

## НЕРАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ОВАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК С НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ТЕЧЕНИЮ.

СМИРНОВ Е.Н. (ДОНГТУ)

*Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований на модельных образцах по изучению и оценке влияния неравномерного распределения температуры по сечению на динамику изменения коэффициента неравномерности распределения продольных скоростей течения металла  $K_v$  при контролируемой прокатке.*

Достоинства контролируемой прокатки в отношении качества проката однозначны. Наряду с более высокими показателями прочности достигаются и повышенные характеристики вязкости. Для определенных материалов термообработка может быть или полностью исключена, или получена структура более подготовленная к последующей термообработке. В ряде случаев для реализации процесса контролируемой прокатки необходима дальнейшая детализация технических аспектов деформации металла с неравномерным температурным полем. Построенные за последнее десятилетие сортопрокатные и проволочные станы в различных странах (стан фирмы «Фэнг Син айрон энд стил», Оули, Тайвань, стан фирмы «Эстебан Орбегоза с. а.», г. Зумарага, Испания, стан ОАО «Макеевский металлургический комбинат», г. Макеевка, Украина и др.), предусматривают многостадийное охлаждение раската в потоке стана с обязательной низкотемпературной деформацией в двухклетевой непрерывной группе. В то же время, технические аспекты влияния такого характера деформации на распределение продольных скоростей течения металла, (а равно и возникающие напряжения) по сечению проката, изучены не в полной мере и нуждаются в дальнейшей детализации.

Известно [1], что знание продольных скоростей течения металла позволяет качественно представить напряженное состояние при пластическом формоизменении. В связи с этим, при решении ряда практических задач технологии обработки металлов давлением, связанных с определением характеристик напряженно-деформационного состояния, исключительно важную роль на начальной стадии обобщения результатов исследования имеет четкое представление о характере неравномерности распределения продольных скоростей течения металла.

В качестве характеристики неравномерности распределения этой величины может служить коэффициент  $K_v$ :

$$K_v = \frac{V_{xi} - V_{xi}^{cp}}{V_{xi}^{cp} - V_0}, \quad (1)$$

где  $V_{xi}$  — продольная скорость течения металла в рассматриваемой точке, м/с;  
 $V_{xi}^{cp}$  — средняя продольная скорость течения металла в каждом сечении  $x_i = const$ , м/с

При этом определение параметра  $V_{xi}^{cp}$  производится по площадям  $i$ -тых поперечных сечений  $F_i$  из условия постоянства секундных объемов:

