

УДК 669.18:621.771.237:

**Особенности прокатки высоких горячих полос, подаваемых
встык в очаг деформации**

**Feature of rolling of high hot stripes being fed end-to-end to the
deformation center**

Авторы: аспирант НИТУ «МИСиС» А.Н. Тинигин

The authors: postgraduate student of Scientific-Research Technological University
«MISIS» Tinigin A.N.

Аннотация: Условия формоизменения переднего и заднего концов подката при прохождении универсальных клетей черновой группы ШПС г.п. приводят к образованию ярковыраженной формы подката (в плане) в виде «рыбьего хвоста». Далее концы подката обрезаются на летучих ножницах перед чистовой группой клетей, что приводит к значительным потерям металла в календарном году. В статье приводятся результаты моделирования процесса одновременной прокатки высоких горячих полос, подаваемых встык в очаг деформации, в системе имитации технологического процесса, основанной на методе конечных элементов (программный пакет Deform-3D). Такое прохождение металлом очага деформации, во-первых, затрудняет свободное продольное неравномерное течение концевых частей металла, при этом следует ожидать снижения потерь металла в обреш на летучих ножницах, во-вторых, снижается число захватов раската и, следовательно, число ударных нагрузок в главной линии каждой клетки этой группы.

Abstract: The requirements of the front and back transfer bar ends deformation under going through universal stands of roughing train h.r. WSM lead to the forming of the pronounced bar form (in the plan) in the shape of “fishtail”. The bar ends are cut by flying shears later before the finishing train thus it is led to considerable metal losses annually. The result of the process simulating of the simultaneous rolling of high hot stripes being fed end-to-end to the deformation center in the imitation system of technological process based the finite element

method (programmed package Deform-3D). Such metal going through the deformation centre, in the first place, makes difficult the free longitudinal uneven running of the end metal parts and metal losses reduction into the cuttings by flying shears should be expected, in the second place, the number of rolling grabs and therefore the number of percussive loading in the main line of each stand of this group are reduced.

Ключевые слова: *Широкополосовой стан горячей прокатки; черновая группа клетей; универсальная клеть; очаг деформации; «собачья кость»; «рыбий хвост»; обрезь; встык; Deform-3D; метод конечных элементов.*

Key words: *Hot rolling wide-strip mill; roughing train; universal stand; deformation center; dogbone; fishtail; cuttings; end-to-end; Deform-3D; the finite element method.*

Совместно с официальным дистрибьютором программного комплекса *Deform-3D* компанией *ООО «Инжиниринговая компания APTEX»* - проведено моделирование, процесса одновременной прокатки высоких горячих полос, подаваемых встык в очаг деформации, в системе имитации технологического процесса, основанной на методе конечных элементов (программный пакет *Deform-3D*).

Проведенное моделирование позволило изучить закономерности пластической деформации металла в универсальных клетях черновой группы клетей широкополосового стана при поштучной прокатке слябов («классической») и согласно предложенной технологии (1), (2) с подачей двух и более слябов в черновую группу клетей вплотную друг к другу.

Моделирование включало имитацию следующих стадий технологии горячей прокатки на широкополосовом стане: нагрев сляба из холодного состояния в методических печах, передача сляба от печей до вертикального окалиноломателя (*ВОЛ*), поочередная прокатка в *5-ти* универсальных черновых клетях. Тем самым, проведенный эксперимент учитывал особенности формирования температурного поля металла на участке от методических печей

до промежуточного рольганга. Программные возможности *Deform-3D* позволили имитировать многие факторы, влияющие на конечную форму подката (3): прогиб валков, деформационный разогрев, теплоотдачу при контакте металла с валками и т.д.

При выборе технологических параметров за прототип принимался непрерывный широкополосовой стан горячей прокатки 2000 ОАО «НЛМК» (ТИ 05757665-ПП-01-2007). Расчет осуществляли для слябов различной ширины (950 мм, 1250 мм, 1550 и 1850 мм); для симметричного и не симметричного температурного поля сляба после нагрева в печи; для различных режимов обжата по ширине.

