

УДК 621.771.2

**<sup>1</sup>Яковченко А. В., <sup>1</sup>Денищенко П. Н., <sup>1,\*</sup>Кравцова С. И., <sup>2,\*\*</sup>Пилипенко В. В.**<sup>1</sup>Донбасский государственный технический университет,<sup>2</sup>Донецкий национальный технический университет

E-mail: \*kravtsovsveta@gmail.com, \*\*dvenaxa94@mail.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОКАТКИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОЛОСОБУЛЬБОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПО СТУПЕНЧАТОЙ КАЛИБРОВКЕ НА СОВРЕМЕННЫХ СТАНАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КЛЕТЕЙ

*Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричного полособульбового профиля в ступенчатом калибре. При нарушении условия равенства вытяжек по полке и стенке профиля имеют место серповидный изгиб переднего конца раската в сторону полки и нестабильность размеров профиля, а также возможно образование дефектов. Показано, что обеспечение равенства вытяжек даёт прямолинейный выход раската из очага деформации, а также получение стабильных размеров профиля, что облегчает передачу полос из калибра в калибр и способствует производству несимметричных полособульбовых профилей на современных прокатных станах с последовательным расположением клетей.*

**Ключевые слова:** прокатка несимметричного полособульбового профиля, серповидный изгиб раската, вытяжка, конечно-элементное моделирование, прокатные станы с последовательным расположением клетей.

Несимметричные полособульбовые профили, прокатываемые из низколегированных конструкционных сталей, предназначены для судостроения. Известно [1–4], что сложности прокатки указанных профилей в основном связаны с большой разницей в толщине элементов профиля (полки и стенки). В результате наблюдается неустойчивое положение раската в валках, что приводит к продольному скручиванию и серповидному изгибу его переднего конца в процессе прокатки.

Производство несимметричных полособульбовых профилей в основном осуществляется на устаревших станах линейного типа, на которых после каждого пропуска меняется направление прокатки на противоположное, что облегчает условие задачи полосы в следующий калибр. Повышение устойчивости процесса прокатки и точности размеров переходных сечений профиля является актуальной задачей, решение которой позволит расширить возможности эксплуатации современных прокатных станом с последовательным расположением клетей, в том числе и непрерывных.

Анализ известных систем калибровок (полосовой, полосоугловой, желобчатой, корытной), применяемых для прокатки несимметричных полособульбовых профилей, свидетельствует, что проблема устойчивости металла в калибрах является характерной для каждой из них. Решается она, главным образом, путем повышения жесткости промежуточных сечений, которая достигается ориентацией калибров относительно оси валков и характерной для каждой системы конфигурацией фасонных калибров. Корытная система отличается более высокими показателями работы прокатных станом. Способы прокатки и методы расчёта калибровки полособульбовых профилей наиболее полно разработаны Д. И. Старченко в работах [2, 3].

Однако и корытная система не гарантирует достаточной стабильности процесса прокатки, то есть является «чувствительной» к отклонениям, прежде всего, такого фактора, как зазоры между валками. Так, в процессе формовки на её основе элементов несимметричного полособульбового профиля неравномерная деформация металла в



В процессе моделирования использовали автоматический режим генерации конечно-элементной сетки с четырехузловыми тетраэдрами, имеющими размеры в диапазоне 0,7–2,1 мм (рис. 2). Это позволило адекватно описать геометрию полосы до, в процессе и после деформирования, а также исключить пробуксовку валков, связанную с занижением фактической площади контакта металла с валками, которое имеет место при использовании конечных элементов большего размера. Ниже показано, что дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно, поскольку приводит к существенному повышению времени моделирования, не обеспечивая уточнение получаемых результатов расчета.

Моделирование выполняется для нестационарного теплового режима раската с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой при деформации, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации.

Моделирование процесса теплообмена выполнено на основе известной зависимости:

$$q = A\alpha(t_s - t_c), \quad (1)$$

где  $q$  — тепловой поток;  
 $A$  — площадь поверхности, на которой происходит теплообмен;  
 $\alpha$  — коэффициент теплообмена;  
 $t_s, t_c$  — температура поверхности металла и окружающей среды соответственно.

Температура окружающей среды и коэффициент  $\alpha$  были приняты постоянными и равными 20 °С и 100 Вт/(м<sup>2</sup>·°С) соответственно. Коэффициент теплопередачи на контакте раската с валками равен 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Температура валков принята постоянной и равной 50 °С, температура задаваемого в калибр подката равнялась 1070 °С.

Для подката использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали конструкционную сталь 0,18С–0,27Si–0,85Mn, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных Deform-3D.

