

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

---

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ  
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА  
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 4 (2023)

---

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**  
выходит 1 раз в квартал

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ KZ51VPY00036165

выдано

Министерством информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем  
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,  
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

**Подписной индекс – 76129**

<https://doi.org/10.48081/PWGH3542>

**Импакт-фактор РИНЦ – 0,210**

**Импакт-фактор КазБЦ – 0,406**

---

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);  
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);  
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);  
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

**Члены редакционной коллегии:**

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);  
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);  
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);  
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);  
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

**Зарубежные члены редакционной коллегии:**

Vaigang Sun – профессор (Пекин, Китай);  
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);  
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);  
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);  
Magin Lapuerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);  
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);  
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);  
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);  
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);  
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);  
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);  
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);  
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);  
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

**\*К. А. Ногаев<sup>1</sup>, Ж. А. Ашкеев<sup>2</sup>, М. Ж. Абишкенов<sup>3</sup>,  
А. Сладковский<sup>4</sup>, А. У. Камаров<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Карагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау;

<sup>4</sup>Силезский технический университет, Республика Польша, г. Катовице;

<sup>5</sup>Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

\*e-mail: [k.nogayev@ttu.edu.kz](mailto:k.nogayev@ttu.edu.kz)

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ, РЕАЛИЗУЮЩЕМ ПОПЕРЕЧНЫЙ СДВИГ**

*Одним из важных элементов сортопрокатного оборудования, обеспечивающего формирование требуемых геометрии и свойств металлопродукции, являются калибрующие валки. Вместе с тем, при прокатке в традиционных калибрах в готовом прокате наблюдаются остатки литой структуры и неоднородности механических свойств металла по сечению. Указанные недостатки можно устранить путем реализации интенсивной пластической деформации (ИПД) в объеме металла. Однако, низкая технологичность большинства технологий ИПД сдерживает их использования в промышленности. Поэтому, разработка и исследование нового способа реализации ИПД в условиях непрерывности технологического процесса, в частности при прокатке в непрерывных станах, является актуальной научно-технической проблемой.*

*В настоящей работе рассматривается новая схема калибровок прокатных валков, обеспечивающая реализацию интенсивных сдвиговых деформаций. Проведен анализ существующих схем прокатки в калибрах и предложена эффективная система калибров для реализации поперечного сдвига. Эффективность новой схемы прокатки оценена на основе анализа напряженно-деформированного состояния по результатам моделирования процесса методом конечных элементов (МКЭ). Установлено, что прокатка полосы в калибрах, реализующих сдвиговые деформации, обеспечивает немонотонный характер пластического течения и более благоприятные показатели напряженно-деформированного состояния металла по сравнению с прокаткой в традиционных калибрах.*

*Ключевые слова: прокатка, калибр, пластическое течение, сдвиговая деформация, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.*

### **Введение**

Прокатка в калибрах, которая является одним из основных технологий получения длинномерных металлических изделий, обеспечивает большую гибкость в отношении проектирования технологического процесса. Например,

для получения одного и того же профиля, одних и тех же размеров, на одном и том же прокатном стане, можно использовать разные схемы калибровки [1, 2]. Вместе с тем традиционная прокатка в калибрах сопровождается меньшей степенью деформации металла, вследствие чего в готовом прокате наблюдаются остатки литой структуры [3]. Эффективную проработку структуры материала при меньших степенях деформации можно осуществить за счет реализации интенсивной пластической деформации (ИПД) в объеме металла. Принято считать, что ИПД отличается от обычных схем деформации более высоким уровнем давления и активной сдвиговой деформацией. В результате создаются такие условия деформации металла, при которых активный массоперенос осуществляется не только вдоль оси, но и в поперечном направлении, что позволяет изменить преимущественную кристаллографическую ориентировку или вообще сформировать малотекстурированный материал [4].

В настоящее время существуют разнообразные способы реализации ИПД, которые отличаются от обычных схем деформации более высоким уровнем давления и активной сдвиговой деформацией [5, 6, 7]. Однако, внедрение многих методов ИПД в действующие технологические процессы производства металлоизделий во многом сдерживается их низкой технологичностью и рядом технических проблем, связанных с невозможностью их реализации на действующем промышленном оборудовании [8]. В связи с этим разработка и исследование нового способа реализации ИПД в условиях непрерывности технологического процесса, в частности при прокатке в непрерывных станах, является актуальной проблемой.

Ранее проводились исследования способа продольной прокатки с поперечным сдвигом, где дополнительные сдвиговые деформации обеспечивались за счет использования системы калибров «ромб-квадрат» с недиагональным расположением ромбического калибра. Результаты проведенных исследований показали возможность реализации ИПД за счет одновременного высотного обжатия и поперечного сдвига в очаге деформации, что приводит к улучшению пластических и прочностных характеристик металлов [9]. Анализ микроструктуры после прокатки в данной системе калибров показал, что средний размер зерна по сравнению с исходными образцами уменьшился более чем в три раза, до 9 мкм, а в поперечном сечении стали преобладают большеугольные границы зерен. Увеличение предела текучести и предела прочности при растяжении по сравнению с исходным образцом до прокатки составляет 134,47 % и 69,41 % соответственно [10].

Вместе с тем, полный цикл знакопеременной сдвиговой деформации в системе калибров «ромб-квадрат» с недиагональным расположением ромбического калибра, осуществляется за 4 прохода с кантовкой (рисунок 1), что представляет некоторые технологические сложности для реализации его в действующем оборудовании, в частности в непрерывном стане сортовой прокатки АО «АрселорМиттал Темиртау». Поэтому, стоит задача проведения дальнейших исследований для повышения технологичности способа реализации интенсивных сдвиговых деформаций с разработкой новой эффективной системы калибров.

