

УДК 621.771.23

д.т.н. Снитко С. А.,
д.т.н. Руденко Е. А.,
Пилипенко В. В.
(ДонГТУ, г. Донецк, ДНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА РЕДУЦИРОВАНИЯ СЛЯБА ПО ШИРИНЕ В УСТАНОВКЕ ТИПА «ТРИПЛЕТ»

На основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен анализ процессов редуцирования сляба по ширине по классической схеме и в установке типа «триплет». Показана целесообразность компоновки «горизонтальная клеть – вертикальная клеть – горизонтальная клеть» с валками с гладкой бочкой. Предложен режим редуцирования сляба, обеспечивающий снижение суммарной длины искажённых концов раската на ~30 %.

Ключевые слова: форма раската в плане, редуцирование сляба по ширине, физический эксперимент, конечно-элементное моделирование, концевая обрезь, установка «триплет», неприводные валки.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Редуцирование слябов в валках универсальной клетки является одним из основных способов регулирования ширины непрерывнолитых слябов. После операций редуцирования и проглаживания образуются дефекты формы — стрелы вогнутости и утяжка ширины переднего и заднего торцов раската.

Известны технические решения [1, 2], направленные на повышение эффективности редуцирования и оптимизацию формы раската в плане, однако исследования, направленные на поиск рациональных параметров процесса, проводятся до сих пор [3–5].

В технической литературе имеется информация о редуцирующих агрегатах оригинальной конструкции типа «триплет», которые позволяют совмещать процесс редуцирования и прокатки сляба за несколько реверсивных проходов. Так, в Швеции разработан агрегат, представляющий собой непрерывную группу из трёх приводных клеток [6]. Предусмотрено горизонтальное расположение эджерных валков с калибрами, в связи с чем после нагрева в печи сляб подаётся на кантователь и устанавливается «на ребро» (рис. 1).

Вариант прокатки, когда сляб расположен горизонтально в валках трёхклетьевого ре-

версивного стана типа «триплет» (вертикальная клеть – горизонтальная клеть – вертикальная клеть), реализован в Японии на заводе фирмы Nippon Steel [8]. Особенностью технологии является обеспечение близкого к нулю межклетевого подпора (натяжения) во избежание перегрузки приводных двигателей и поломки валков. Кроме того, горизонтальные валки — неприводные.

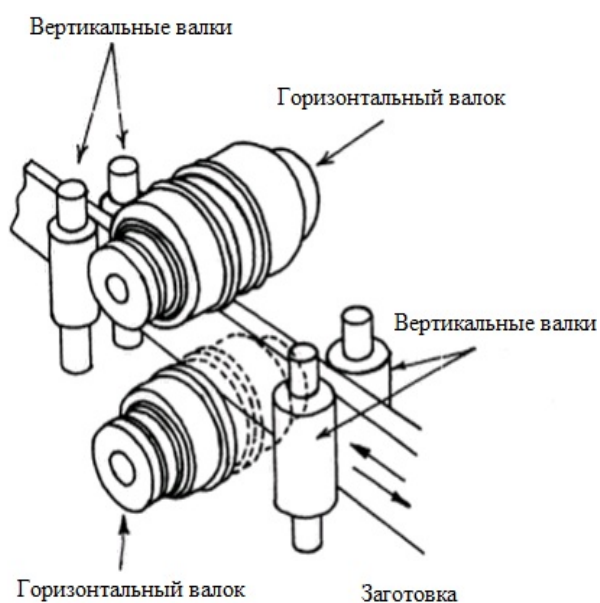


Рисунок 1 Схема расположения валков в установке типа «триплет» [7]

Известно, что в установках типа «триплет» возможна прокатка с подпором, за счёт чего можно достичь значительного снижения концевой обреза раската.

Несмотря на то, что конструкции стана типа «триплет» далеко не новы, объём доступной информации о схемах и режимах редуцирования слябов в этих установках весьма ограничен [9]. В связи с этим установление рационального способа и параметров редуцирования непрерывнолитых слябов в установках такого типа представляет как научный, так и практический интерес.

Постановка задачи. Задачей данной работы является исследование процесса редуцирования сляба по ширине в установке типа «триплет» с целью определения рациональных параметров прокатки, обеспечивающих высокую гибкость технологического процесса и минимизацию искажения формы раската в плане.

Изложение материала и его результаты. В качестве базовой выбрана следующая схема компоновки клетей: горизонтальная клеть – вертикальная клеть – горизонтальная клеть (рис. 2).