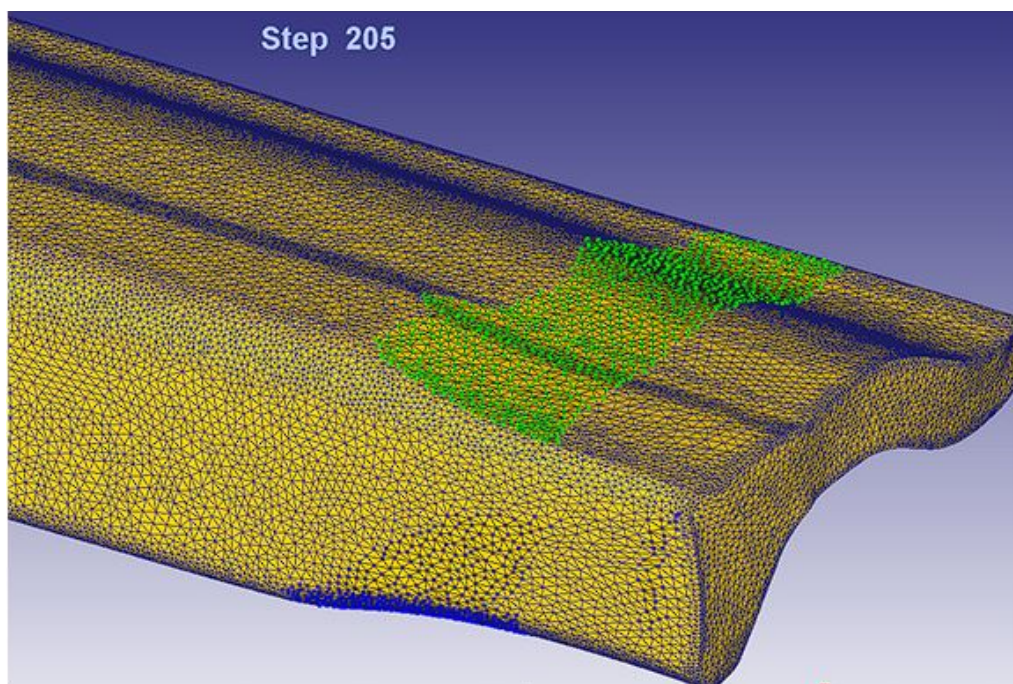


Рисунок 2 — Визуализация сетки конечных элементов до, в процессе и после деформирования несимметричного полособульбового профиля по ступенчатой калибровке

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Для валков была выбрана модель недеформируемого материала. Расстояние между осями валков 400 мм. Скорость прокатки металла в ступенчатом полосульбовом калибре принята постоянной — 4,4 м/с.

Поведение металла в процессе решения описывалось диаграммой «эквивалентное напряжение течения — эквивалентная деформация». При моделировании металл деформировался пластически, а сумма напряжений определялась в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения.

Расчет напряжения течения металла выполнялся с учетом накопленной деформации, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке по методу [7]. На базе метода [8]

выполнен расчет уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла, которая приведена в правой части окна компьютерной программы, показанного на рисунке 3. Уточненные константы показаны в правой части окна программы под компонентом «Выполнить».

Определена средняя относительная погрешность (6,8 %) при расчете напряжения течения металла по отношению к экспериментальной информации [8], которая имеется в диапазоне изменения степени деформации от 0,05 до 0,69. В нижней части окна программы показаны удовлетворительные результаты проверки адекватности модели с помощью критерия Фишера.

Метод, уточняющий параметры формулы Солода В.С. и др.

Пределы изменения факторов

$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	2.5	0.5	50	900	1200

Расчет напряжения течения металла

по экспериментальным кривым упрочнения

Химический состав [%]

Наименование	0.18C-0.27Si-0.85Mn
C (0.05 - 1.1)	0.18
Si (0 - 1.65)	0.27
Mn (0.03 - 1.55)	0.85
Cr (0 - 0.3)	0.3
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.025
S (0 - 0.05)	0.025
V (0 - 0.25)	
Cu (0 - 0.28)	

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

n1	m1	n2	m2	n3	m3	n4	m4
72.06	0.131	51.66	0.149	0.193	0.112	0.268	0.107

по уточненным параметрам формулы Солода В.С. и др.

