

УДК 621.771.014-415

**Кожевникова И. А.  
Болобанова Н. Л.****СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА УСИЛИЯ ГОРЯЧЕЙ  
ПРОКАТКИ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ**

В статье представлены результаты сопоставительного анализа точности расчета структурных и силовых параметров очагов деформации рабочих клетей чистовых групп непрерывных широкополосных станов горячей прокатки двумя методами математического моделирования: численным и аналитическим. В качестве аналитического метода был использован метод энергосилового расчета процесса горячей прокатки, основанный на упругопластической модели напряженно-деформированного состояния полосы в очаге деформации, обладающую часть которого занимает зона прилипания [1–3]. Для моделирования процесса прокатки методом конечных элементов была выбрана программа Deform-3D – признанное в металлургии современное техническое средство, позволяющее определить напряжения и деформации по всему объему металла в функции параметров режима прокатки. Установлено, что аналитический метод обеспечивает достаточную для практики точность и оперативность расчета параметров процесса прокатки, что позволяет использовать его для разработки энергоэффективной технологии производства тонких горячекатаных полос.

Цель работы – обосновать целесообразность применения для моделирования процессов горячей прокатки тонких широких полос аналитического метода, основанного на упругопластической модели напряженно-деформированного состояния полосы в очаге деформации.

Под воздействием разных отраслей промышленности, жилищного, промышленного и сельскохозяйственного строительства в сортаменте, технологии и оборудовании действующих широкополосных станов горячей прокатки произошли большие изменения. Одно из них – уменьшение освоенной толщины горячекатаных полос.

Так, на ряде широкополосных станов горячей прокатки, например, на 6-тиклетевом стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь», освоили технологию производства тонких стальных полос с толщиной 0,8–1,5 мм, ранее относившихся к сортаменту станов холодной прокатки, так как многие предприятия машиностроения и строительной индустрии перешли на использование более дешевых тонких горячекатаных полос после того, как увеличились их прочность, пластичность, и улучшилось качество поверхности.

Указанные изменения сортамента тонких листов, ужесточение требований к показателям их точности привели к возникновению ряда проблем в эксплуатации действующих широкополосных станов:

- росту затрат энергии на процесс прокатки полос;
- снижению стойкости рабочих валков в последних клетях чистовых групп;
- увеличению продольной разнотолщинности и разноширинности;
- повышенному уровню колебаний в рабочих клетях усилий прокатки.

Эффективное решение этих проблем возможно с использованием достоверных аналитических или численных методов расчета технологических и энергосиловых параметров действующих прокатных станов.

Математическое моделирование, основанное на численных методах решения, является альтернативой упрощенным аналитическим решениям частных задач теории листовой прокатки. За счет отказа от допущений, вызванных математическими трудностями, численные методы имеют то преимущество перед аналитическими методами, что ни произвольность геометрии области, ни сложность граничных условий, ни сложность зависимостей свойств материала от искомых параметров состояния не являются препятствием для получения

правильного результата [1]. В то же время аналитические методы позволяют оперативно получать результаты, необходимые для управления технологическим процессом. Эти методы целесообразно использовать во всех случаях, где это возможно.

Поэтому представляет интерес сопоставительный анализ результатов энергосилового расчета процесса горячей прокатки тонких полос, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов.

Исследование проводили на основе реального режима прокатки тонкой полосы размерами  $23 \times 0,86 \times 1000$  мм на 6-клетевом непрерывном широкополосном стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь», технологические параметры режима представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры режима горячей прокатки полосы размерами  $23 \times 0,86 \times 1000$  мм на 6-клетевом стане горячей прокатки «1700»

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_{i-1}$ , мм	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %
1	1,2	23	12,2	46,96	59,2
2	2,7	12,2	5,43	55,49	76,39
3	4,7	5,43	3,12	42,54	86,43
4	7,3	3,12	1,79	42,63	92,22
5	9,8	1,79	1,15	35,75	95
6	13,1	1,15	0,86	25,22	96,26

Примечание.  $v_i$  – скорость прокатки в  $i$ -й клетке;  $h_{i-1}$ ,  $h_i$  – толщины полосы на входе и выходе из  $i$ -й клетки;  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_{\Sigma i}$  – частное и суммарное относительное обжатие в  $i$ -й клетке.