В качестве метода исследования использовали компьютерное конечно-элементное моделирование в системе Deform 3D. При этом полагали, что деформирование левой и правой частей сляба проходит в одинаковых условиях, и моделирование выполнено для 1/2 части сляба с плоскостью симметрии посередине его ширины (рис. 2). Это обеспечило, с одной стороны, уменьшение размерности задачи. С другой стороны, это позволило в достаточной степени измельчить размер элементов сетки вблизи рёбер и углов сляба, где имеет место максимальное формоизменение металла (большие значения градиентов деформаций, напряжений и температур).

При этом на первом этапе необходимо было выполнить проверку адекватности используемой математической модели. С этой целью на лабораторном стане 100 ГОУ ВПО «ДонГТУ» (рис. 3) была вы-

полнена прокатка образцов, подвергаемых редуцированию по ширине (боковому обжатию).

Условия проведения физического эксперимента приведены в таблице 1.

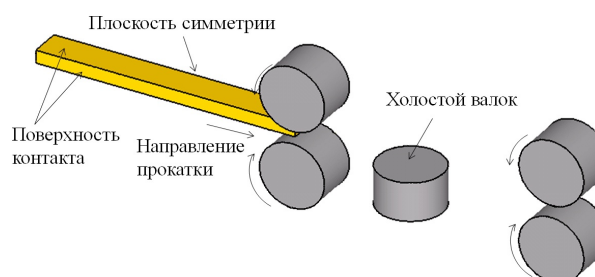


Рисунок 2 Принятая схема редуцирования сляба в установке типа «триплет»



Рисунок 3 Стан 100 прокатной лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением»

Таблица 1

Условия прокатки сляба на лабораторном стане 100

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Толщина сляба	H	10 мм
Ширина сляба	B	62 мм
Длина сляба	L	89 мм
Материал сляба		Свинец
Боковое обжатие	Δb	16 %
Диаметр валков	D_b	62 мм
Скорость прокатки	V_b	23 мм/с

Для обеспечения устойчивости раската при прокатке на гладкой бочке использовались удерживающие линейки. В силу технических особенностей стана прокатка сляба производилась «на ребро». Для повышения захватывающей способности применялись валки с грубой насечкой.

При аналогичных условиях было выполнено конечно-элементное моделирование процесса редуцирования сляба в гладких цилиндрических валках. Тип материала заготовки выбран пластический. Тип объекта валков — жёсткий недеформируемый. Для моделирования были выбраны изотермические условия. В качестве модели контактного трения использовали модель Э. Зибеля. Для условий сухого трения при горячей прокатке показатель сил трения был равен 0,7.

Полученные результаты моделирования сравнили с экспериментальными данными. Расчётные значения высоты наплывов после прокатки несколько ниже экспериментальных, при этом максимальные отклонения расчётных данных от экспериментальных не превысили 5 %.

Проверку адекватности полученных результатов конечно-элементного моделирования выполняли также путём сравнения расчётных и экспериментальных значений вогнутости переднего и заднего торцов раската, а также их толщин по плоскости симметрии сляба после редуцирования. Максимальные отклонения расчётных данных от экспериментальных не превысили 8 %.

Таким образом, проверка адекватности полученных при моделировании параметров формоизменения сляба относительно данных физического эксперимента позволила сделать вывод о возможности применения данного подхода для изучения закономерностей процесса редуцирования слябов по ширине и оценке эффективности новых технических решений.

Поэтому на следующем этапе работы было выполнено конечно-элементное моделирование двух схем редуцирования слябов $6000 \times 300 \times 1450$ мм из стали 09Г2С в валках диаметром 1500 мм. Скорость

вращения приводных валков составляла 13 об/мин. Расстояние между осями валков смежных клетей приняли равным 3000 мм.

Исходная температура сляба была равна 1150°C . При моделировании учитывали теплообмен сляба с окружающей средой и валками, а также разогрев металла вследствие теплового эффекта деформации. Реологические кривые с учётом химического состава стали 09Г2С и её разупрочнения за счёт динамической рекристаллизации в диапазоне температур $1000\text{--}1260^\circ\text{C}$ были построены по методике работы [10].

Исследуемыми параметрами приняты следующие величины (рис. 4): f_n — вогнутость переднего торца раската; f_z — вогнутость заднего торца раската; δ_n — утяжка ширины переднего конца раската; l_n — длина переднего утянутого конца раската; δ_z — утяжка ширины заднего конца раската; l_z — длина заднего утянутого конца раската; P_v, M_v — соответственно сила и момент редуцирования в вертикальных валках; P_r, M_r — соответственно сила и момент проглаживания прикромочных наплывов в горизонтальных валках.