При изучении процесса пластической деформации в универсальных клетях было получено качественное совпадение формообразования в *Deform-3D* с практическими данными. Так после деформации в вертикальных валках поперечное сечение сляба принимает форму «собачей кости»¹. Последующая прокатка в горизонтальных валках сляба такой формы приводит к образованию подката в виде «рыбьего хвоста»¹ (в плане). Деформация подката только горизонтальными валками приводит к образованию формы подката в виде «языка»¹.

Было проведено сравнение формообразования подката, полученного в МКЭ пакете *Deform-3D*, с основными показателями формообразования при поштучной прокатке в универсальных клетях ШПС г.н., рассчитанных по эмпирическим формулам различных авторов (4).

Расхождения в значениях основных показателей формообразования составило не более 10% (заметим, что расчеты по эмпирическим различным авторов так же имеют разброс полученных данных приблизительно в 10%), что является удовлетворительным показателем. Отмеченное позволяет считать, что моделирование в программном комплексе *Deform-3D* достаточно надежно отражает процессы пластической деформации горячей прокатки в универсальных клетях черновой группы ШПС г.н. Расхождения вполне

¹ термин из работы (4)

объясняются определенными различиями в условиях прокатки, при которых были получены эмпирические формулы и при которых проводился расчет в Deform-3D.

Формоизменение подката

Известно (5), что действие внешних зон проявляется в стремлении выровнять деформацию полосы по толщине и в продольном направлении. На входе и на выходе подката из валков возникают поперечные напряжения не только в боковых частях полосы, в контактной зоне деформации, но и в тех боковых частях, которые находятся во внеконтактных зонах деформации на входе и на выходе из валков. Вследствие этого пластическая деформация поперечного сечения сляба начинается еще до его попадания в геометрический очаг деформации и продолжается после выхода из него. Отмеченное действие внешних зон оказывает существенное влияние на контактные напряжения и пластическую деформацию.

При обжатии вертикальными валками возникает широко известное явление заужения переднего конца подката (6), связанное с внеконтактной деформацией переднего конца после выхода его из очага деформации. Данное явление ведет к увеличению обрезки на летучих ножницах промежуточного рольганга ШПС г.п. Форма подката может быть улучшена путем прокатки слябов в вертикальных валках с переменным обжатием слябов по их длине (7), (8).

Неустоявшаяся стадия прокатки (стадия прокатки, когда напряжение деформации распространяется на передний или задний конец подката, а влияние внешних зон не достаточно велико для выравнивания продольной вытяжки по ширине полосы) в вертикальных и горизонтальных валках универсальной клетки характеризуется неравномерностью продольной скорости по ширине концов подката.

Часть объема металла, вытесняемого вертикальными валками при захвате и выдаче полосы, идет на продольную вытяжку (начальное формирование очертания «рыбий хвост»), а при отдалении от краев подката, все больше

стремится к течению в вертикальном направлении (формирование «собачей кости»). Т.е. относительно основной части полосы часть объема при захвате движется вперед, а при выдаче назад, тем самым, создается эффект, соответственно, большей и меньшей скоростей прокатки кромок конечных частей подката (см. Рис. 1). При устоявшейся стадии прокатки в вертикальных валках отсутствует продольная вытяжка, а весь вытесняемый вертикальными валками объем металла идет на локальное увеличение толщины полосы по кромкам (образование в поперечном сечении формы «собачей кости»).

Описанная картина влияния внешних зон на концах подката, а так же формирование «собачей кости» и начального очертания «рыбьего хвоста» в вертикальном проходе, способствует выраженной продольной вытяжке боковых областей концов подката в горизонтальном проходе (рост продольной скорости боковых частей относительно центральных). Такое распределение скоростей и вытяжек на концах подката приводит к формированию ярковыраженного «рыбьего хвоста».