$$V_0 \cdot F_0 = V_{xi}^{cp} \cdot F_i, \quad (2)$$

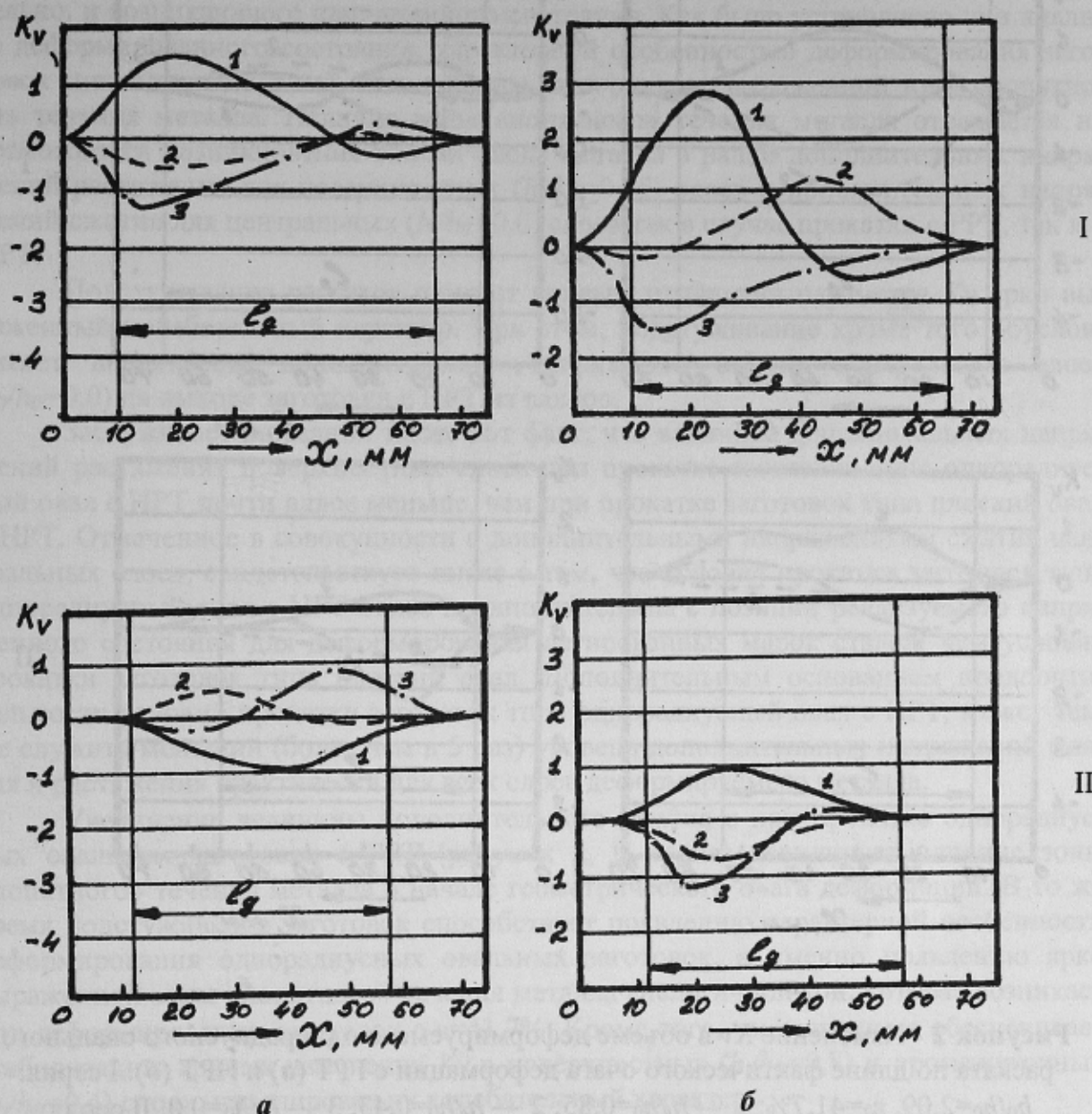
где  $F_0$  — площадь поперечного сечения недеформированной части заготовки,  $\text{м}^2$ ;  $V_0$  — начальная продольная скорость заготовки за пределами фактического очага деформации,  $\text{м/с}$ .

В свете такого подхода в настоящей работе приведены полученные в результате обработки первичной экспериментальной информации [2] данные о распределении коэффициента неравномерности  $K_v$  вдоль направления прокатки  $x$ , а также выполнена оценка (на качественном уровне) напряженного состояния в вертикально-продольной плоскости симметрии прокатанных в формирующем арматурный профиль № 28 калибре плоских и однорадиусных овальных заготовок с равномерным распределением температуры (РРТ) и неравномерным (НРТ) при величинах относительного обжатия  $\varepsilon_1=30,0\%$  и  $\varepsilon_2=41,7\%$ . При использовании этого коэффициента в зонах, где  $K_v > 0$ , возникают дополнительные сжимающие напряжения, а где  $K_v < 0$  — дополнительные растягивающие напряжения. При этом в отличие от ранее использовавшихся коэффициентов неравномерности [1], вычисляемый соответственно уравнению (1) коэффициент учитывает жесткую трансляцию деформируемой заготовки до начала деформирования со скоростью  $V_0$ .