Начальные параметры

n1	m1	n2	m2	n3	m3	n4	m4
72.265800	0.118313	60.889880	0.128282	0.328746	0.068079	0.519676	0.080813

Выполнить

Новая итерация

План-матрица эксперимента

X1	X2	X3	$\varepsilon$	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)	
1	-1	-1	-1	0.1079	4.886	926.584	106.851
2	+1	-1	-1	0.6361	4.886	926.584	155.357
3	-1	+1	-1	0.1079	45.614	926.584	143.499
4	+1	+1	-1	0.6361	45.614	926.584	212.759
5	-1	-1	+1	0.1079	4.886	1173.416	48.039
6	+1	-1	+1	0.6361	4.886	1173.416	71.954
7	-1	+1	+1	0.1079	45.614	1173.416	75.079
8	+1	+1	+1	0.6361	45.614	1173.416	104.106
9	-1.2154	0	0	0.051	25.250	1050.000	80.020
10	+1.2154	0	0	0.693	25.250	1050.000	135.285
11	0	-1.2154	0	0.3720	0.5	1050.000	68.009
12	0	+1.2154	0	0.3720	50	1050.000	147.053
13	0	0	-1.2154	0.3720	25.250	900	182.214
14	0	0	+1.2154	0.3720	25.250	1200	77.969
15	0	0	0	0.3720	25.250	1050.000	124.456

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)

Грanch 116.855    Грaбл 3.59    Грanch > Грaбл (адекватность обоснована)

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left( \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$$

$\sigma$ (МПа)	$\Delta$ (%)
107.756	0.847
160.349	3.213
146.912	2.379
205.676	3.329
56.699	18.027
77.463	7.656
69.781	7.057
101.012	2.972
75.006	6.266
131.685	2.676
80.297	18.068
129.830	11.712
193.609	6.254
84.697	8.629

$\Delta_{\text{ср}}$  (%) 6.796

Q 369398.373

A 57979072824546.930

Q по формуле В.С. Солода и др.  
Q по формуле С.Ф. Медва и др.  
Q по объединенной формуле  
Усовершенствованный метод

Выполнить    Дополнительно    Графики    <<Назад    Далее>>

Рисунок 3 — Окно компьютерной программы расчета уточненных констант по методу [8], определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла [7] и определения средней относительной погрешности при расчете напряжения течения металла по отношению к экспериментальной информации

На рисунке 4 представлены расчетные графические зависимости напряжения течения металла от степени деформации, полученные по методу [7], которые показаны линией 1, а также полученные по методу [8], которые показаны линией 2. Экспериментальные кривые [9] показаны линией 3. Повышение точности расчетных значений напряжения течения металла по методу [8]

получено за счет использования уточненных констант, определяющих термокинетические параметры. Соответствующие кривые течения стали 0,18C–0,27Si–0,85Mn в диапазоне температур 900–1200 °С в системе Deform-3D строятся на основе базы цифровой информации о напряжении течения металла, полученной по методу [7] с учетом уточненных констант на базе метода [8].