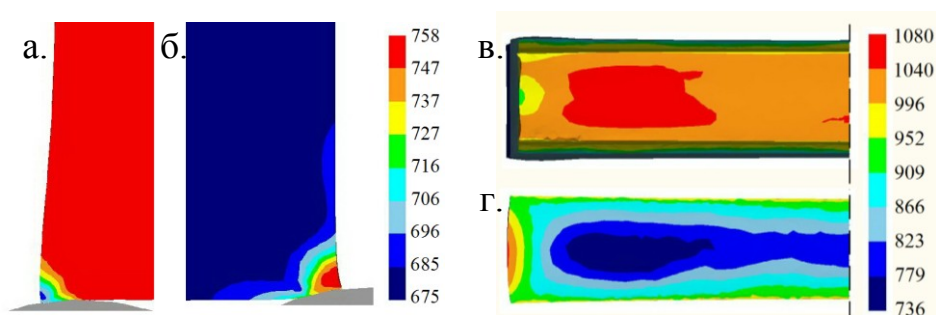


Рис. 1 Вид в плане (а, б) и поперечное сечение (в, г) в момент прохождения переднего (б, в) и заднего (а, г) концов подката очага деформации вертикальных (а, б) и горизонтальных (в, г) валков универсальной клетки R1. Цветом обозначены области металла, имеющие соответствующую продольную скорость движения.

На деформацию металла вертикальными валками в черновой группе ШПС г.п. оказывает существенное влияние распределение температуры в сечениях сляба, в частности повышенное охлаждение кромок слябов на глубину 50-100 мм от бокового края сляба (9), в процессе транспортирования от методических печей до черновой группы клеток. Указанное явление повышает сопротивление деформации кромок сляба в сравнении с его центральными слоями (10). Из-за последнего максимальная толщина «собачей кости» (h_b)

смещается на *50-100 мм* от края подката. Соответственно при прокатке в горизонтальных валках отмеченное явление приводит к расположению максимальной вытяжки на расстоянии *50-100 мм* от края подката (в плане). Несимметричность температурного поля сляба приводит к неравномерной продольной вытяжке кромок на концах подката.

Подача слябов встык в очаг деформации принципиально изменяет условия пластической деформации передних и задних концов подката. Благодаря отмеченному явлению увеличения продольной скорости кромок переднего конца и уменьшения продольной скорости кромок заднего конца относительно остального объема металла, вызванных продольной вытяжкой, появляются условия стесненного продольного течения переднего и заднего концов раскатов, подаваемых встык при прохождении очага деформации. Последнее в конечном итоге ведет к уменьшению продольной вытяжки концевых частей подката, изменяет условия формирования «рыбьего хвоста». Дополнительно эффект стесненной деформации усиливается явлением опережения и отставания металла в очаге деформации (11), (12). При этом имеется возможность создавать подпор в очаге деформации заднего конца первого подката передним концом второго за счет увеличения скорости вращения вертикальных валков в универсальных клетях при подаче слябов в очаг деформации вплотную друг к другу.

Особенности совместного прохождения горизонтальных валков двумя подкатами при подаче вплотную друг к другу показано на Рис. 2. Области соприкосновения раскатов совпадают с областями максимальной продольной вытяжки подката при поштучной прокатке. В местах контакта скорость раскатов выравнивается, и, следовательно, прекращается повышенная продольная вытяжка боковых участков подката. Вытесняемые при этом объемы металла идут как на уширение подката, так и по направлению к центру подката (в плане). Происходит увеличение зоны контакта подкатов и смещение ее в сторону центра подкатов. В результате уменьшается формирование концевых

частей в виде «рыбьего хвоста», а так же уменьшается зауженность переднего конца подката.

Заметим, что из-за указанных особенностей прохождения очага деформации встык в вертикальных валках эффект изменения течения металла незначителен, что обусловлено малой длиной дуги контакта. Стесненная прокатка в горизонтальных валках оказывает большее влияние на форму подката, чем в вертикальных, ввиду большей длины очага деформации, а, следовательно, и времени контакта.