В качестве аналитического метода был использован метод энергосилового расчета процесса горячей прокатки, основанный на упругопластической модели напряженно-деформированного состояния полосы в очаге деформации, преобладающую часть которого занимает зона прилипания [2, 3].

Сущность этого метода состоит в следующем:

1. Напряжения в очаге деформации рабочей клетки широкополосного стана определяют отдельно на каждом участке: упругого сжатия полосы, пластической деформации, состоящем из двух зон: отставания и опережения, упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации (рис. 1).

2. На упругих участках, вместо условия пластичности, для расчета напряженного состояния полосы используют уравнение упругости (соотношение между напряжениями и деформациями, основанное на законе Гука):

$$p_x - \sigma_x = 1,15E_{II} \left( 1 - \frac{h_x}{h_{i-1}} \right); \quad p_x - \sigma_x = 1,15E_{II} \left( 1 - \frac{h_x}{h_i} \right),$$

где  $\sigma_x$  – сжимающие напряжения;

$E_{II}$  – модуль упругости;

$h_x$  – толщина полосы в сечении с координатой  $x$ .

3. Для расчета изменения касательных контактных напряжений по длине зоны прилипания очага деформации предложено математическое выражение, в котором касательные напряжения зависят не от коэффициента трения, а от сопротивления чистому сдвигу материала полосы [2, 3]:

$$\tau_x = \tau_s \left( \frac{h_x - h_n}{h_{1упр} - h_n} \right),$$

где  $\tau_s$  – сопротивление чистому сдвигу материала полосы;

$h_{1упр}$  – толщина полосы на границе первого упругого и пластического участков.

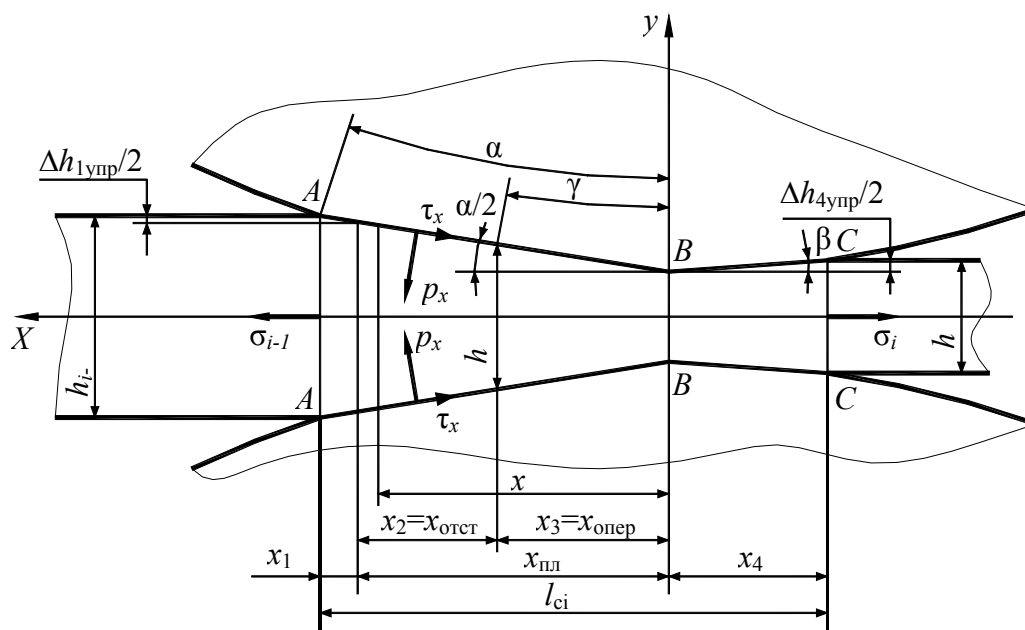


Рис. 1. Структурная схема очага деформации:

$h_{i-1}$ ,  $h_i$  – толщина полосы на входе и выходе из  $i$ -й клетки;  $h_n$  – толщина полосы в нейтральном сечении;  $\sigma_{i-1}$ ,  $\sigma_i$  – заднее и переднее удельные натяжения;  $p_x$ ,  $\tau_x$  – нормальные и касательные контактные напряжения;  $\alpha$  – угол захвата;  $\beta$  – угол, характеризующий участок упругого восстановления;  $\gamma$  – нейтральный угол;  $\Delta h_{1упр}$ ,  $\Delta h_{4упр}$  – максимальные величины абсолютных упругих деформаций полосы по толщине на участках с длинами  $x_1$  и  $x_4$

С использованием указанного выражения аналитическим методом получены формулы переменных нормальных контактных напряжений по длине очага деформации [2, 3].