Для случая прокатки по классической схеме (в вертикальных, а потом в горизонтальных валках) было назначено боковое обжатие $\Delta b = 80$ мм и проглаживание с обжатием тела сляба $\Delta h = 15$ мм.

Для случая прокатки по схеме «триплет» в первой паре горизонтальных валков назначено обжатие сляба $\Delta h_1 = 10$ мм, затем боковое обжатие в холостых валках $\Delta b = 80$ мм (рис. 5, а), а во второй паре горизонтальных валков назначено проглаживание сляба с обжатием относительно исходной высоты сляба $\Delta h_2 = 5$ мм (рис. 5, б).

Отличительной особенностью принятой в рамках данной работы схемы и режима прокатки в установке типа «триплет» является то, что все валки имеют гладкую бочку (рис. 2, 5), а валки вертикальной редуцирующей клетки — неприводные.

Такая компоновка, очевидно, позволит сократить капитальные затраты и упростить систему управления станом.

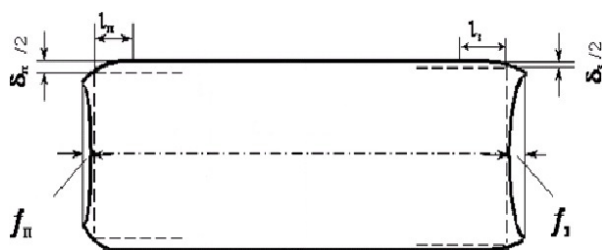


Рисунок 4 Исследованные при моделировании параметры формы раската в плане

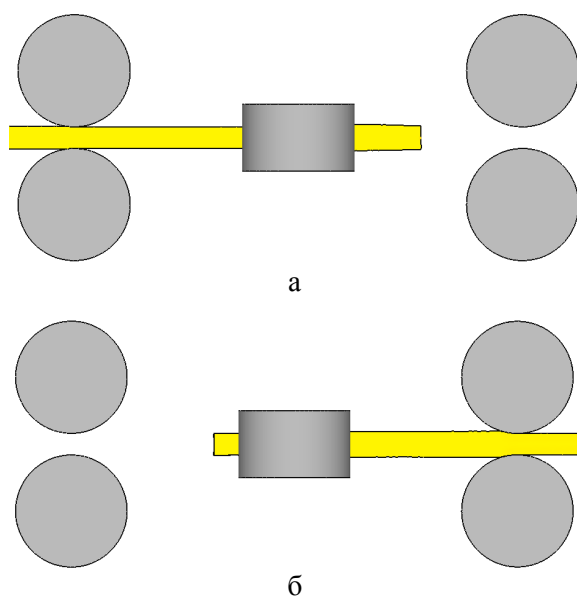


Рисунок 5 Результаты моделирования прокатки сляба по схеме «триплет»: а — начальная стадия редуцирования сляба по ширине; б — заключительная стадия редуцирования сляба по ширине, совмещённая со стадией проглаживания прикромочных наплывов

Положительным моментом использования редуцирующих валков с гладкой бочкой является, во-первых, их универсальность в части возможности использования одного комплекта валков для различных толщин исходного сляба, а также нечувствительность технологического процесса к колебаниям ширины и толщины исходных слябов.

Во-вторых, при прочих равных условиях, валки с гладкой бочкой обеспечивают большее значение катающего диаметра вала, что при редуцировании будет способствовать проникновению деформации в цен-

тральные слои сляба. При этом низкая захватывающая способность гладких валков в данной ситуации не сыграет существенной роли, так как начальная стадия редуцирования будет осуществляться за счёт проталкивания сляба горизонтальными валками предыдущей клетки (рис. 5, а). На заключительной стадии реализуется процесс протягивания сляба через вертикальные валки редуцирующей клетки за счёт его обжатия горизонтальными приводными валками следующей по ходу прокатки клетки (рис. 5, б).

И на начальной, и на заключительной стадиях устойчивость сляба при редуцировании будет обеспечиваться за счёт постоянного контакта раската с горизонтальными валками предыдущей и (или) последующей клетки. Исключение пробуксовок валков горизонтальных клеток обеспечивается правильным назначением величин Δh_1 и Δh_2 , которые непосредственно зависят от величины бокового обжатия сляба (Δb).