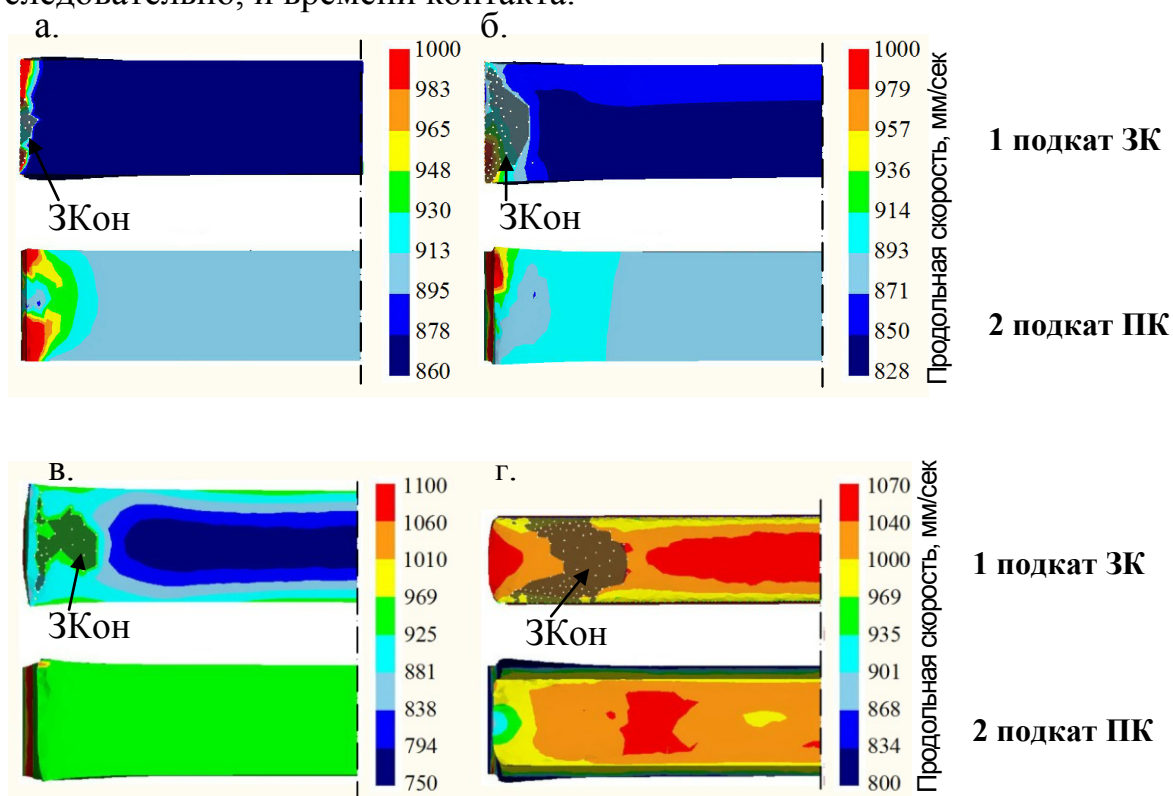


Рис. 2 Вид сзади 1-го и вид спереди 2-го (по направлению прокатки) подкатов в момент заправки (а, в) 2-го подката в очаг деформации вертикальных (а, б) и горизонтальных (в, г) валков и в момент выхода (б, г) 1-го подката из очага деформации при подаче подкатов вплотную друг к другу в универсальную клеть R1. ЗКон – зона контакта подкатов; ПК – передний конец; ЗК – задний конец. Цветом обозначены области металла, имеющие соответствующую продольную скорость движения. Превышение продольной скорости центральных (не деформируемых) слоев второго по направлению прокатки подката по сравнению с первым объясняется рассогласованием скоростей вертикальных и горизонтальных валков.

Обрезь металла

На Рис. 3, а показаны зависимости количества обрезки металла (кг) от ширины полосы при поштучной прокатке и прокатке встык, полученные при расчетах в МКЭ-комплексе *Deform-3D* (на графиках приведена обрезь металла при идеальном резе понцов подката). Согласно статистическому анализу обрезки

более 40 тыс. полос, произведенных за период 2007-2010 годов на ШПС г.п. ОАО «НЛМК» (Рис. 3, б), видно превышение уровня обрезки металла по сравнению с данными, полученными в Deform-3d. Такое различие объясняется тем, что реальная линия реза концов подката отличается от идеальной линии, что ведет к дополнительным потерям металла.