4. С использованием решений, указанных в п.п. 1–3, разработана методика расчета структурных параметров очага деформации: длин первого и второго упругих участков, зон отставания и опережения пластической области, координаты нейтрального сечения и толщины полосы в этом сечении.

Анализ очагов деформации рабочих клеток широкополосного стана горячей прокатки при производстве особо тонких полос, выполненный с помощью этого метода, позволил установить следующие закономерности [2, 3]:

- а) в очаге деформации при горячей прокатке, как правило, есть нейтральное сечение, а длина зоны отставания не превышает 80 % длины пластической области;
- б) условие, характеризующее зону прилипания, имеет место на 80–99 % длины очагов деформации рабочих клеток чистовых групп широкополосных станов горячей прокатки;
- в) длина упругих участков может достигать 30 % от общей протяженности очагов деформации;
- г) нормальные контактные напряжения в последних клетях достигают уровня напряжений при холодной прокатке (1000–1500 МПа);
- д) нейтральное сечение не совпадает с сечением максимума контактных напряжений, расстояние между этими сечениями составляет 2–11 мм.

Для моделирования процесса горячей прокатки тонких широких полос методом конечных элементов была выбрана программа Deform-3D – признанное в металлургии современное средство, позволяющее определить напряжения и деформации по всему объему металла в функции параметров режима прокатки.

Моделирование в программном модуле Deform-3D включало следующие этапы.

Этап 1. Постановка задачи моделирования прокатки: создание 3D-моделей валков и полосы; задание свойств валков и полосы; генерация и исследование плотности конечно-элементной сетки полосы; выполнение позиционирования и определение характера взаимодействия валков и полосы; задание вращения валков; настройка параметров расчета.

Для моделирования был выбран фрагмент полосы с исходными размерами  $11,5 \times 10 \times 90$  мм. Симметрия задачи учтена по толщине полосы и по двум граням модельного образца в продольном направлении, обеспечивая прокатку без уширения. Температура полосы в начале прокатки принята  $1050$  °С, материал образца – изотропным. При решении задачи была сгенерирована произвольная сетка из 87684 конечных элементов с минимальным размером  $0,32$  мм.

Учитывая большую трудоемкость и продолжительность расчета методом конечных элементов, в процесс моделирования было включено 4 рабочих клетки непрерывного широкополосного прокатного стана.

Этап 2. Выполнение моделирования.

Этап 3. Обработка результатов моделирования.

В табл. 2 представлены энергосиловые параметры процесса прокатки полосы в клетях №№ 1-4, полученные аналитическим расчетом и моделированием процесса в модуле Deform-3D.

Таблица 2

Результаты расчета энергосиловых параметров горячей прокатки полосы методом конечных элементов (1) и аналитическим методом (2)

Клеть №	$l_{ci}$ , мм		$\Delta l_{ci}$ , %	$p_{срi}$ , МПа		$\Delta p_{срi}$ , %	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
	1	2		1	2		1	2	
1	61,83	62,29	0,7	235	243	3,2	14,54	15,12	4
2	47,11	51,3	8,9	341	344	0,9	16,05	17,65	9,9
3	28,98	32,87	14,1	490	418	14,7	14,92	13,75	7,8
4	25,75	29,47	14,4	653	603	7,5	16,81	17,76	5,7

Примечание.  $l_{ci}$  – длина очага деформации,  $p_{срi}$  – среднее значение нормальных контактных напряжений;  $P_i$  – усилие прокатки;  $\Delta$  – расхождения в расчетах параметров прокатки методом конечных элементов и аналитическим.



Рис. 2. Графики распределения касательных контактных напряжений по длине очага деформации 1-й клетки 6-клетевого стана горячей прокатки «1700», полученные с помощью программы Deform-3D

На рис. 2–5 представлены графики распределения контактных напряжений по длине очагов деформации рабочих клеток №№ 1 и 4, полученные моделированием процесса горячей прокатки в программе Deform-3D. На рис. 3 и 5 кривые 2 – это графики нормальных напряжений, полученные аналитическим расчетом с помощью метода, основанного на упругопластической модели напряженного состояния полосы в очаге деформации при прокатке тонких полос.