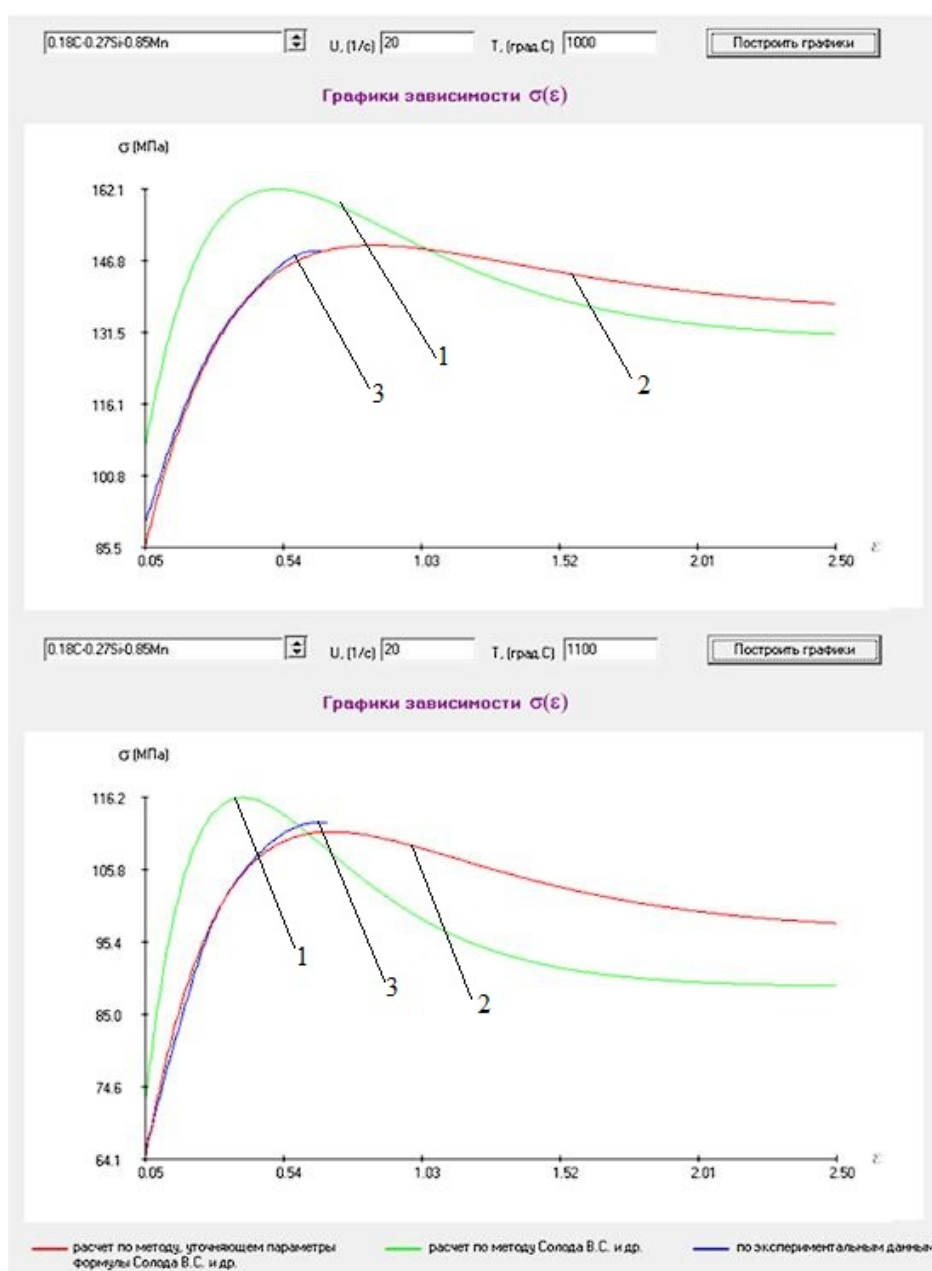


Рисунок 4 — Расчетные графические зависимости напряжения течения металла от степени деформации: 1 — полученные по методу [7], 2 — по методу [8]; 3 — экспериментальные кривые [9]

В качестве модели контактного трения принята известная сдвиговая модель Э. Зибеля:

$$\tau_{mp} = mk,$$

где  $\tau_{mp}$  — напряжение трения;

$m$  — фактор трения, для условий горячей прокатки ( $m = 0,5$ );

$k$  — напряжение течения металла заготовки на сдвиг.

Моделирование процесса прокатки несимметричного полосульбового профиля в ступенчатом калибре выполняли путем решения объемной задачи с учетом влияния внешних зон и наличия установившейся стадии прокатки. В процессе решения учитывали условие непроницаемости на контакте металла с валками.

Неравномерная деформация металла в калибре, вызывающая поперечное смеще-

ние металла в очаге деформации, и осевые силы, которые стремятся сместить ручки калибра относительно друг друга, приводят к отклонению величин деформации и, соответственно, вытяжек по элементам профиля от проектных значений. В связи с этим в работе выполнено моделирование и исследование процесса прокатки в условиях, когда не выполняется равенство вытяжек по основным элементам профиля (полке и стенке), а также когда обеспечено его выполнение.

В первом случае вытяжка по стенке на 0,1 была больше, чем вытяжка по полке. Результаты моделирования процесса прокатки в случае невыполнения условия равенства вытяжек по полке и стенке полосульбового профиля представлены на рисунках 5, а и 6, а, б.