Полученные на основе результатов моделирования параметры формоизменения металла и силовые параметры процессов прокатки слябов по двум указанным выше схемам представлены в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2
Сравнительная характеристика способов прокатки

Параметр	Классическая схема	Схема «триплет»
$f_{п,}$ мм	88	66
$f_3,$ мм	66	78
$\delta_{п,}$ мм	90	88
$l_{п,}$ мм	339	299
$\delta_3,$ мм	19	38
$l_3,$ мм	346	371
$P_{в,}$ МН	10,3	10,7
$M_{в,}$ МН*М	1,59	-
$P_{г,}$ МН	11,6	$P_{г1} = 8,1$ $P_{г2} = 9,7$
$M_{г,}$ МН*М	1,22	$M_{г1} = 1,26$ $M_{г2} = 1,6$

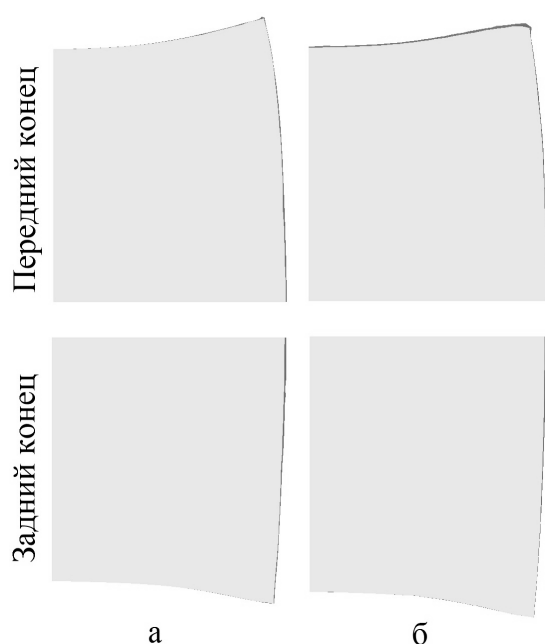


Рисунок 6 Форма концов раската в плане после редуцирования и проглаживания: а — по классической схеме; б — по схеме «триплет» (с неприводными вертикальными валками)

Анализ результатов показал следующее. Форма переднего конца раската больше искажается при прокатке по классической схеме, а при прокатке по схеме «триплет» больше искажается форма заднего конца. Такое течение металла обуславливается направлением сил трения на контакте с вертикальными валками, выполняющими обжатие сляба по ширине.

При прокатке по классической схеме активные силы контактного трения способствуют продольному течению металла в направлении прокатки, вызывая тем самым увеличение вогнутости переднего конца раската и, соответственно, уменьшение вогнутости заднего (рис. 6, а).

При прокатке по схеме «триплет» указанные выше силы трения на контактных поверхностях вертикальных валков направлены против хода прокатки. Следствием этого является уменьшение вогнуто-

сти переднего торца раската и увеличение вогнутости заднего (рис. 6, б).

Вместе с тем, как видно из таблицы 2, суммарная длина искажённых частей переднего и заднего концов раската при прокатке по схеме «триплет» получена меньше на 3 % (25 мм).

Выводы и направление дальнейших исследований. На основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен сравнительный анализ процессов редуцирования и проглаживания сляба по классической схеме (в вертикальных, а потом в горизонтальных валках) и по схеме «триплет» (горизонтальная клеть – вертикальная клеть – горизонтальная клеть). Особенностью компоновки «триплета» являлось то, что все валки имеют гладкую бочку, что обеспечивает высокую гибкость технологического процесса, а валки вертикальной редуцирующей клетки — неприводные.

Основываясь на результатах исследований, можно рекомендовать вариант компоновки установки «триплет» с вертикальной клетью с приводными валками. Он, очевидно, более затратный, однако позволяющий добиться максимального улучшения формы раската в плане и, соответственно, снижения концевой обрезки.

Рациональным режимом прокатки, который предлагается в качестве базового, является следующий. Первую по ходу прокатки половину сляба прокатывают в холостых вертикальных валках. Вторую половину сляба, когда задний конец сляба вышел из горизонтальных валков, прокатывают при включённом приводе вертикальных валков. При этом вторая пара горизонтальных валков выполняет только проглаживающее обжатие.

Прогнозируемое по предлагаемой технологии снижение суммарной длины искажённых частей переднего и заднего концов раската, в сравнении с классической схемой, составляет ~30 %.