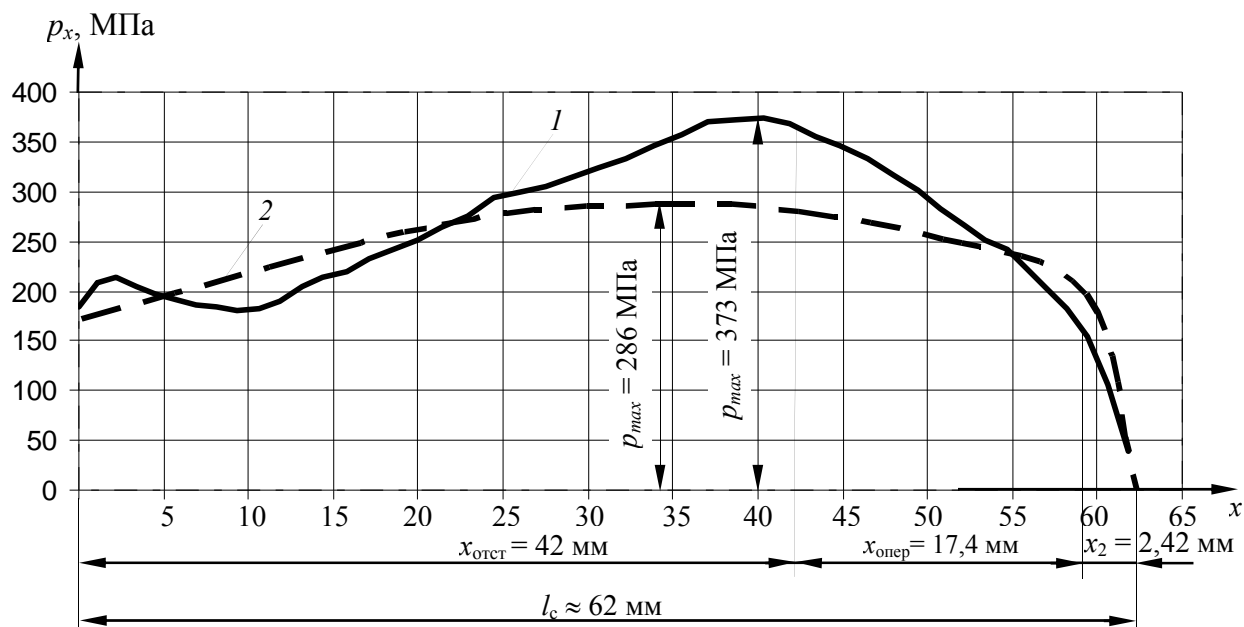


Рис. 3. Графики распределения нормальных контактных напряжений по длине очага деформации 1-й клетки 6-клетевого стана горячей прокатки «1700», полученные с помощью программы Deform-3D (кривая 1) и аналитическим методом (кривая 2)

