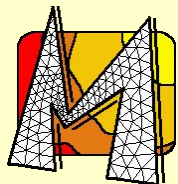
Aerospatiale Societe Nationale Industrielle, France

Daimler-Benz Aerospace Airbus GmbH, Germany

Construcciones Aeronauticas S.A., Spain

British Aerospace (Operations) Ltd., England

- ПО «Ижсталь», Ижевск, Россия
- Казанским моторостроительным ПО, Казань, Россия
- Вологодским, Волжским и Курским подшипниковыми заводами, Россия
- REINZ Dichtungs GmbH, Germany
- Заводом «Серп и Молот», Москва, Россия
- АО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия



KOMMEK