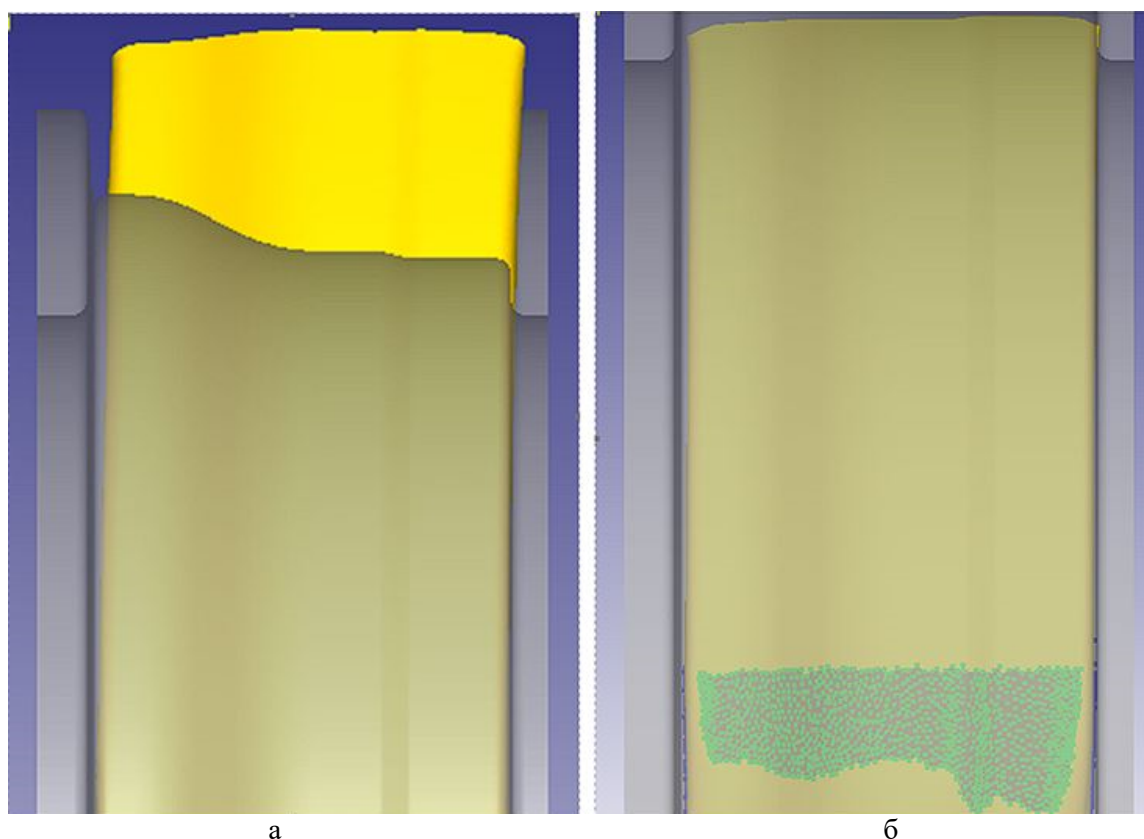
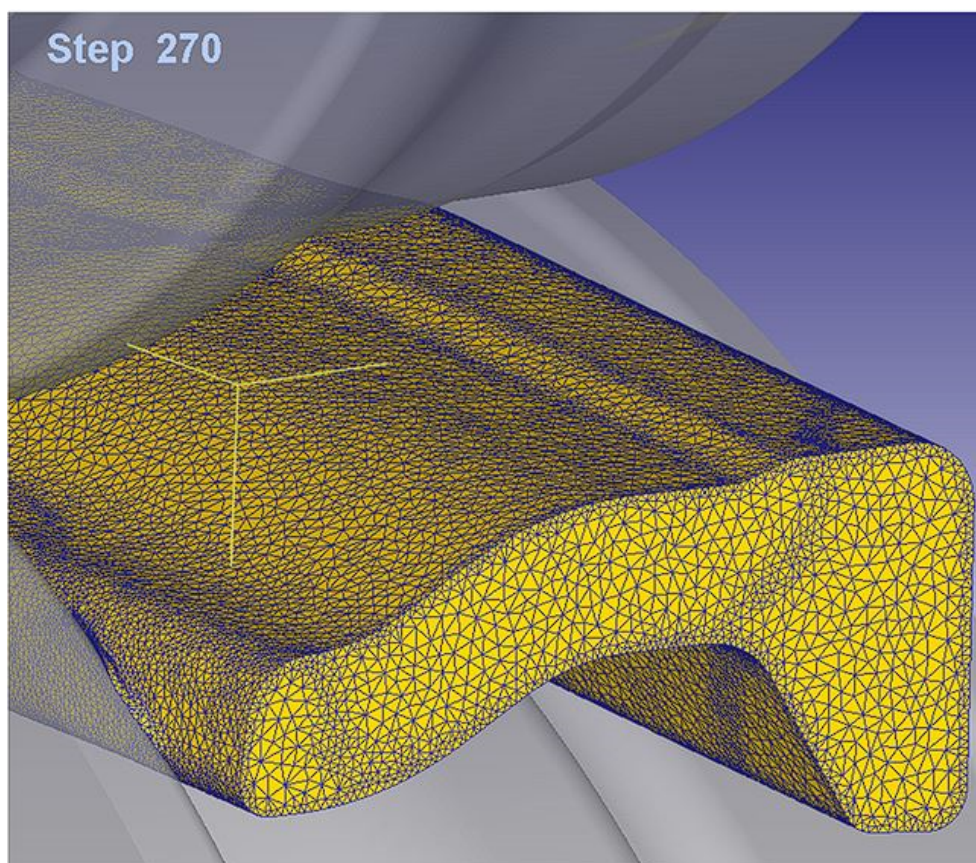
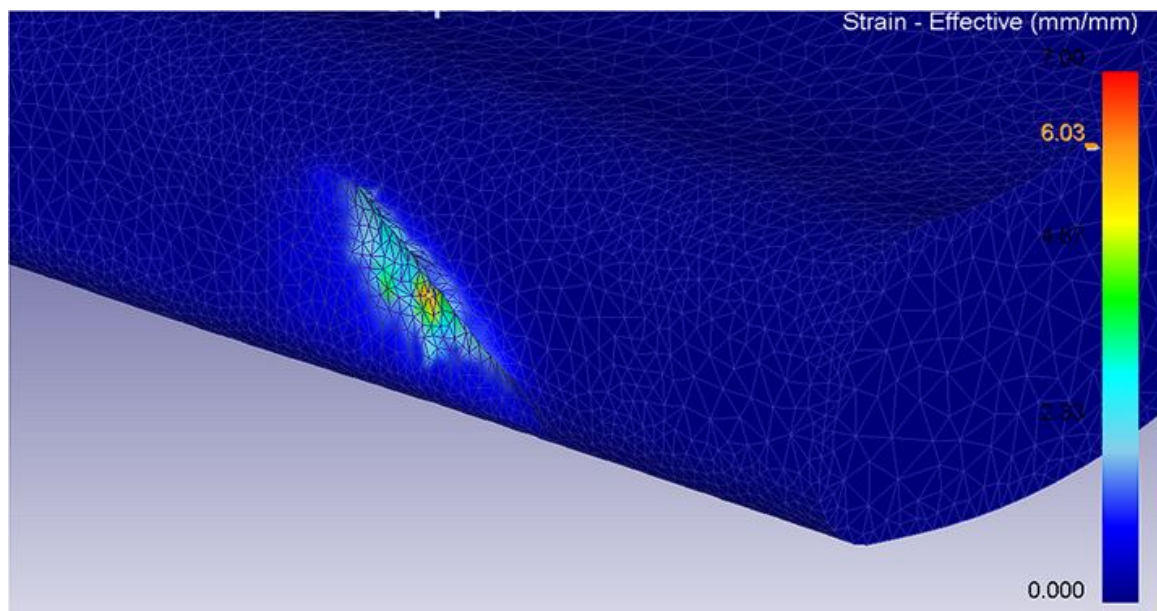