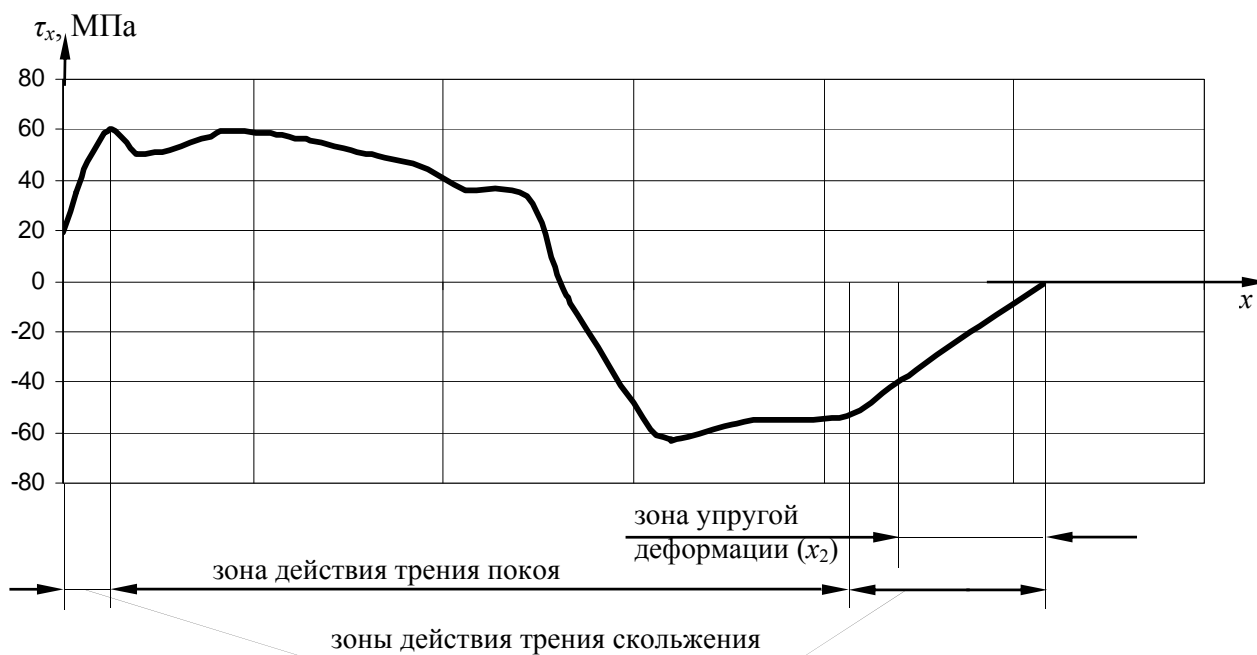


Рис. 4. Графики распределения касательных контактных напряжений по длине очага деформации 4-й клетки 6-клетевого стана горячей прокатки «1700», полученные с помощью программы Deform-3D

Анализ результатов моделирования процесса горячей прокатки методом конечных элементов в модуле Deform-3D, сопоставление этих результатов с результатами, которые дают аналитические методы, позволили сделать следующие выводы.

1. Согласно [4], можно считать, что участки, где напряжения трения  $\tau_x$  изменяются приблизительно пропорционально изменению нормальных напряжений  $p_x$ , то есть в определенной мере справедлив закон трения Амонтона  $\tau_x = \mu p_x$ , характеризуются наличием контактного скольжения. Участок, на котором изменение  $\tau_x$  не подчиняется закону Амонтона, соответствует зоне прилипания.

Из графиков рис. 2–5 видно, что зона прилипания занимает 83 % и 75 % протяженности очагов деформации клетей №№ 1 и 4 6-клетевого стана «1700» соответственно.

Расчет структурных параметров очага деформации аналитическим методом показал, что зона прилипания занимает 95 % и 75 %, то есть результаты, полученные двумя методами, очень близки.

2. Поскольку на упругих участках очага деформации действует закон Гука, то изменение касательных контактных напряжений на них происходит линейно [3]. Моделирование в Deform-3D показало, что упругие участки при горячей прокатке особо тонких широких полос значительны и составляют 3,9 % и 15,6 % от общей протяженности очагов деформации клетей №№ 1 и 4, что согласуется с результатами, полученными аналитическим методом (5 % и 25 %), а также с результатами, изложенными в работе [3].