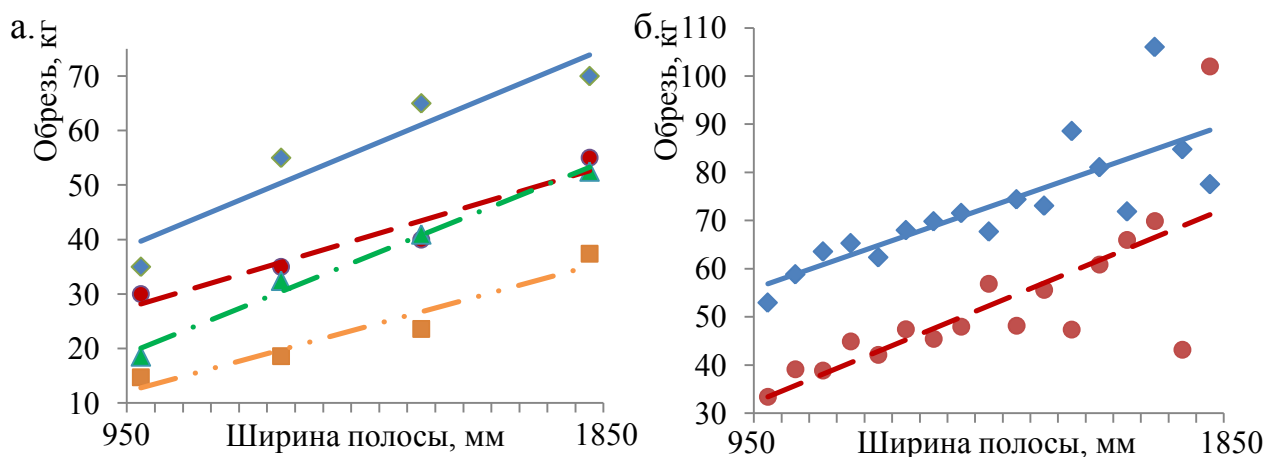


Рис. 3 Обрезь на летучих ножницах при прокатке слябов в черновой группе клетей согласно моделированию в МКЭ-комплексе Deform-3D (а) и согласно статистическим данным более 40 тыс. полос, прокатанных на отечественном ШПС г.п. 2000; сплошной и пунктирной линиями показана обрезь, соответственно, переднего и заднего концов при поштучной прокатке, штрихпунктирными линиями с 1 и 2 точками – обрезь переднего и заднего концов при прокатке встык.

Из приведенных данных видно, что сокращение обрезки заднего конца выше, чем у переднего конца, при том, что обрезь переднего конца выше, чем у заднего, что объясняется большей продольной вытяжкой боковых частей подката переднего конца, чем у заднего. Величина обрезки прямо пропорциональна ширине подката, в то время как сокращение обрезки при прокатке встык обратно пропорционально ширине подката. Такая закономерность объясняется тем, что при прокатке встык зоны соприкосновения раскатов расположены у кромок, а, следовательно, при увеличении ширины подката, уменьшается влияние стесненной прокатки на центральную часть подката, от которой во многом зависит величина обрезки на летучих ножницах.

Расчет средневзвешенного ожидаемого уменьшения обрезки на летучих ножницах по всему сортаменту производят по формуле:

$$\Delta\bar{Q} = \sum \left(\sum k_i \cdot (\Delta q_i^{nep} + \Delta q_i^{zad}) \right)_j \cdot a_j \cdot l_j$$

где k_i – доля полос данного типоразмера в общем объеме производства стана;

Δq_i – изменение производительности для полос данного типоразмера.

a_j – доля подкатов после клетки R5 данной длины в общем объеме производства;

l_j – отношение концов раскатов в группе пройденных встык к концам раскатов пройденных не встык (для группы из 2-х слябов – 0,5, из 3-х слябов – 0,666, из 4-х – 0,75).

На основе технологического отчета стана *ШПС г.п. 2000* за 2007 г., было посчитано ожидаемое средневзвешенное по году уменьшение обрезки, которое составило **21,3 %**.