Библиографический список

1. А. с. № 1565550 СССР, МКИ В 21 В 1/02. Способ прокатки слитков и слябов [Текст] / В. И. Пономарев [и др.]. — № 4148226/31-02 ; заявл. 25.11.86 ; опубл. 23.05.90, Бюл. № 19. — 7 с.
2. А. с. № 1799648 СССР, МКИ В 21 В 1/26. Способ редуцирования слябов по ширине [Текст] / В. В. Оробцев [и др.]. — № 4871969/27 ; заявл. 05.10.90 ; опубл. 07.03.93, Бюл. № 9. — 4 с.
3. Forouzan, M. R. A comparative study of slab deformation under heavy width reduction by sizing press and vertical rolling using FE analysis [Text] / M. R. Forouzan , I. Salehi , A. A. Hossein // *Materials Processing Technology*. — 2009. — № 209. — P. 728–736.
4. Analysis and prediction of fishtail during V-H hot rolling process [Text] / X. Li [et al.] // *Journal of Central South University*. — 2015. — № 22. — P. 1184–1190.
5. Коновалов, Ю. В. Редуцирование непрерывнолитых слябов в технологической линии широкополосных станов горячей прокатки [Текст] / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, М. О. Фролова // *Сталь*, 2014. — № 6. — С. 47–53.
6. Strandel, P. O. Critical consideration on rolling in triplet mill [Text] / P. O. Strandel // *Proceedings. Science and Technology of Flat Rolled Products : International Conference on Steel Rolling*. — Tokyo : Iron and Steel Institute of Japan, 1980. — № 1. — P. 599–610.
7. Roberts, William L. Hot Rolling of Steel : Manufacturing engineering and materials processing [Text] / William L. Roberts. — New York : Marcel Dekker, Inc., 1983. — 1040 p.
8. Коновалов, Ю. В. О применении вертикально расположенных валков в технологической линии широкополосных станов и литейно-прокатных агрегатов. Сообщение 1. Пути решения задачи прокатки полос по ширине с градацией через 50 и 100 мм на широкополосных станах горячей прокатки при переводе их на непрерывнолитую заготовку [Текст] / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, М. О. Фролова // *Чёрная металлургия. Бюл. НТИ*. — 2014. — № 7. — С. 44–53.
9. Коновалов, Ю. В. О применении вертикально расположенных валков в технологической линии широкополосных станов и литейно-прокатных агрегатов. Сообщение 2. Разработка схем и режимов редуцирования непрерывнолитых слябов по ширине в реверсивных комплексах «вертикальные-горизонтальные валки» широкополосных станов [Текст] / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, М. О. Фролова // *Чёрная металлургия. Бюл. НТИ*. — 2014. — № 8. — С. 50–62.
10. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей [Текст] / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Металл и литьё Украины*. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.

© Снитко С. А.
 © Руденко Е. А.
 © Пилипенко В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., проф., и.о. зав. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.

Статья поступила в редакцию 08.10.19.

д.т.н. Снітко С. О., д.т.н. Руденко Є. О., Пилипенко В. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР, snitko_sa@mail.ru)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ СЛЯБА ПО ШИРИНІ В УСТАНОВЦІ ТИПУ «ТРИПЛЕТ»

На основі результатів кінцево-елементного моделювання виконано аналіз процесів редукування сляба по ширині за класичною схемою і в установці типу «триплет». Показано доцільність компоновання «горизонтальна кліть – вертикальна кліть – горизонтальна кліть» з валками з гладкою бочкою. Запропоновано режим редукування сляба, що забезпечує зниження сумарної довжини викривлених кінців розкату на ~30 %.

Ключові слова: форма розкату в плані, редукування сляба по ширині, фізичний експеримент, кінцево-елементне моделювання, кінцева обрізь, установка «триплет», неприводні валки.

**Doctor of Technical Science Snitko S. A., Doctor of Technical Science Rudenko E. A.,
Pilipenko V. V. (DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru)**

**STUDYING THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF THE SLAB WIDTH REDUCTION
PROCESS IN THE “TRIPLET” TYPE UNIT**

Basing on the finite-element modeling results there has been carried out the analysis of slab width reduction processes according to the classical scheme and in the “triplet” type unit. There has been shown the practicability of assembly “the horizontal roll stand – the edging stand – the horizontal smooth roll stand”. A slab reduction mode is proposed that reduces the total length of distorted ends of the roll by ~30 %.

Key words: *shape of the roll in plan, slab width reduction, physical experiment, finite-element modeling, crop ends, unit “triplet”, idlers.*