Для случая прокатки плоских овальных заготовок с обжатием 41,7% (рисунок 1, I серия) в центральных слоях заготовок с РРТ следует ожидать дополнительных растягивающих напряжений ( $K_v < 0$ ) перед входом в геометрический очаг деформации и сжимающих напряжений — после выхода из него ( $K_v > 0$ ). Вместе с тем при прокатке заготовок с НРТ величина дополнительных растягивающих напряжений больше, чем при прокатке заготовок с РРТ. Отмеченное следует учитывать при прокатке заготовок из сложнолегированных марок сталей. Наряду с этим, в поверхностных слоях заготовок с НРТ и РРТ на входе в геометрический очаг деформации следует ожидать дополнительных сжимающих напряжений ( $K_v > 0$ ), а на выходе из очага деформации — дополнительных растягивающих напряжений. Следует, однако, отметить, что величина дополнительных сжимающих напряжений в первой половине очага деформации для случая прокатки заготовок с НРТ почти вдвое больше, чем для случая прокатки заготовок РРТ. Во второй половине очага деформации величина дополнительных растягивающих напряжений для случая прокатки заготовок с НРТ почти вдвое больше, чем для случая прокатки заготовок с РРТ, то есть можно предположить, что подстуживание увеличивает вероятность порывов поверхностных слоев заготовок. Кроме того, повышению вероятности разрушения поверхностных слоев способствует также столь значительная по величине амплитуда колебаний, что фактически ставит эти слои металла в условия знакопеременной деформации. Одновременно, если при прокатке заготовок с РРТ промежуточные слои ( $h_i/h_0 = 0,4$ ) на протяжении всего очага деформации находятся в области дополнительных растягивающих напряжений, то подстуживание способствует возникновению в них дополнительных сжимающих напряжений, за исключением небольшой области вблизи входа металла в валки, где возможно появление дополнительных растягивающих напряжений. В результате проведенного анализа можно отметить, что подстуживание способствует тому, что промежуточные слои деформируются в более благоприятных условиях по реализуемому напряженному состоянию.

Уменьшение величины относительного обжатия  $\varepsilon$  с 41,7 до 30% при неизменной форме овальной заготовки (рисунок 1, II серия) приводит к существенному преобразованию кривых изменения  $K_v$  в объеме деформируемой заготовки. В целом можно сказать, что при прокатке заготовок с РРТ к моменту выхода из геометрического очага деформации в наиболее предпочтительных условиях по реализуемому напряженному состоянию оказываются центральные слои ( $h_i/h_0 = 0,0$ ) — дополни-