При моделировании рассматривали прокатку встык только в первых трех клетях; в последних двух клетях из-за частого образования загиба переднего конца полосы, возникает опасность прокатки полос, наложенных друг на друга. При этом, естественно, увеличение количества клетей пройденных встык приведет к еще большему уменьшению обрезки.

При расчетах в МКЭ-комплексе *Deform-3D* были получены некоторые интересные закономерности; так на **Рис. 4, а** показана зависимость количества обрезки ($кг$) на летучих ножницах от суммарного обжатия подката по ширине вертикальными валками. Из **Рис. 4, а** видно, что увеличение суммарного обжатия вертикальными валками, ведет к увеличению обрезки металла, а, следовательно, с точки зрения сокращения обрезки, следует уменьшать суммарное обжатие вертикальными валками. При этом стоит помнить о положительном влиянии обжатия по ширине на напряженное состояние кромок. На **Рис. 4, б** показана зависимость количества обрезки металла на летучих ножницах от начальной толщины сляба (а, следовательно, и от количества проходов в черновой группе клетей). Представленные на **Рис. 4, б** данные, полученные в МКЭ-комплексе *Deform-3D*, показывают, что

уменьшение толщины сляба с 240 мм до 80 мм (что соответствует уменьшению количества проходов с 5 до 2) ведет к уменьшению обрезки на 72%.

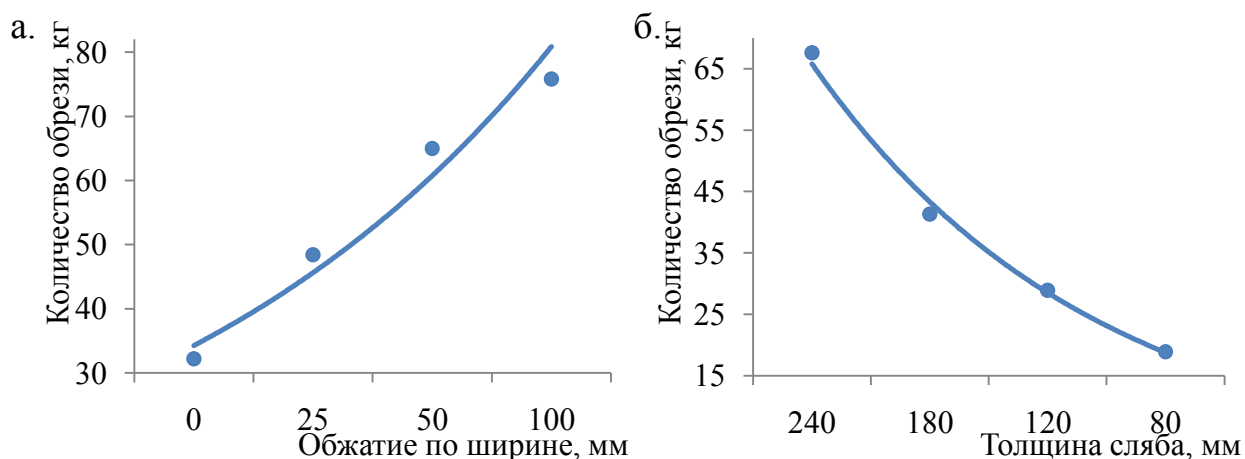


Рис. 4 Зависимость количества обрезки металла на летучих ножницах на промежуточном рольганге от суммарного обжатия по ширине в черновой группе клетей (а) и толщины слябов (б).

При проведении исследования в *Deform-3D* был установлен ряд недостатков в реализации МКЭ программным комплексом:

- неустойчивость решения, а так же ошибки решения. При моделировании сложных процессов, например взаимной деформации пластических объектов, программа автоматически перестраивает сетки объектов с большим количеством элементов, что может приводить к изменению формы объектов. Правильность перестроения сеток программно отследить невозможно, и остается только визуально оценивать правильность формообразования заготовки. Существенные ошибки перестроения сетки при этом видны невооруженным глазом, незначительные же ошибки отследить более сложно или невозможно, именно эти ошибки в конечном итоге могут вносить достаточно заметные погрешности в конечные решения;