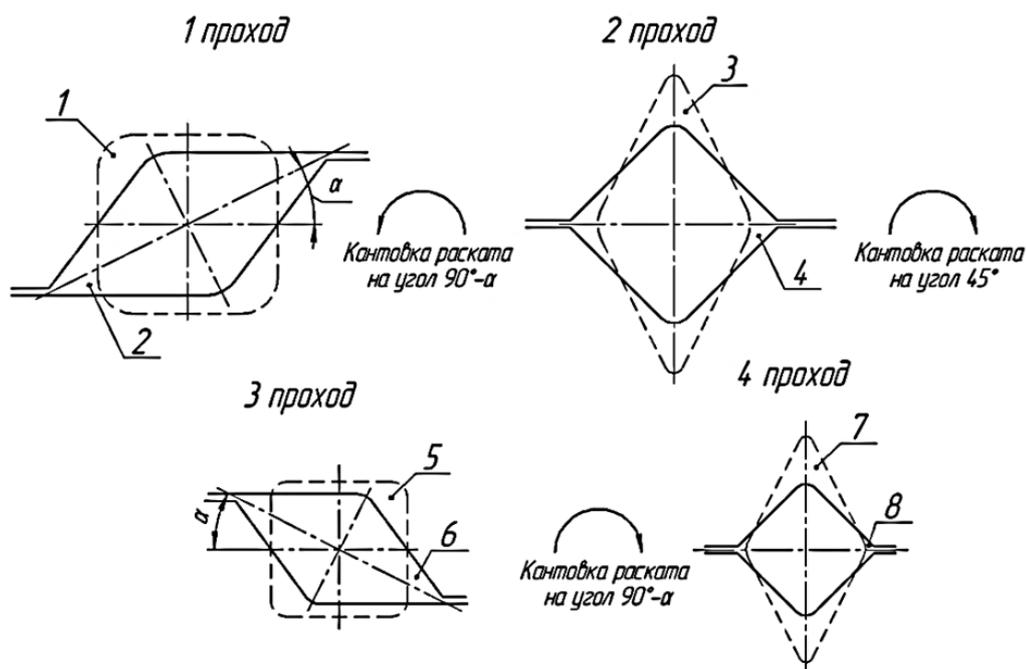


Рисунок 1 – Последовательность прокатки в системе калибров «ромб-квадрат» с недиагональным расположением ромбического калибра

В сортовой прокатке широко применяется система калибров «овал-круг» (рисунок 2), одним из главных преимуществ которой является отсутствие необходимости кантовки полосы в станах с чередующимися горизонтальными и вертикальными клетями. Однако, при прокатке в данной системе калибров возникают неоднородности деформации в радиальном и окружном направлениях заготовки, приводящие к неоднородностям механических свойств металла по сечению [11].

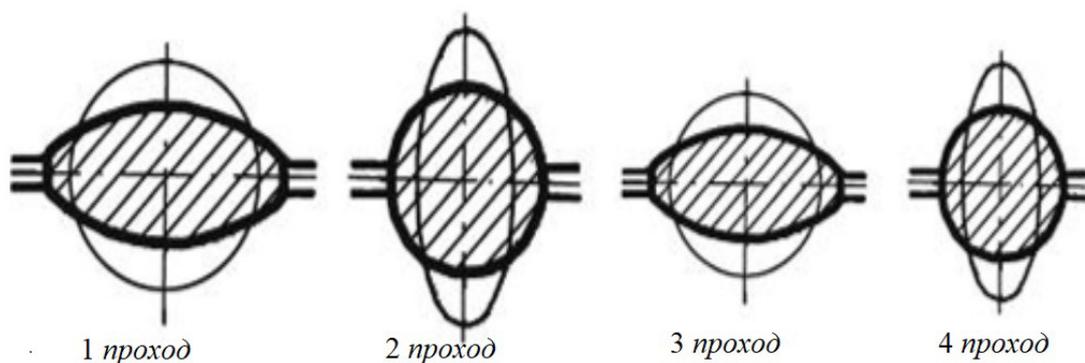


Рисунок 2 – Система калибров «овал-круг»

Улучшения свойств металла при прокатке в системе калибров «овал-круг» можно добиться за счет реализации интенсивных сдвиговых деформаций, используя вышеописанную идею недиагонального расположения ромбического

калибра (см. рисунок 1). Для этого главные оси овала в калибрах расположим наклонно относительно оси валков (рисунок 3). В нашем случае угол наклона главной оси овала в калибре относительно оси валков принимаем равной  $\gamma=35^\circ$ , что согласно ранее проведенным исследованиям является близкой к оптимальной [9]. При этом поперечный сдвиг в очаге деформации осуществляемый одновременно с высотным обжатием приведет интенсивной проработке структуры металла, способствующей улучшению механических и служебных свойств металлоизделий.