Рисунок 5 — Моделирование процесса прокатки несимметричного полосульбового профиля:  
 а — при серповидном изгибе раската в сторону полки;  
 б — при прямолинейном выходе раската из очага деформации



а



б

а — течение металла на борт калибра;  
б — расчет максимальной степени деформации  $\varepsilon = 6,03$  в зоне дефекта

Рисунок 6 Моделирование процесса образования дефекта

Во втором случае вытяжки по стенке и полке были равны между собой. Результаты моделирования процесса прокатки в случае обеспечения равенства вытяжек по полке и стенке полособульбового профиля представлены на рисунках 2, 5, 6, 7.

В случае невыполнения равенства вытяжек получен серповидный изгиб раската в сторону полки и нестабильность размеров профиля (рис. 5, а). При этом, в связи с неустойчивым положением раската в валах, получен перекосяк полосы в зоне её входа в очаг деформации, что привело к прижатию торца стенки полособульбового профиля к бурту калибра и течению металла на бурт калибра с образованием дефекта (рис. 6, б). Четкое формирование тонкостенного дефекта свидетельствует о достаточном измельчении сетки при конечно-элементном моделировании. Выполнен расчет максимальной степени де-

формации  $\varepsilon = 6,03$  в зоне образования дефекта (рис. 6, б). Полученное значение степени деформации наглядно обосновывает необходимость в процессе конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричных полособульбовых профилей учета процессов динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации. Это связано с тем, что известные методы, которые не учитывают разупрочнение металла, разработаны на базе экспериментальных данных, полученных при значительно меньшей степени деформации.

При обеспечении равенства вытяжек по полке и стенке полособульбового профиля имели место прямолинейный выход раската из очага деформации (рис. 5, б) и получение стабильных размеров профиля (рис. 2, 7).