- недостаточно точное отражение процессов внешнего трения. К примеру, неустойчивый захват металла горизонтальными и вертикальными валками при реальных характеристиках процесса, и даже при повышенном коэффициенте трения. Этот недостаток приводит к необходимости проверки полученных данных на натурном эксперименте. Однако тот факт, что закономерности течения металла в *Deform-3D* достаточно устойчиво совпадают с классической теорией пластической деформации и эмпирическими формулами,

описывающими формообразование металла, позволяет считать полученные с использованием *Deform-3D* результаты достаточно надежными и достоверными.

Выводы

1. Совместно с официальным дистрибьютором программного комплекса *Deform-3D* компанией ООО «Инжиниринговая компания АРТЕХ» - проведено моделирование процесса одновременной прокатки высоких горячих полос, подаваемых встык в очаг деформации, в системе имитации технологического процесса, основанной на методе конечных элементов (программный пакет *Deform-3D*).

2. Сравнение формообразования подкатов в универсальных клетях полученного в МКЭ-комплексе *Deform-3D* и посчитанного по эмпирическими формулам различных авторов, показало хорошее схождение результатов. Отмеченное позволяет считать, что моделирование в программном комплексе *Deform-3D* достаточно надежно отражает процессы пластической деформации горячей прокатки в универсальных клетях черновой группы *ШПС г.п.*

3. Оценено влияние совместной прокатки слябов (встык) в очаге деформации на снижение искажения концевых частей (в плане) слябов и, соответственно, на потери металла с обрезью на летучих ножницах.

Показаны устойчивые данные о сокращении обрезки за счет технологии прокатки встык. Полученные результаты позволяют считать, что при применении технологии прокатки встык следует ожидать снижение обрезки на летучих ножницах в среднем по году на 21% (учитывая, что не все концы подкатов проходят очаг деформации встык).

4. При проведении исследования в *Deform-3D* был установлен ряд недостатков в реализации МКЭ программным комплексом:

- недостаточно точное отражение процессов, связанных с внешним трением (в частности процесс захвата металла валками);
- неустойчивость решения, ошибки перестроения сеток.

Список литературы

1. Хлопонин В. Н., Афанасьев С. А., Тинигин А. Н. Концепция увеличения производительности полностью непрерывных широкополосовых станов горячей прокатки и улучшения качества полос. *Сталь*. 2009 г., № 4, стр. 39 – 42.
2. Хлопонин В.Н., Тинигин А.Н. патент № 2386429 В21В. Опубликовано 20.04.10. Бюллетень № 11.
3. Железнов, Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. Москва : Металлургия, 1971.
4. Width control in hot strip mills. Ginzburg, V.B., и др. June 1991 г., *Iron and Steel Engineer*.
5. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. Москва : Металлургия, 1980.
6. Possibilities and Limits of Deformation in Wight Direction in HOT Flat Rolling. Pawelski, O. и Piber, V. Vol. 100, 25 Aug 1980 г., *Stahl and Eisen*, T. Vol. 100, стр. 937-949.
7. Меерович И.М., Герцев А.И., Бабицкий М.С. и др. Способ получения толстых листов прокаткой. 186950 1966 г. Бюлл. изобр. № 20.
8. Улучшение формы раскатов при прокатке на толстолистовых станах. Герцев А.И., Классен Э.Я., Меерович И.М., Смирнов В.Н., Бабицкий М.С., Зеличенко Б.Ю., Медведев В.Е. Труды ВНИИМЕТМАШ, Т. 33.
9. Transverse thermal profile mastering on the HSM. Borean, J.-L. 2006 г., *La Kумгу* в *Metallurgie-CIT*, T. 11, стр. 500-506.
10. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1976.
11. Кинематика процесса прокатки на блюминге. Полухин, И.П., и др. Москва : б.н., 1970 г., Труды МИСиС. Сб. 57. Пластическая деформация металлов и сплавов.
12. Распределение скорости деформации в зоне обжатия при прокатке. Музалевский, О.Г. 1962 г., *Сталь*, Т. 7.