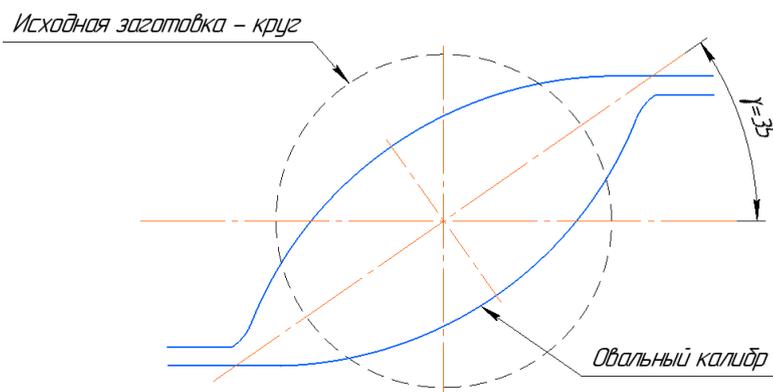


Рисунок 3 – Калибр с наклонным расположением овала

Целью настоящей работы является оценка эффективности процесса прокатки полосы в калибрах, реализующих сдвиговые деформации, по сравнению с традиционными системами калибров.

#### **Материалы и методы**

Эффективность данного способа прокатки в калибрах можно оценить показателями напряженно-деформированного состояния (НДС) металла, для определения которых в настоящее время используется метод конечных элементов (МКЭ) [12, 13]. В данной работе моделирование НДС осуществлено в программном пакете DEFORM 3D, который является одним из наиболее универсальных и эффективных инструментов моделирования и изучения процессов обработки металлов давлением при помощи МКЭ.

Моделировались задачи горячей прокатки полосы в традиционном овальном калибре и в калибре с наклонным расположением овала. Для приближения результатов моделирования к реальным производственным условиям форму и размеры калибров и полосы в геометрической модели и кинематические параметры инструментов приняли в соответствии с данными непрерывного сортового стана АО «АрселорМиттал Темиртау», где полоса круглой формы после 4-й клетки прокатывается в традиционном овальном калибре 5-й клетки (рисунок 4).

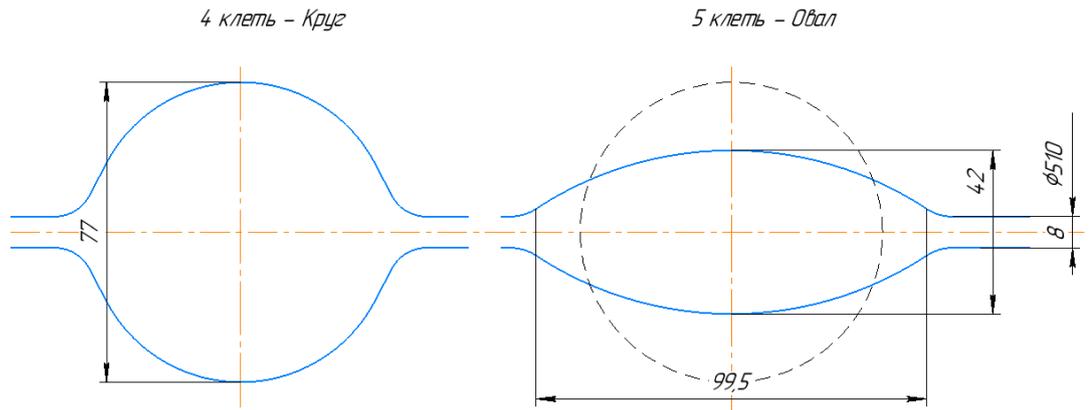
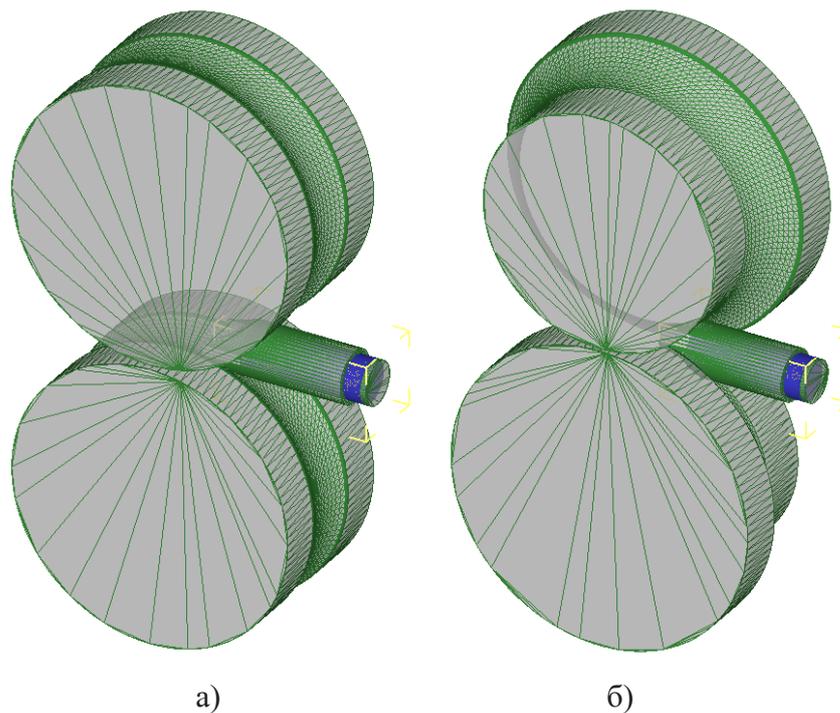


Рисунок 4 – Формы и размеров калибров 4-й и 5-й клеток непрерывного сортового стана АО «АрселорМиттал Темиртау»

Геометрические модели деформирующих инструментов, валковой проводки и заготовки (рисунок 5), необходимые для моделирования процесса прокатки, созданы с помощью системы САПР КОМПАС 3D и переданы в программный пакет DEFORM 3D в формате STL, используемый для обмена графической информацией.