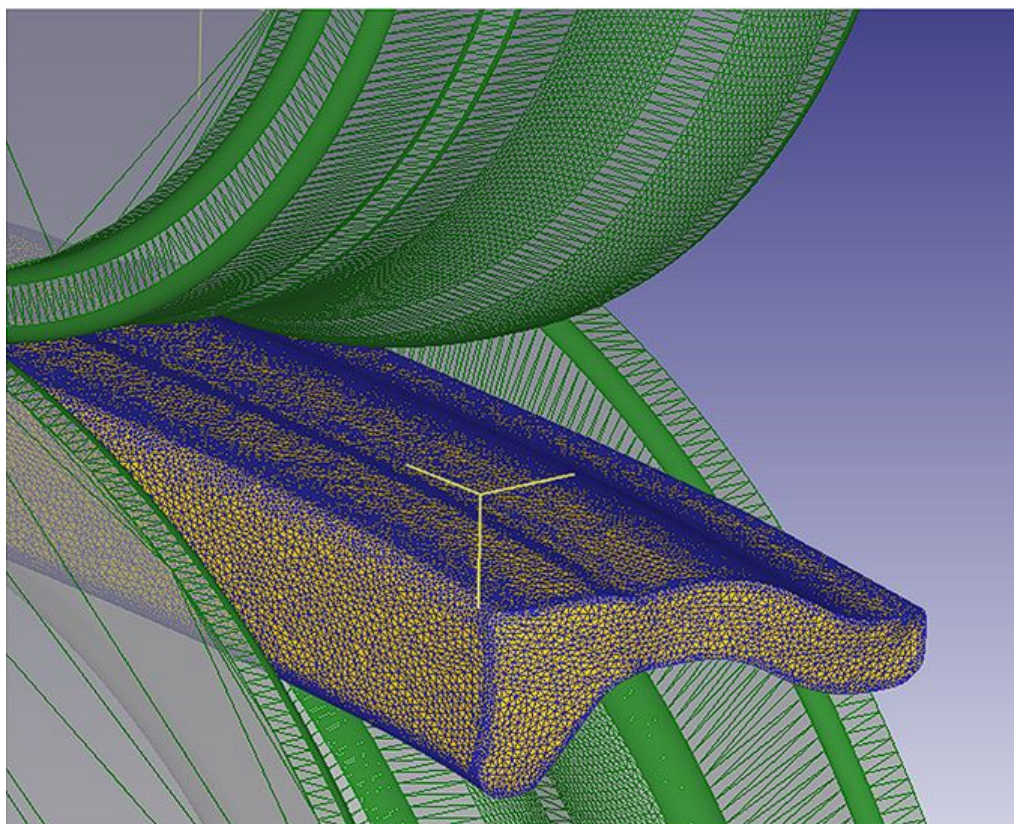


Рисунок 7 — Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричного полособульбового профиля по ступенчатой калибровке



**Выводы:**

1. Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричного полособульбового профиля в ступенчатом калибре. При этом определен режим генерации конечно-элементной сетки, выбраны известные модели процесса теплообмена, а также деформируемого материала и валков, использован усовершенствованный метод расчета напряжения течения металла.

2. Установлено, что зависимость для расчета напряжения течения стали 0,18С–0,27Si–0,85Mn, разработанная на базе теории, учитывающей динамическое преобразование структуры металла при горячей пластической деформации с учетом уточненных констант, определяющих термокинетические параметры, адекватно описывает экспериментальные кривые течения и может использоваться для конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричных полособульбовых профилей. Показано, что максимальная степень деформации может достигать значения  $\varepsilon = 6,03$ , что исключает возможность использования других методов расчета напряжения течения металла.

3. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки несиммет-

ричного полособульбового профиля в ступенчатом калибре. Показано, что при нарушении условия равенства вытяжек по полке и стенке профиля имеют место серповидный изгиб переднего конца раската в сторону полки и нестабильность размеров профиля, а также возможно образование дефектов. Обеспечение равенства вытяжек даёт прямолинейный выход раската из очага деформации, а также получение стабильных размеров профиля, что облегчает передачу полос из калибра в калибр и способствует производству несимметричных полособульбовых профилей на современных прокатных станах с последовательным расположением клетей.

Направление дальнейших исследований связано с конечно-элементным моделированием «чувствительности» ступенчатой калибровки несимметричных полособульбовых профилей к нарушениям в настройке стана, которые вызваны смещением верхнего ручья предшествующего калибра относительно нижнего в радиальном направлении на +2 мм и в поперечном  $\pm 1$  мм. Указанные величины смещения соответствуют максимально возможным отклонениям в реальных условиях прокатки от заданных калибровкой.

**Библиографический список**

1. Илюкович Б. М. *Прокатка и калибровка : справочник. Том II. Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2003. 569 с.*
2. Старченко Д. И. *Рациональные основы калибровки полособульбовой стали // ЖдМИ, Производство и обработка стали. Харьков, 1960. Вып. 5. С. 189–199.*
3. Старченко Д. И. *Теория корытной калибровки полособульбовых профилей // ЖдМИ, Производство и обработка стали. Харьков, 1960. Вып. 5. С. 200–247.*
4. Шум В. Б., Яковченко А. В. *Ступенчатая калибровка несимметричного полособульбового профиля // Металл и литье Украины. 2004. № 12. С. 25–28.*
5. *Спосіб прокатки штабобульбової сталі : пат. 67656А Україна. № В21 В1/08 ; опубл. 15.06.04, Бюл. № 6.*
6. Снитко С. А., Денищенко Н. П., Пилипенко В. В. *Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 23 (66). С. 32–39.*
7. Солод В. С., Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю. *Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металл и литье Украины. 2006. № 7–8. С. 52–56.*

8. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла / А. В. Яковченко [и др.] // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2022. № 26 (69). С. 29–39.

9. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. М. : Металлургия, 1976. 488 с.

© Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И.

© Пилипенко В. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ОМДМ ДонГТУ Митичкиной Н. Г., к.т.н., помощником начальника СПЦ ООО «ЮГМК» по технологии Чичканом А. А.**

Статья поступила в редакцию 07.06.2023.

**Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N., Kravtsova S. I.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, [kravtsovsveta@gmail.com](mailto:kravtsovsveta@gmail.com)), **Pilipenko V. V.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, the Russian Federation, [dvenaxa94@mail.ru](mailto:dvenaxa94@mail.ru))

#### **INVESTIGATION THE POSSIBILITY OF ROLLING ASYMMETRIC BULB FLAT SECTIONS BY THE INTERVAL CALIBRATION ON MODERN MILLS WITH SEQUENTIAL ARRANGEMENT OF STANDS**

The adaptation of method was carried out for the finite-element modeling of rolling process of the asymmetric bulb flat section in the interval caliber. If the condition of equality of cogging backs along the shelf and the profile wall is violated, there is a crescent-shaped bend of the front end of the roll towards the shelf and instability of the section dimensions, as well as the formation of defects. It is shown that ensuring the equality of cogging backs gives a rectilinear output of the roll from the deformation focus, as well as obtaining stable profile sizes, which facilitates the transfer of strips from caliber to caliber and promotes the production of asymmetric bulb flat sections on modern rolling mills with a sequential arrangement of stands.

**Key words:** rolling of asymmetric bulb flat section, crescent-shaped bend of the roll, cogging back, finite-element modeling, rolling mills with a sequential arrangement of stands.

#### **References**

1. Iliukovich B. M. Rolling and calibration: a handbook [Prokatka i kalibrovka: spravochnik]. Vol. II. Dnepropetrovsk: Advertising Issuing Agency "Dnipro-VAL", 2003. 569 p. (rus)
2. Starchenko D. I. Rational basis for calibrating bulb flat steel [Racional'nye osnovy kalibrovki polosobul'bovoj stali]. ZhdMI, Proizvodstvo i obrabotka stali. Khar'kov, 1960. Iss. 5. Pp. 189–199. (rus)
3. Starchenko D. I. Theory of trough calibration of bulb flat sections [Teoriya korytnoj kalibrovki polosobul'bovyh profilej]. ZhdMI, Proizvodstvo i obrabotka stali. Khar'kov, 1960. Iss. 5. Pp. 200–247. (rus)
4. Shum V. B., Yakovchenko A. V. The interval calibration of asymmetrical bulb flat sections [Stupenchataya kalibrovka nesimmetrichnogo polosobul'bovogo profilya]. Metal and Casting of Ukraine. 2004. No. 12. Pp. 25–28. (rus)
5. Method of rolling bulb flat steel. Patent 67656A Ukraine, no. № B21 B1/08, 2004.
6. Snitko S. A., Denishchenko N. P., Pilipenko V. V. Adaptation of method of the finite-element modeling the process of the oval roll rolling in round calibre [Adaptaciya metoda konechno-elementnogo modelirovaniya processa prokatki oval'nogo raskata v kruglom kalibre]. Scientific works collection of DonSTI. 2021. Iss. 23 (66). Pp. 32–39. (rus)
7. Solod V. S., Beigelzimer Ya. E., Kulagin R. Yu. Mathematical modeling of deformation resistance during hot rolling of carbon steels [Matematicheskoe modelirovanie soprotivleniya deformacii pri goryachej prokatke uglerodistyh stalej]. Metal and Casting of Ukraine. 2006. No. 7–8. Pp. 52–56. (rus)
8. Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravtsova S. I., Ivleva N. I. Method for refinement of constants determining thermokinetic parameters in the formula for calculating metal flow stress [Metod

*utochneniya konstant, opredelyayushchih termokineticheskie parametry v formule rascheta napryazheniya techeniya metalla]. Scientific works collection of DonSTI. Alchevsk, 2022. No. 26 (69). Pp.29–39. (rus)*

9. Polukhin P. I., Gun G. Ya., Galkin A. M. Resistance to plastic deformation of metals and alloys: a handbook [Soprotivlenie plasticheskoj deformacii metallov i splavov: spravochnik]. Metallurgy. 1976. 488 p. (rus)

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Яковченко Александр Васильевич**, д-р техн. наук, профессор каф. обработки металлов давлением и металловедения  
Донбасский государственный технический университет,  
Луганская Народная Республика, РФ,  
e-mail: mond1991@mail.ru

**Денищенко Павел Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. обработки металлов давлением и металловедения  
Донбасский государственный технический университет,  
Луганская Народная Республика, РФ,  
e-mail: pavel.denischenko@gmail.com

**Кравцова Светлана Игоревна**, аспирант каф. обработки металлов давлением и металловедения  
Донбасский государственный технический университет  
Луганская Народная Республика, РФ,  
e-mail: kravtsovsveta@gmail.com

**Пилипенко Виктор Владиславович**, канд. техн. наук, старший преподаватель каф. обработки металлов давлением  
Донецкий национальный технический университет,  
Донецкая Народная Республика, РФ,  
e-mail: dvepaха94@mail.ru