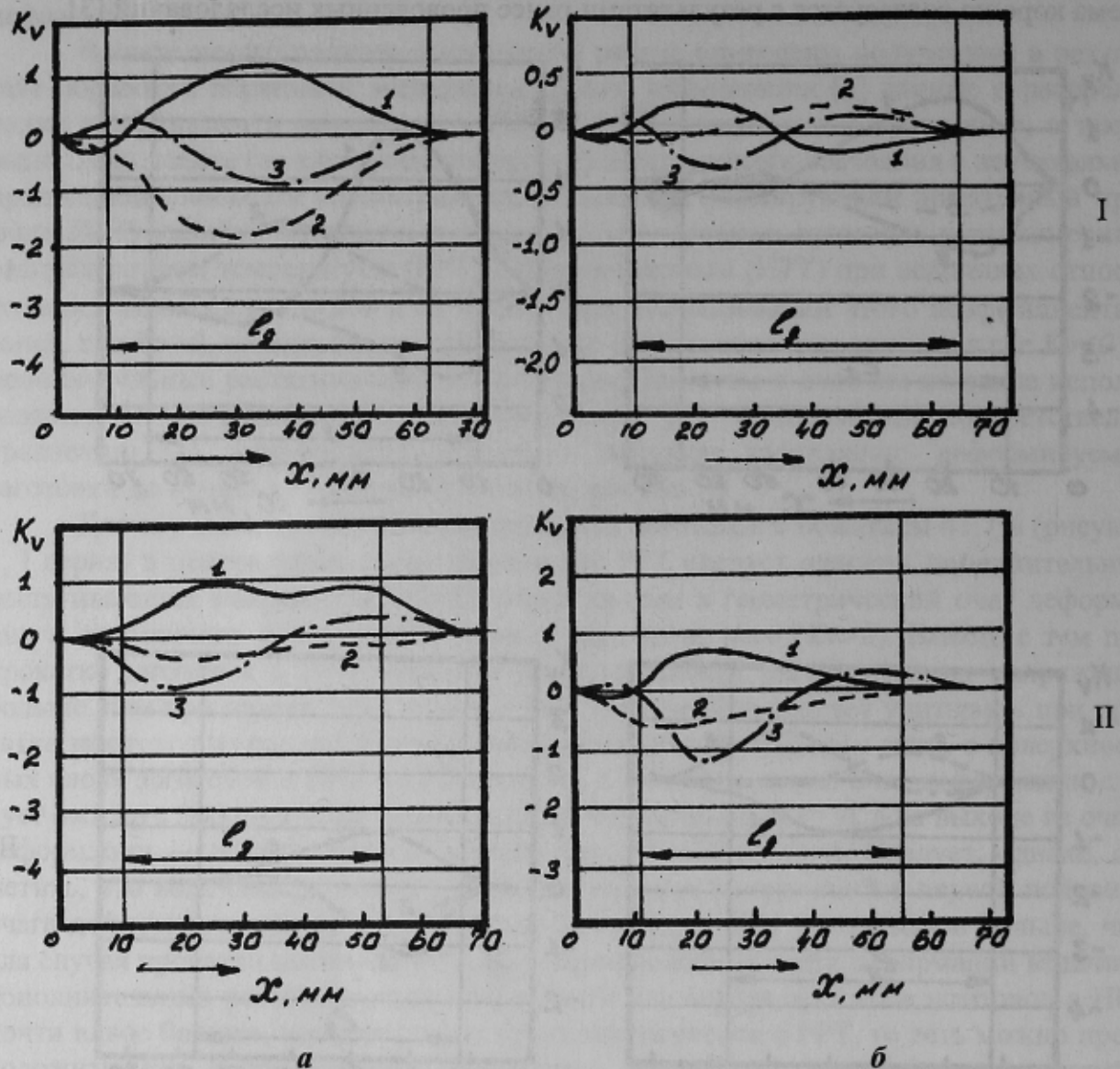
тельные напряжения сжатия, а в более худших — промежуточные ( $h_i/h_0=0,4$ ) и поверхностные ( $h_i/h_0=0,8$ ) слои: дополнительные напряжения растяжения. Данная схема хорошо согласуется с результатами ранее проведенных исследований [3].



**Рисунок 1** — Изменение  $K_v$  в объеме деформируемого плоского овального раската по длине фактического очага деформации с РРТ (а) и НРТ (б): I серия: 1 —  $h_i/h_0=0,85$ ; 2 —  $h_i/h_0=0,43$ ; 3 —  $h_i/h_0=0,0$ ; II серия: 1 —  $h_i/h_0=0,80$ ; 2 —  $h_i/h_0=0,4$ ; 3 —  $h_i/h_0=0,0$ , где  $h_i$  — координата рассматриваемой материальной точки;  $h_0$  — исходная высота заготовки

Подстуживание раскатов приводит к тому, что поверхностные слои ( $h_i/h_0=0,8$ ) оказываются в наиболее благоприятных условиях по напряженному состоянию. На протяжении всего очага деформации в них действуют дополнительные сжимающие напряжения. В то же время, уменьшение величины относительного обжатия  $\epsilon$  ухудшило положение промежуточных ( $h_i/h_0=0,4$ ) слоев в сравнении с плоскими овальными заготовками, деформируемыми с  $\epsilon=41,7\%$  (рисунок 1, I серия). Практически на протяжении всего очага деформации в этих слоях действуют дополнительные растя-

гивающие напряжения и лишь на выходе из очага деформации в них начинают действовать напряжения сжатия.