а)

б)

а – традиционный овальный калибр;

б – калибр с наклонным расположением овала

Рисунок 5 – Геометрические модели процесса прокатки

При постановке задач моделирования были приняты следующие допущения и упрощения:

- рабочий инструмент рассматривается как абсолютно жесткое тело с постоянной температурой;
- прокатываемый материал считается однородным, изотропным;
- деформируемая среда – вязкопластическая.

В качестве материала прокатываемой полосы была принята сталь AISI-1045 [1650–2200 F (900–1200 °C)] из стандартной библиотеки DEFORM-3D, реологическая модель которой предназначена для моделирования процессов горячего деформирования в температурном диапазоне 900–1200°C. Для наших задач температуру процесса установили равной 1000°C, которая соответствует температуре заготовки при горячей прокатке в промежуточных станах непрерывного сортового стана. Для обеспечения точности расчета была сгенерирована КЭ-сетка с 86168 элементами деформируемой заготовки. Условие трения между инструментами и полосой описывали по закону Зибеля с постоянным коэффициентом трения равным 0,5. В качестве кинематических параметров моделирования задано вращение деформирующих инструментов со скоростью 1,0472 рад/с, что соответствует скорости вращения прокатных валков 5-й клетки непрерывного сортового стана АО «АрселорМиттал Темиртау». Для обеспечения первоначального захвата металла валками использовали толкатель, предварительно подталкивающий заготовку к валкам. Количество шагов расчета установлено равным 1000 при длительности шага по времени 0,05 с/шаг, что обеспечивает полное прохождение модели полосы через калибр.

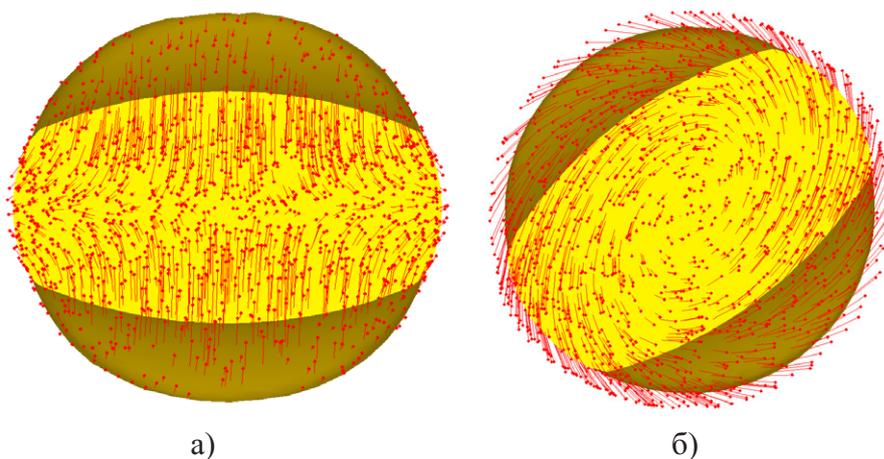
#### **Результаты и обсуждения**

Для анализа использованы следующие результаты моделирования:

- векторные отображения величин смещения элементов, указывающие направление пластического течения металла в очаге деформации (рисунок 6);
- картина распределения и значения интенсивности напряжений в очаге деформации (рисунок 7);
- картина распределения и значения накопленной степени деформации сдвига (деформации по Мизесу, рисунок 8).

Векторные отображения величин смещения элементов, полученные в ходе моделирования, показывает, что при прокатке в традиционных овальных калибрах пластическое течение металла в очаге деформации формируется за счет обжатия и направлены в основном навстречу друг другу с вытеснением в боковые стороны (рисунок 6, а). Совершенно другая картинка пластического течения металла наблюдается в очаге деформации калибра с наклонным расположением овала. В этом случае полоса подвергается сдвигу в поперечном направлении благодаря кососимметричному воздействию со стороны верхнего и нижнего валков и высотному обжатию. В результате в очаге деформации в поперечном направлении возникают вихревые пластические потоки, обуславливающие немонотонный характер течения металла при его обработке (рисунок 6, б). Авторы работы [14] утверждают, что немонотонное течение металла характеризует реализацию

интенсивных пластических деформаций и обеспечивает формирование угловых разориентировок границ и получение ультрамелких зерен с равноосной формой.



а)

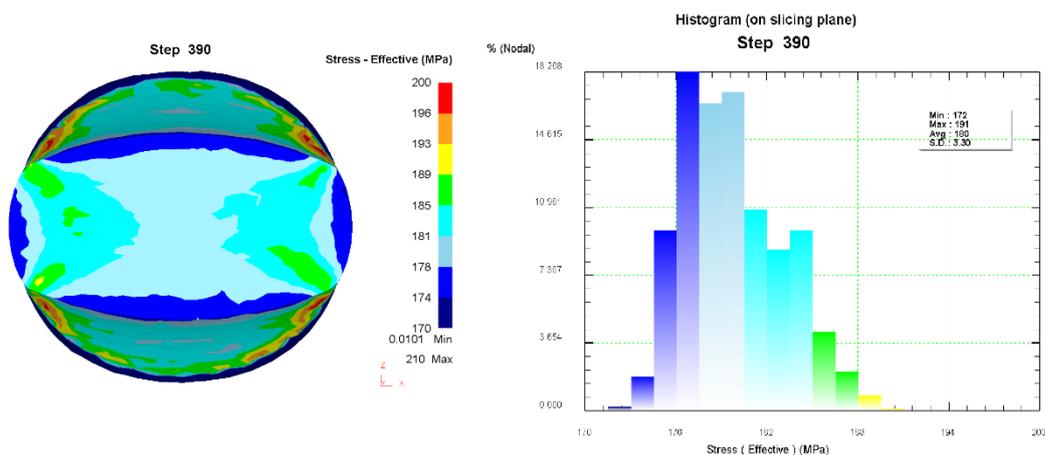
б)