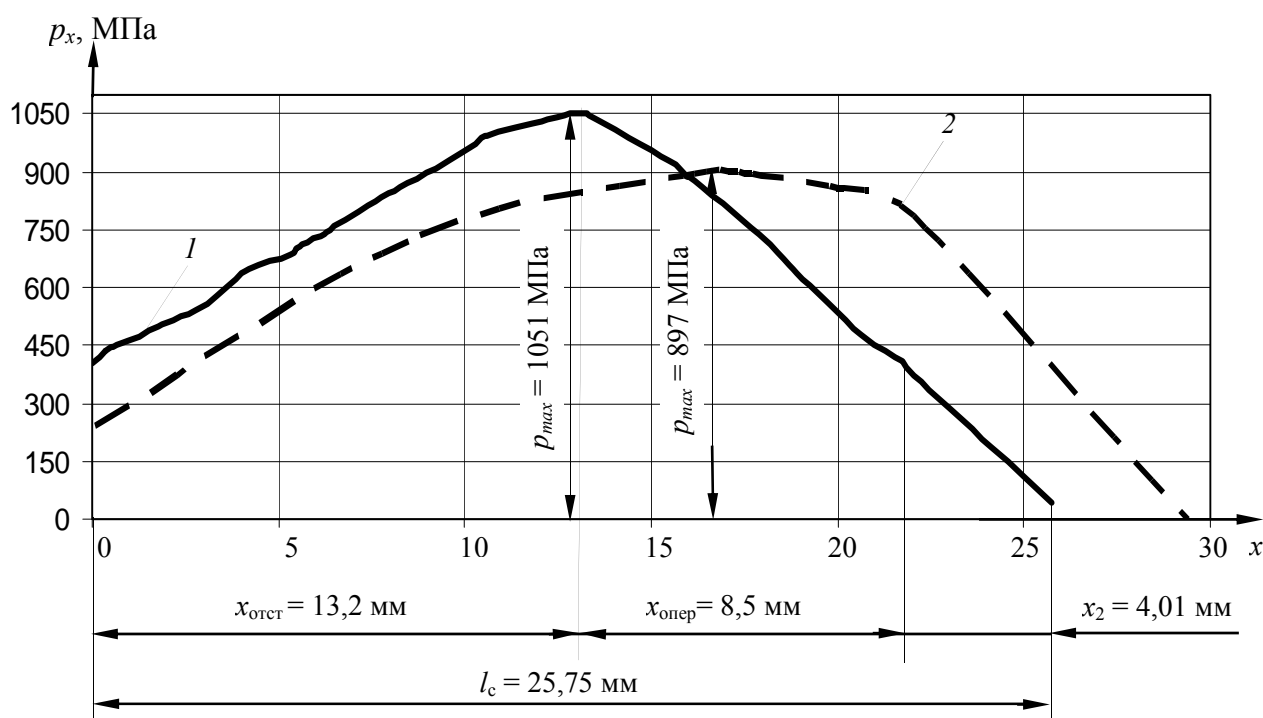


Рис. 5. Графики распределения нормальных контактных напряжений по длине очага деформации 4-й клетки 6-клетевого стана горячей прокатки «1700», полученные с помощью программы Deform-3D (кривая 1) и аналитическим методом (кривая 2)

3. Протяженности зон отставания, рассчитанные двумя методами, оказались весьма близки и составили: 61–71 % от общей длины пластических участков при моделировании методом конечных элементов и 71,5–79,6 % при моделировании аналитическим методом.

4. В работах [3, 5] на основе аналитических расчетов установлено, что нейтральное сечение не совпадает с сечением максимума контактных напряжений, особенно в первых клетях чистовой группы.