**Рисунок 2** - Изменение  $K_v$  в объеме деформируемого однорадиусного овального раската по длине фактического очага деформации с РРТ (а) и НРТ (б): I серия:  $b_0/h_0=2,09$ ,  $\epsilon_2=41,7\%$ ; 1 —  $h_i/h_0=0,85$ ; 2 —  $h_i/h_0=0,43$ ; 3 —  $h_i/h_0=0,0$ ; II серия:  $b_0/h_0=1,73$ ,  $\epsilon_1=30,0\%$ ; 1 —  $h_i/h_0=0,80$ ; 2 —  $h_i/h_0=0,4$ ; 3 —  $h_i/h_0=0,0$ , где  $h_i$  — координата рассматриваемой материальной точки;  $h_0$  — исходная высота заготовки

Следует отметить, что с уменьшением относительного обжатия  $\epsilon$  величина дополнительных сжимающих напряжений в поверхностных ( $h_i/h_0=0,0$ ) слоях почти в три раза меньше, чем в первоначально рассмотренном примере. Наблюдается также и уменьшение величины дополнительных растягивающих напряжений в центральных ( $h_i/h_0=0,0$ ) слоях в среднем на 40–50%.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в случае прокатки плоских овальных заготовок с НРТ уменьшение величины относительного обжатия  $\epsilon$  приводит к значительному улучшению условий деформирования центральных ( $h_i/h_0=0,0$ ) слоев по реализуемому напряженному состоянию, то есть, делает схему деформирования более «мягкой» и приемлемой для деформирования легированных марок стали.

Изменение формы овальной заготовки с плоской на однорадиусную при деформировании его с относительным обжатием  $\varepsilon=41,7\%$  (рисунок 2, I серия) приводит к дальнейшему видоизменению кривых распределения параметра  $K_v$ , а, следовательно, и возникающего напряженного состояния. Как было установлено при анализе деформированного состояния, характерной особенностью деформирования заготовок типа однорадиусный овал является наличие ярко выраженной зоны «попятного» течения металла. Наличие зоны «попятного» течения металла отражается на возможности возникновения вблизи входа металла в валки дополнительных напряжений растяжения для поверхностных ( $h/h_0=0,85$ ) слоев и дополнительных напряжений сжатия для центральных ( $h/h_0=0,0$ ) слоев как в случае прокатки с РРТ, так и с НРТ.

Подстуживание раскатов придает кривым изменения параметра  $K_v$  ярко выраженный колебательный характер. При этом, подстуживание кроме того обуславливает вероятность дополнительных напряжений сжатия центральных слоев ( $h/h_0=0,0$ ) на выходе заготовки с НРТ из валков.

Заслуживает внимания также тот факт, что величина дополнительных напряжений растяжения поверхностных слоев при прокатке заготовок типа однорадиусный овал с НРТ почти вдвое меньше, чем при прокатке заготовок типа плоский овал с НРТ. Отмеченное в совокупности с дополнительными напряжениями сжатия центральных слоев, свидетельствует также о том, что условия прокатки заготовок типа однорадиусный овал с НРТ более предпочтительны с позиции реализуемого напряженного состояния для деформирования легированных марок сталей, чем условия прокатки заготовок типа плоский овал. Дополнительным основанием предпочтительности условий прокатки заготовок типа однорадиусный овал с НРТ, может также служить меньший (более чем в 5 раз) уровень дополнительных напряжений сжатия и растяжения практически для всех слоев деформируемого металла.

Увеличение величины дополнительного сжатия  $\varepsilon$  при прокатке однорадиусных овальных заготовок с РРТ (рисунок 2, II серия) нивелирует влияние зоны «попятного» течения металла в начале геометрического очага деформации. В то же время подстуживание заготовок способствует появлению характерной особенности деформирования однорадиусных овальных заготовок, а именно появлению ярко выраженной зоны «попятного» течения металла аналогичной той, которая возникает при деформировании заготовок с  $\varepsilon=41,7\%$ . Кроме того, уменьшение  $\varepsilon$  обеспечивает стабилизацию кривых изменения  $K_v$  в поверхностных ( $h/h_0=0,8$ ) и промежуточных ( $h/h_0=0,4$ ) слоях, нивелировав их колебательный характер.