а – традиционный овальный калибр;

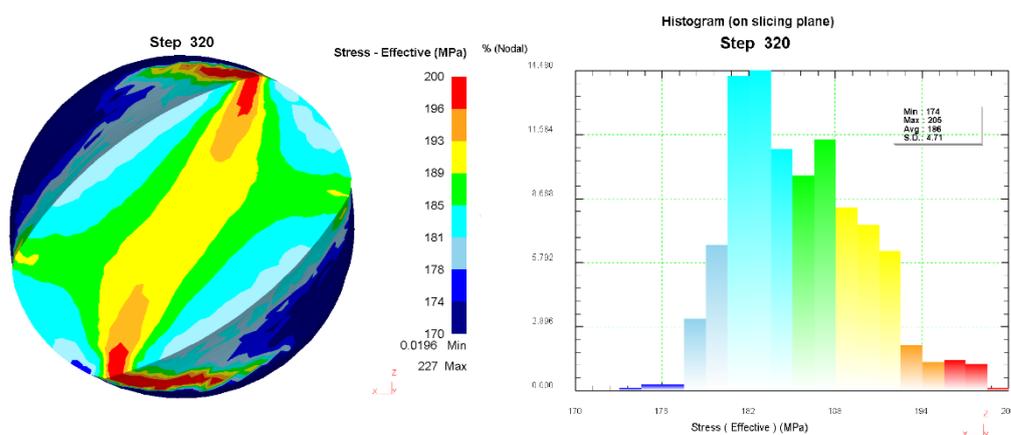
б – калибр с наклонным расположением овала

Рисунок 6 – Пластическое течение металла в очаге деформаций

При прокатке в традиционном овальном калибре характер распределения интенсивности напряжений в очаге деформации симметричен и имеет вид «ковочного креста», а осевая зона полосы имеет более низкие показатели интенсивности напряжений по сравнению с остальными участками (рисунок 7, а). В очаге деформации калибра с наклонным расположением овала более высокие уровни показателей интенсивности напряжений сосредоточены в осевой зоне (рисунок 7, б). Поскольку основные дефекты литья – осевая рыхлость, газовые пузыри и дендритная ликвация, располагаются в осевой зоне, то высокие уровни этих показателей обуславливают их интенсивное «залечивание». Также в калибре с наклонным расположением овала доля высоких значений интенсивности напряжений в очаге деформации выше, чем в традиционном овале. Как видно из таблицы 1, составленной по данным гистограммы количественных соотношений интенсивности напряжений, в калибре с наклонным расположением овала доля показателей интенсивности напряжений выше 180 МПа составляет 89,5 %, тогда как для традиционного калибра этот показатель почти в 2,5 раза ниже (36,4 %). В целом такие показатели интенсивности напряжений в калибре с наклонным расположением овала обеспечивают интенсивную проработку металла в очаге деформации.



а)



б)

а – традиционный овальный калибр;

б – калибр с наклонным расположением овала

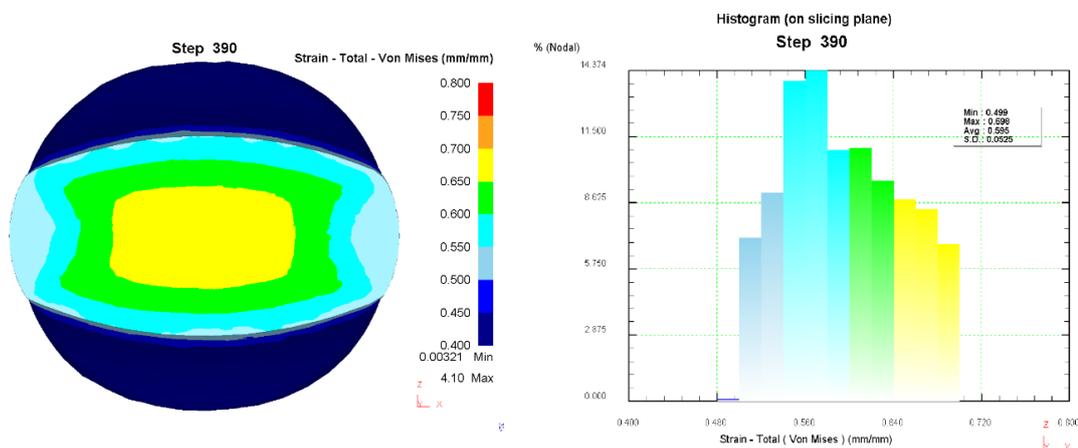
Рисунок 7 – Распределение интенсивности напряжений в очаге деформации