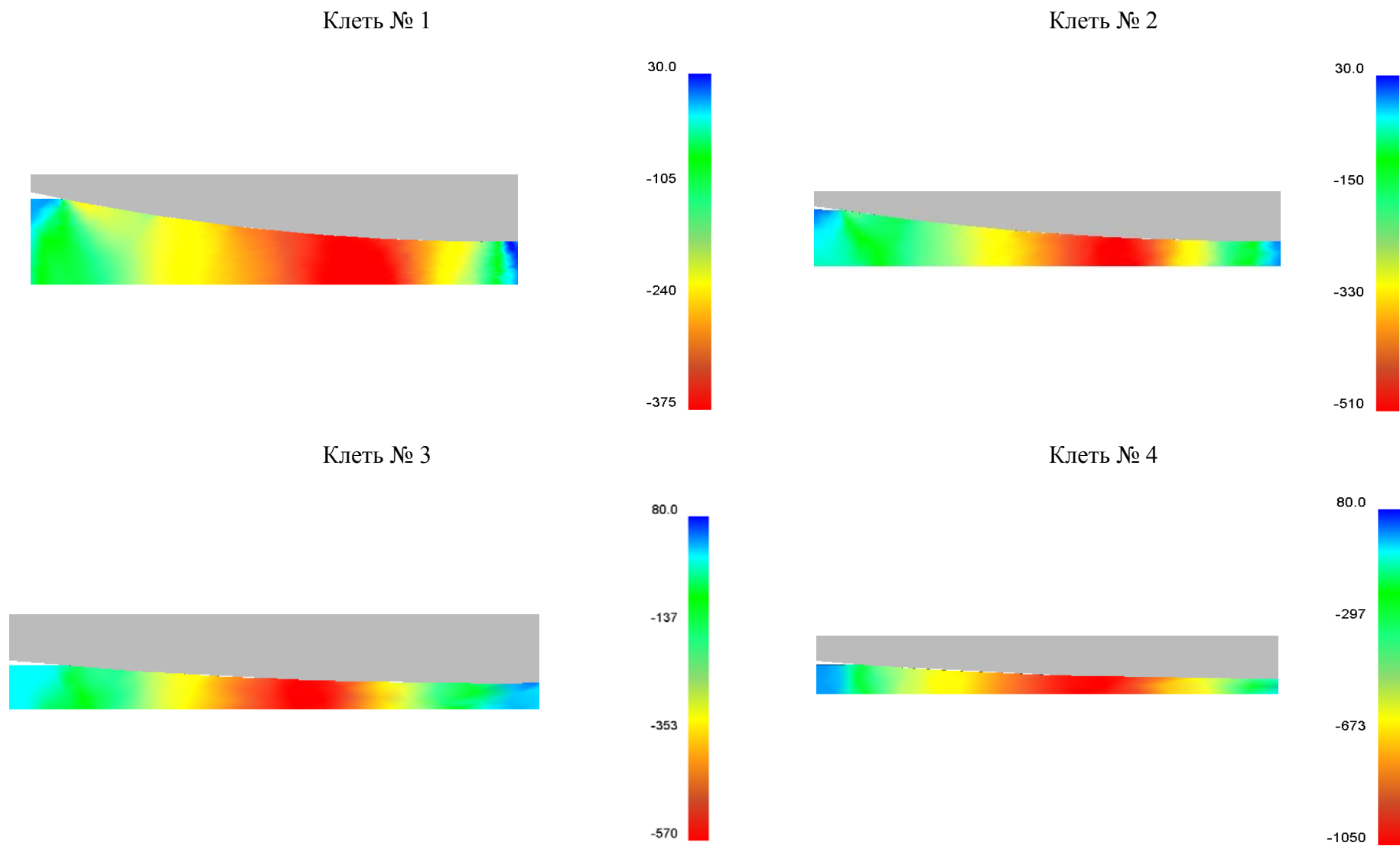


Рис. 6. Поля распределения нормальных напряжений по длине очагов деформации рабочих клеток №№ 1–4 непрерывного широкополосного стана горячей прокатки

Моделирование в программном пакете Deform-3D подтвердило и эту особенность очага деформации при горячей прокатке. Из рис. 3 видно, что расстояние между указанными сечениями составляет примерно 2 мм.

5. На рис. 6 представлены поля распределения нормальных контактных напряжений в четырех клетях широкополосного стана, полученные моделированием в модуле Deform-3D.

Из рис. 6 видно, что максимальные значения нормальных контактных напряжений увеличиваются от 370 МПа в первой клетке до 1050 МПа в четвертой клетке. Аналогичные результаты получены при расчете нормальных напряжений аналитическим методом.

6. Из табл. 2 видно, что в клетях №№ 1–4 расхождения в расчетах длины очага деформации и средних контактных напряжений двумя методами – методом конечных элементов и аналитическим – не превышают 15 %, а в расчете усилий прокатки – 10 %.

Таким образом, аналитический метод энергосилового расчета процесса горячей прокатки, основанный на упругопластической модели напряженного состояния полосы в очаге деформации [3], обеспечивает достаточную для практики точность и оперативность расчета структурных и силовых параметров, что позволяет использовать его для разработки энергоэффективной технологии производства тонких горячекатаных полос.

## ВЫВОДЫ

Выполнен сопоставительный анализ точности расчета структурных и силовых параметров очагов деформации рабочих клеток чистовых групп непрерывных широкополосных станов горячей прокатки аналитическим методом и методом конечных элементов. В результате установлено, что аналитический метод, основанный на упругопластической модели напряженного состояния полосы в очаге деформации, является более оперативным, по сравнению с методом конечных элементов, и позволяет рассчитывать усилия прокатки с погрешностью, не превышающей 13 % по отношению к измеренным значениям.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбин Ю. И. *Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением* / Ю. И. Рыбин, А. И. Рудской, А. М. Золотов. – СПб. : Наука, 2004. – 644 с.
2. Гарбер Э. А. *Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации* / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, П. А. Тарасов // *Производство проката*. – 2007. – № 4. – С. 7–15.
3. Кожевникова И. А. *Производство проката. Том 1. Книга 2. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов* / И. А. Кожевникова, Э. А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2010. – 252 с.
4. Грудев А. П. *Теория прокатки* / А. П. Грудев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
5. Целиков А. И. *Теория расчета усилий в прокатных станах* / А. И. Целиков. – Москва : Металлургия, 1962. – 494 с.

Кожевникова И. А. – канд. техн. наук, доц. ГОУ ВПО «ЧГУ»;

Болобанова Н. Л. – доц. ГОУ ВПО «ЧГУ».

ГОУ ВПО «ЧГУ» – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Череповецкий государственный университет», г. Череповец, Россия.

E-mail: mamz@chsu.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2011 г.