В целом следует подчеркнуть, что с позиции реализуемого напряженного состояния данная схема обладает тем преимуществом, что обеспечивает возникновение дополнительных сжимающих напряжений в поверхностных ( $h/h_0=0,8$ ) и центральных ( $h/h_0=0,0$ ) слоях на выходе металла из очага деформации, что является крайне желательным, особенно при прокате легированных марок стали.

В результате выполненных исследований установлено, что перераспределение деформаций внутри раскатов в случае их подстуживания вызывает изменение напряженного состояния поверхностных, промежуточных и центральных слоев:

- для однорадиусных овалов, в целом, наблюдается смягчение напряженного состояния практически всех слоев;
- для плоских овалов, в целом, смягчается напряженное состояние центральных слоев и более «жестким» становится напряженное состояние центральных слоев. По этой причине, в каждом конкретном случае корректировки режимов деформирования и схем

прокатки требуется проводить их оценку с учетом изменений напряженного состояния и пластичности металла прокатываемой заготовки.

### Список литературы

1. Воронцов В. К., Белевитин В. А. Скорость течения металла при винтовой прокатке круглой сплошной заготовки // Известия вузов. Черная металлургия. 1980. № 7. — С. 56–59.
2. Минаев А. А., Белевитин В. А., Смирнов Е. Н. Расчет параметров пластического формоизменения сортовых заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 12. — С. 26–28.
3. Литвиненко Ю. П., Яковлев А. И. Деформации и напряжения при прокатке овального раската в круглом калибре // Сталь. 1972. № 3. — С. 246–249.

© Смирнов Е.Н., 1999.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ КОНЦОВ РАСКАТА В ПЛАНЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В СИСТЕМЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ — ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВАЛКИ ЧЕРНОВОЙ КЛЕТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА

РУДЕНКО Е.А. (ДОНГТУ)

*На основе физического моделирования прокатки в мощной универсальной черновой клетки широкополосного стана получена математическая модель формоизменения концов раската в плане, позволяющая рассчитать параметры формы концов раската последовательно в вертикальных и горизонтальных валках.*

Одним из путей ресурсосбережения при производстве широкополосного проката в комплексах машины непрерывного литья заготовок — широкополосный стан горячей прокатки (МНЛЗ — ШСГП) является совмещение процессов редуцирования и прокатки слябов в мощных черновых универсальных клетях ШСГП. Применяют универсальные клетки с системой вертикальные — горизонтальные валки (ВВ — ГВ) и с системой ВВ — ГВ — ВВ [1].

Известно, что большие обжатия в ГВ и особенно в ВВ характеризуются максимальным развитием неустановившихся стадий прокатки на концевых участках раската, обуславливающих искажение их формы от прямоугольной и, в конечном счете, повышенную концевую обрезь. Наибольшая концевая обрезь получается при реализации процесса простого редуцирования (обжатие в ВВ — проглаживание в ГВ) [2].

При совмещенном процессе редуцирования — прокатки форма концов раската в плане определяется распределением обжатий в системе ВВ — ГВ. Наиболее эффективным методом снижения концевой обреза является переменное обжатие в ВВ по длине раската [1]. Этот метод может быть реализован только с помощью автоматизированной системы управления формой концов раската в плане. Эффективность работы такой системы во многом зависит от точности прогнозирования параметров формоизменения в процессе редуцирования — прокатки.

Большинство известных математических моделей формоизменения при прокатке в ВВ и ГВ не учитывает полный набор основных параметров прокатки, и описывают форму раската в плане в конце отдельных этапов прокатки [3].

Некоторые модели вообще не учитывают технологические параметры и не могут быть использованы для прогнозирования формоизменения [4].

Ниже приведена математическая модель параметров формоизменения концов раската в плане при прокатке в системе ВВ — ГВ мощной черновой клетки.