Таблица 1 – Количественные соотношения интенсивности напряжений

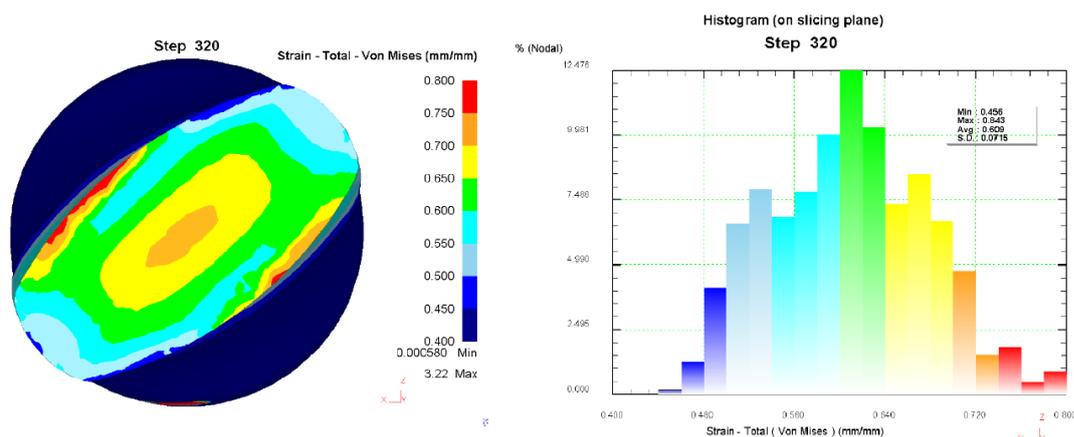
Границы диапазонов интенсивности напряжений, МПа		Количественные соотношения, %	
Нижняя граница	Верхняя граница	Традиционный овальный калибр	Калибр с наклонным расположением овала
170	171,5	0	0
171,5	173	0,17	0
173	174,5	1,82	0,09
174,5	176	9,7	0,26
176	177,5	18,27	0,26
177,5	179	16,54	3,27
179	180,5	17,14	6,62
180,5	182	10,82	14,36
182	183,5	8,66	14,62
183,5	185	9,7	11,01

185	186,5	4,24	9,8
186,5	188	2,08	11,44
188	189,5	0,78	8,34
189,5	191	0,09	7,57
191	192,5	0	6,36
192,5	194	0	2,06
194	195,5	0	1,29
195,5	197	0	1,38
197	198,5	0	1,2
198,5	200	0	0,09

Анализ деформированного состояния показывает, что прокатка в калибре с наклонным расположением овала характеризуется более высокими показателями накопленной степени деформации сдвига в осевой зоне полосы чем при прокатке в калибре с традиционным овалом (рисунок 8). Наиболее интенсивные деформации при прокатке в калибре с наклонным расположением овала локализованы в участках, прилегающих к контактной поверхности с валками, со смещением в сторону пластического течения металла (см. рисунок 6). Сопоставление количественных соотношений накопленной степени деформации сдвига в таблице 2 показывает, что доля высоких показателей накопленной степени деформации сдвига в полосе после прокатки в калибре с наклонным расположением овала выше, чем после прокатке в калибре с традиционным овалом. Например, показатели накопленной степени деформации сдвига более 0,7 после прокатки в калибре с наклонным расположением овала составляет 32,1 %, что 1,43 раза выше, чем при прокатке в калибре с традиционным овалом (22,43 %). В целом можно констатировать, что прокатка в калибре с наклонным расположением овала вызывает более высокий уровень реализации интенсивной сдвиговой деформации по сравнению с прокаткой в калибре с традиционным овалом.



a)



б)

а – традиционный овальный калибр;

б – калибр с наклонным расположением овала

Рисунок 8 – Распределение накопленной степени деформации сдвига

Таблица 2 – Количественные соотношения накопленной степени деформации сдвига

Границы диапазонов накопленной степени деформации сдвига, МПа		Количественные соотношения, %	
Нижняя граница	Верхняя граница	Традиционный овальный калибр	Калибр с наклонным расположением овала
0,4	0,425	0	0
0,425	0,45	0	0
0,45	0,475	0	0,19
0,475	0,5	0	1,25
0,5	0,525	0	4,12
0,525	0,55	5,6	6,62
0,55	0,575	7,12	7,96
0,575	0,6	11,92	6,9
0,6	0,625	19,48	7,86
0,625	0,65	13,7	10,07
0,65	0,675	10,05	12,56
0,675	0,7	9,7	10,35
0,7	0,725	8,1	7,38
0,725	0,75	6,94	8,53
0,75	0,775	6,32	6,71
0,775	0,8	1,07	4,79
0,8	0,825	0	1,53
0,825	0,85	0	1,82
0,85	0,875	0	0,48
0,875	0,9	0	0,86

**Выводы**

1. На основании ранее исследованной идеи недиагонального расположения ромбического калибра предложена новая схема прокатки в овальных калибрах, обеспечивающая реализацию интенсивных сдвиговых деформаций.

2. Установлено, что при прокатке в овальном калибре по новой схеме немонотонность характера течения металла из-за возникновения вихревых пластических потоков обуславливает реализацию интенсивных пластических деформации.

3. По результатам моделирования напряженно-деформированного состояния установлено, что высокие показатели интенсивности напряжений в калибре с наклонным расположением овала вызывает более высокий уровень реализации интенсивной сдвиговой деформации по сравнению с прокаткой в калибре с традиционным овалом и обеспечивают интенсивную проработку металла в очаге деформации.

**Благодарность**

Данная работа выполнена в рамках проекта № AP19674502 «Разработка и исследование технологичного способа реализации интенсивных сдвиговых деформаций при прокатке в калиброванных валках», финансируемого грантом Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 **Li, X., Wang, S., Lohmar, J., & Hirt, G.** Design of caliber rolls incorporating load path dependent damage evolution. // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – 47. – P. 643–648. – <https://doi.org/10.1016/j.promfg>.

2 **Mikhailenko A. M.; Shvarts D. L.** The concept of optimal bar roll pass design. Report 3. space of roll pass design schemes // *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. – 2019. – Volume 62. – Issue 1. – P. 15–24. – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-15-24>.

3 **Левченко, Г. В., Нефедьева, Е. Е., Серов, А. И., Смирнов, Е. Н., Галухина, И. Н.** Формирование структуры и механических свойств круглого проката из непрерывнолитой стали. // *Металл и литье Украины*. – 2011. – №6. – С. 3–7. – [Электронный ресурс]. – <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/104432/01-Levchenko.pdf?sequence=1>.

4 **Segal, V.** Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2002, – 338(1-2). – P. 331–344. – [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00066-7).

5 **Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Yanagida, A.** Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. // *CIRP Annals*. – 2008. – 57(2). – P. 716–735. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.

6 **Harsha, R. N., Mithun Kulkarni, V., & Satish Babu, B.** Severe plastic deformation - a review. // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – 5(10). – 22340–22349. – [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.600>.

7 **Segal, V.** Review: modes and processes of severe plastic deformation (SPD). // *Materials*. – 2018. – 11(7). – 1175. – [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.3390/ma11071175>.

8 **Valiev, R. Z.** Producing bulk nanostructured metals and alloys by severe plastic deformation (SPD). // *Nanostructured Metals and Alloys*. – 2011. – P. 3–39. – [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.1533/9780857091123.1.3>.

9 **Naizabekov A. B., Bykhin M. B., Nogaev K. A., Bykhin B. B.** Study of the process of realization of high-rate plastic deformation in lengthwise rolling // *METAL 2010 - 19th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. – 2010. – P. 192–202. – [Электронный ресурс]. – [http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_10/lists/papers/198.pdf](http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_10/lists/papers/198.pdf).

10 **Abishkenov, M., Ashkeyev, Zh., Nogaev, K.** Investigation of the shape rolling process implementing intense shear strains in special diamond passes. // *Materialia*. – 2022. – 26. – 101573. – [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101573>.

11 **Hwang, J.-K.** Effects of caliber rolling on microstructure and mechanical properties in twinning-induced plasticity (TWIP) steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – 711. – P. 156–164. – [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.031>.

12 **Губачева, Л. А. & Сладковский, А. В.** Анализ процесса двухугловой гибки толстолистовой заготовки. // *Восточно – европейский журнал передовых технологий*. – 2006. – №1 (19). – С. 50–52.

13 **Губачева, Л. А. & Сладковский, А.** Анализ силового режима процесса двухугловой гибки толстолистовой заготовки. // *Вісник Східноукраїнського національного університету*. – 2005. – № 11 (93). – С. 152–158.

14 **Песин, А. М., Пустовойтов, Д. О., Швеева, Т. В., Стеблянко, В. Л., Федосеев, С. А.** Моделирование немонотонности течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. – 2017. – №1. – С. 56–63. – [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63>.

## REFERENCES

1 **Li, X., Wang, S., Lohmar, J., & Hirt, G.** Design of caliber rolls incorporating load path dependent damage evolution. // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – 47. – P. 643–648. – <https://doi.org/10.1016/j.promfg>.

2 **Mikhailenko A.M.; Shvarts D. L.** The concept of optimal bar roll pass design. Report 3. space of roll pass design schemes. // *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. – 2019. – Volume 62. – Issue 1. – P. 15–24. – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-15-24>.

3 **Levchenko, G. V., Nefed'eva, E. E., Serov, A. I., Smirnov, E. N., Galuxina, I. N.** Formirovanie struktury i mexanicheskix svojstv kruglogo prokata iz nepreryvnoy stali. [Formation of structure and mechanical properties of round rolled products from continuous-cast steel] // *Metall i lit'e Ukrainy*. – 2011. – № 6. – P. 3–7. – [Electronic resource]. – <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/104432/01-Levchenko.pdf?sequence=1>.

4 **Segal, V.** Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear. // *Materials Science and Engineering : A*. – 2002. – 338(1-2). – P. 331–344. – [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00066-7).

5 **Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Yanagida, A.** Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. // *CIRP Annals*. – 2008. – 57(2). – P. 716–735. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.

6 **Harsha, R. N., Mithun Kulkarni, V., & Satish Babu, B.** Severe plastic deformation - a review. // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – 5(10). – 22340–22349. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.600>.

7 **Segal, V.** Review: modes and processes of severe plastic deformation (SPD). // *Materials*. – 2018. – 11(7). – 1175. – <https://doi.org/10.3390/ma11071175>.

8 **Valiev, R. Z.** Producing bulk nanostructured metals and alloys by severe plastic deformation (SPD) // *Nanostructured Metals and Alloys*. – 2011. – P. 3–39. – <https://doi.org/10.1533/9780857091123.1.3>.

9 **Naizabekov A. B., Bykhin M. B., Nogaev K. A., Bykhin B. B.** Study of the process of realization of high-rate plastic deformation in lengthwise rolling // *METAL 2010 - 19th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. – 2010. – P. 192–202. – [Electronic resource]. – [http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_10/lists/papers/198.pdf](http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_10/lists/papers/198.pdf).

10 **Abishkenov, M., Ashkeyev, Zh., Nogaev, K.** Investigation of the shape rolling process implementing intense shear strains in special diamond passes. // *Materialia*. – 2022. – 26. – 101573. – <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101573>.

11 **Hwang, J.-K.** Effects of caliber rolling on microstructure and mechanical properties in twinning-induced plasticity (TWIP) steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – 711. – P. 156–164. – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.031>.

12 **Gubacheva, L. A. & Sladkowski, A. V.** Analiz processa dvuxuglovoj gibki tolstolistovoj zagotovki. [Analysis of the process of double-angle bending of a thick plate] // *Vostochno – evropejskij zhurnal peredovy'x tekhnologij*. – 2006. – № 1 (19). – P. 50–52.

13 Gubacheva, L. A. & Sladkowski, A. Analiz silovogo rezhima processa dvuxuglovoj gibki tolstolistovoj zagotovki. [Analysis of the force regime of the process of double-angle bending of a thick plate] // Visnik Sxidnoukraïns`kogo nacziional`nogo universitetu. – 2005. – №11 (93). – P. 152–158.

14 Pesin, A. M., Pustovojtov, D. O., Shveeva, T. V., Steblyanko, B. L., Fedoseev, S. A. Modelirovanie nemonotonnosti techeniya metalla pri asimmetrichnoj tonkolistovoj prokatke s rassoglasovaniem skorostej valkov [Modeling of non-monotonicity of metal flow at asymmetric thin sheet rolling with mismatch of roll speeds.] // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2017. – № 1. – P. 56–63. – <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63>.

Принято к изданию 08.09.23.

\*К. А. Ногаев<sup>1</sup>, Ж. А. Аишеев<sup>2</sup>, М. Ж. Абишкенов<sup>3</sup>,  
А. Сладковский<sup>4</sup>, А. У. Камаров<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup>Қарағанды индустриялық университеті,

Қазақстан Республикасы, Темиртау қ.;

<sup>4</sup>Силезия техникалық университеті, Польша Республикасы, Катовице қ.;

<sup>5</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Басып шығаруға 08.09.23 қабылданды.

## КӨЛДЕНЕҢ ЫҒЫСУДЫ ЖҮЗЕГЕ АСЫРАТЫН ОВАЛ КАЛИБРДЕ ПРОКАТТАУ КЕЗІНДЕГІ КЕРНЕУ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ КҮЙДІ ТАЛДАУ

*Сорттық прокаттау жабдықтарының, металл бұйымдарының қажетті геометриясы мен қасиеттерін қалыптастыруды қамтамасыз ететін, маңызды элементтерінің бірі калибрленген білікшелер болып табылады. Сонымен қатар дәстүрлі калибрлерде прокаттау кезінде дайын прокатта құйма құрылымының қалдықтары және көлденең қимада металдың механикалық қасиеттерінің біртекті еместігі байқалады. Аталған кемшіліктерді металл көлемінде қарқынды пластикалық деформацияны (ҚПД) жүзеге асыру арқылы жоюға болады. Дегенмен, ҚПД технологияларының көпшілігінің төмен өндірістік қабілеттілігі оларды өнеркәсіпте қолдануға кедергі келтіреді. Сондықтан технологиялық процестің үздіксіздігі жағдайында, атап айтқанда үздіксіз стандартта прокаттау кезінде ҚПД енгізудің жаңа әдісін жасау және зерттеу өзекті ғылыми-техникалық мәселе болып табылады.*

*Бұл жұмыста қарқынды ығысу деформациясын жүзеге асыруды қамтамасыз ететін прокат біліктерін калибрлеудің жаңа схемасы қарастырылған. Калибрлерде прокаттаудың қолданыстағы схемаларына талдау жүргізілді және көлденең ығысуды жүзеге асыру үшін калибрлердің тиімді жүйесі ұсынылды. Жаңа прокаттау сұлбасының тиімділігі шекті элементтер әдісімен (ШЭӘ) процесті модельдеу нәтижелеріне негізделген кернеу-деформация күйін талдау негізінде бағаланады. Ығысу деформацияларың жүзеге асыратын калибрлерде жолақты прокаттау*

*дәстүрлі калибрлердегі прокаттаумен салыстырғанда пластикалық ағынның монотонды емес сипатын және металдың кернеулі-деформациялық күйінің қолайлы көрсеткіштерін қамтамасыз ететіні анықталды.*

*Кілтті сөздер: прокаттау, калибр, пластикалық ағын, ығысу деформациясы, кернеу-деформация күйі, шекті элементтер әдісі.*

**\*K. A. Nogaev<sup>1</sup>, Zh. A. Ashkeyev<sup>2</sup>, M. Zh. Abishkenov<sup>3</sup>,**

**A. Stadkowski<sup>4</sup>, A. U. Kamarov<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;

<sup>4</sup>Silesian University of Technology, Republic of Poland, Katowice;

<sup>5</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Accepted for publication on 08.09.23.

## **ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE DURING ROLLING IN AN OVAL GAUGE REALIZING TRANSVERSE SHEAR**

*Calibrated rolls are one of the important elements of section-rolling equipment, providing the formation of the required geometry and properties of metal products. At the same time, at rolling of traditional in calibrated rolls in finished rolled products there are remnants of cast structure and inhomogeneity of mechanical properties of metal along the cross-section. The mentioned disadvantages can be eliminated by realization of severe plastic deformation (SPD) in the volume of metal. However, low manufacturability of the majority of SPD technologies restrains their use in industry. Therefore, the development and research of a new method of SPD realization in conditions of technological process continuity, in particular during rolling in continuous mills, is an actual scientific and technical problem.*

*In this paper a new scheme of rolling rolls calibrations is considered, providing the realization of intensive shear deformation. The analysis of the existing schemes of rolling in gauges is carried out and an effective system of gauges for the realization of transverse shear is proposed. The efficiency of the new rolling scheme is evaluated on the basis of stress-strain state analysis based on the results of the process modeling by the finite element method (FEM). It is established that strip rolling in gauges realizing shear deformations provides non-monotonic character of plastic flow and more favorable indices of stress-strain state of metal in comparison with rolling in traditional gauges.*

*Keywords: rolling, gauge, plastic flow, shear deformation, stress-strain state, finite element method.*

Теруге 08.12.23 ж. жіберілді. Басуға 29.12.23 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 17,26 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4166

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz