

УДК 621.771.014.2

Д.И. Кинзин, А.Б. Моллер, С.С. Рычков

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ВЫБОР МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УШИРЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОКАТКИ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

За последние 100 – 120 лет многие ученые, плотно занимавшиеся разработкой и совершенствованием теории прокатки и калибровкой валков, предложили ряд формул, позволяющих определить уширение металла при прокатке как на гладкой бочке, так и в калибрах [1]. Почти все они включают в себя некий набор поправочных коэффициентов, учитывающих определенные условия прокатки, форму используемых калибров и выведенных на основе опыта авторов или статистической обработки полученных ими данных.

Например, по методике расчета уширения на гладкой бочке Вусатовского [2] рассчитывают калибровку в компании WICON, принадлежащей DANIELI. Соответственно вместе с сортавыми станами этого производителя металлургического оборудования поставляются и калибровки, разработанные с использованием этой методики.

Во ВНИИМЕТМАШ для каждой системы калибров использовали набор формул для определения уширения [3]. Ученые МИСиС (Берковский В.С.) и Уральского федерального университета (УрФУ) (Смирнов В.К.) предложили универсальные формулы расчета уширения [4, 5]:

$$\beta = 0,87 \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0,33} \left(\frac{h_0}{D}\right)^{-0,07} \left(\frac{v_0}{v_k}\right)^{0,37} \left(\frac{b_k}{b_0}\right)^{0,08} \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{0,05}; \quad (1)$$

$$\beta = 1 + C_0 \left(\frac{h_0}{h_k} - 1\right)^{C_1} \left(\frac{D}{h_k}\right)^{C_2} \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{C_3} \left(\frac{b_k}{h_k}\right)^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6} (\text{tg } \varphi)^{C_7}, \quad (2)$$

где β – показатель уширения; h_0 и b_0 – высота и ширина заготовки до деформации; h_1 – высота заготовки после деформации; b_k – ширина калибра; D – диаметр валков; v_0 и v_k – коэффициенты формы исходной заготовки и калибра; C_0, \dots, C_7 – постоянные коэффициенты; δ_0 – степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра; ψ – показатель трения; $\text{tg } \varphi$ – выпуск ящичного калибра.

На кафедре обработки металлов давлением МГТУ Д.И. Кинзиным разработана¹ оригинальная методика

расчета уширения на основе количественной формулировки принципа наименьшего сопротивления:

$$\ln \mu = - \frac{1 - K_2 - \sqrt{\frac{1}{2} \left((1 - K_2)^2 + (K_2 - K_3)^2 + (1 - K_3)^2 \right)}}{1 - K_3 - \sqrt{\frac{1}{2} \left((1 - K_2)^2 + (K_2 - K_3)^2 + (1 - K_3)^2 \right)}} \times \frac{S_1}{S_2} \ln \frac{b_1}{b_0}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент вытяжки; K_2, K_3 – коэффициенты, учитывающие влияние формы контактной поверхности; S_1/S_2 – соотношение, учитывающее влияние формы калибра.

В настоящее время все более широкое применение получают различные коммерческие комплексы программ конечно-элементного моделирования: ANSYSTM, ABAQUSTM, FORGETM, Q-FORMTM и др. МГТУ обладает лицензией на использование метода DEFORM-3DTM, соответственно, было решено также включить его в сравнение как один из вариантов расчета уширения.

Сравнительный анализ особенностей и возможностей перечисленных выше моделей представлен в табл. 1. Видно, что DEFORM-3D и формула МГТУ способны «переварить» любые типы калибров и входящих, и выходящих сечений раскатов. Немного уступает им методика МИСиС, не способная рассчитывать уширение в многовалковых калибрах. Способы расчета уширения, предложенные УрФУ и ВНИИМЕТМАШ, значительно менее универсальны. Единственным недостатком модели DEFORM является значительно более низкая скорость расчета.

Сравнение точности расчета различными способами проводили для 39 вариантов калибров и подката со старых станов сортового цеха ОАО «ММК»: 250-1, 250-2, 300-3, а также лабораторного стана кафедры ОМД МГТУ.

В качестве примера на рис. 1 приведены некоторые из исследовавшихся калибров. Наряду с общепринятыми, стандартными вариантами прокаток (рис. 1, а – з, е, ж), моделировали прокатку ромба, размеры которого превышают размеры калибра: $h_0 > h_k$, $b_0 > b_k$ (рис. 1, д); прокатку заготовок с большими обжатиями, чтобы добиться переполнения калибров; прокатку получившихся раскатов в следующем по ходу прокатки калибре

¹ Кинзин Д.И. Совершенствование и проектирование калибровок простых сортовых профилей на основе анализа показателей формоизменения и энергосиловых параметров. Автореф. дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 2003. – 16 с.

Область применения и возможности моделей расчета уширения металла при прокатке в калибрах

Возможности и особенности методики				
УрФУ	ВНИИМЕТМАШ	МИСиС	МГТУ	DEFORM
Формула расчета уширения для разных типов калибров				
Одна	Много	Одна	Одна	–
Расчет уширения многовалковых калибров				
Невозможен	Возможен	Невозможен	Возможен	Возможен
Расчет уширения в нетиповых калибрах				
Невозможен	Невозможен	Возможен	Возможен	Возможен
Точность расчета при переполнении калибров				
Низкая	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая
Универсальность методики				
Нет	Нет	Да/Нет	Да	Да
Скорость расчета				
Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая

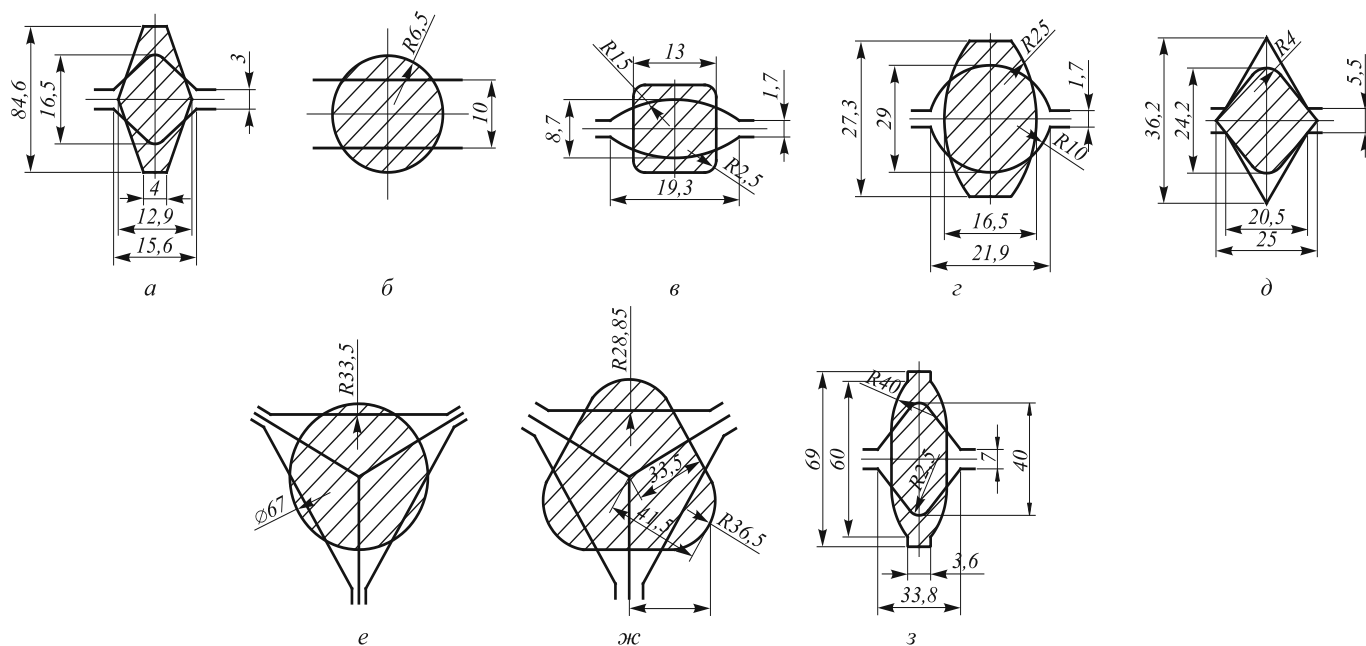


Рис. 1. Примеры калибров и раскатов, применявшихся при оценке адекватности моделирования различных моделей: а – ромб–квадрат; б – круг–гладкая бочка; в – квадрат–овал; з – овал–круг; д – ромб–квадрат; е – круг–треугольник; ж – треугольник–треугольник; з – овал–квадрат

(рис. 1, з) и других нетиповых калибров. Все это было сделано, чтобы протестировать разные модели в самых экстремальных условиях. Доля нетиповых калибров в исследовании составила 36 %.

Особенностью моделей расчета различных параметров процесса, основанных на методе конечных элементов (МКЭ), является комплексный подход к постановке задачи эксперимента, в процессе которой необходимо принять ряд допущений:

- материал однородный и изотропный – сталь AISI 1015 (аналог стали 15);
- деформируемая среда – вязкопластическая;
- валки несжимаемые;

- трение по закону Зибеля (показатель трения 0,5): $\tau = mk$;
- процесс изотермический (теплообмен раската с окружающей средой отсутствует): $t_b = 20^\circ\text{C}$, $t_{ст} = 950^\circ\text{C}$, $t_{св} = 20^\circ\text{C}$ (здесь t_b , $t_{ст}$, $t_{св}$ – температуры валков, стали, свинца);
- процесс установившийся (отсутствует момент захвата и выхода металла из валков – использование модуля ShapeRolling);
- процесс симметричный – прокатка четверти поперечного сечения заготовки в двухвалковых калибрах; прокатка 1/6 заготовки в трехвалковых калибрах;

- длины заготовок – не менее семи длин геометрических очагов деформации для учета зон задней и передней внеконтактной деформации;
- конечные элементы (КЭ) – гексаэдры;
- количество КЭ – примерно 11 000 (150 элементов в поперечном сечении в 72-х слоях); две трети всех КЭ сконцентрировано в окрестности очага деформации с применением инструмента «окна плотности».

Необходимо отметить, что для условий горячего деформирования рекомендуют [6] выбирать показатель трения $m = 0,7 \div 1,0$ исходя из формулы $\tau = mk$. Выбранный нами показатель $m = 0,5 = \text{const}$, что является довольно грубым упрощением, которое используется и в других методиках, так как достоверно определить значение показателя трения в калибрах не представляется возможным из-за того, что в различных точках контакта раската с инструментом обжатия деформации и напряжения отличаются в разы. Кроме этого, вместо тетраэдральной сетки конечных элементов использовали гексаэдры. Их достоинства и недостатки были рассмотрены ранее [7].

В табл. 2 представлены величины отклонений от экспериментальных данных по рассматриваемым

методикам для станов 250-1, 250-2, 300-3. Когда большинство моделей дает большую ошибку вычисления (овал–круг стана 250-1, квадрат–шестигранник стана 200), – это свидетельство того, что в данном случае было значительное обжатие при прокатке (более 45 %).

Представленные данные служат подтверждением необходимости использования более точных, более современных, более универсальных способов расчета уширения. Хорошие результаты демонстрирует модель DEFORM и методика МГТУ. Удовлетворительных результатов можно добиться, используя формулу МИСиС (рис. 2).

Выводы. Формула МГТУ и модель DEFORM-3D, основанная на МКЭ, при приведенном выше уровне допущений, показывают среднее отклонение от опытных значений в 2,5 %. Соответственно использование DEFORM только для расчета уширения при прокатке в простых калибрах – нерационально с точки зрения затрат времени и ресурсов. При использовании DEFORM-3D следует делать акцент на анализ распределенных характеристик: напряженно-деформированного состояния, температуры по объему заготовки и инструмента, износа валков, степени использования запаса

Т а б л и ц а 2

Некоторые результаты расчетов уширения при прокатке в двух- и трехвалковых калибрах

Заготовка – калибр	Ширина раската, мм	Отклонение, %, от экспериментальных данных при расчете по методике				
		УрФУ	ВНИИМЕТМАШ	МИСиС	МГТУ	DEFORM-3D
<i>Стан 250-1</i>						
Овал – круг	19,66	-5,80	-8,44	5,70	-5,90	-1,32
Ромб – квадрат	16,00	13,50	–	1,81	-3,13	0,63
Ромб – квадрат	21,76	7,63	–	6,66	-3,95	1,75
Квадрат – ромб	24,50	1,55	18,69	7,14	-1,63	-0,90
Прямоугольник – гладкая бочка	20,00	-3,90	-5,70	4,20	-3,50	-5,80
Квадрат – овал	17,10	16,02	2,34	7,89	-2,34	-2,34
<i>Стан 250-2</i>						
Квадрат – ящ. прямоуг.	76,00	-3,55	-9,05	-0,39	-3,55	-3,63
Шестигран. – квадрат	21,00	31,52	-7,05	4,00	-1,43	5,38
Овал (ус.) – квадрат	30,80	2,21	-1,88	4,87	-0,65	-3,05
Овал (ус.) – квадрат	12,10	10,58	-4,96	1,90	-2,48	-3,47
Квадрат – овал (ус.)	25,60	17,42	-1,56	-1,33	0,78	-2,11
<i>Стан 300-3</i>						
Круг – треугольник	83,00	–	-1,25	–	-1,57	-1,07
Треуг. – треуг.	68,00	–	2,65	–	0,59	1,88
Треуг. – треуг.	57,80	–	4,81	–	2,42	3,84
Треуг. – треуг.	49,80	–	1,29	–	-1,20	0,88
<i>Стан 200</i>						
Квадрат – шестигр.	32,24	28,01	–	7,88	5,48	10,38
Ромб – квадрат	26,80	27,24	–	-5,34	1,87	0,45

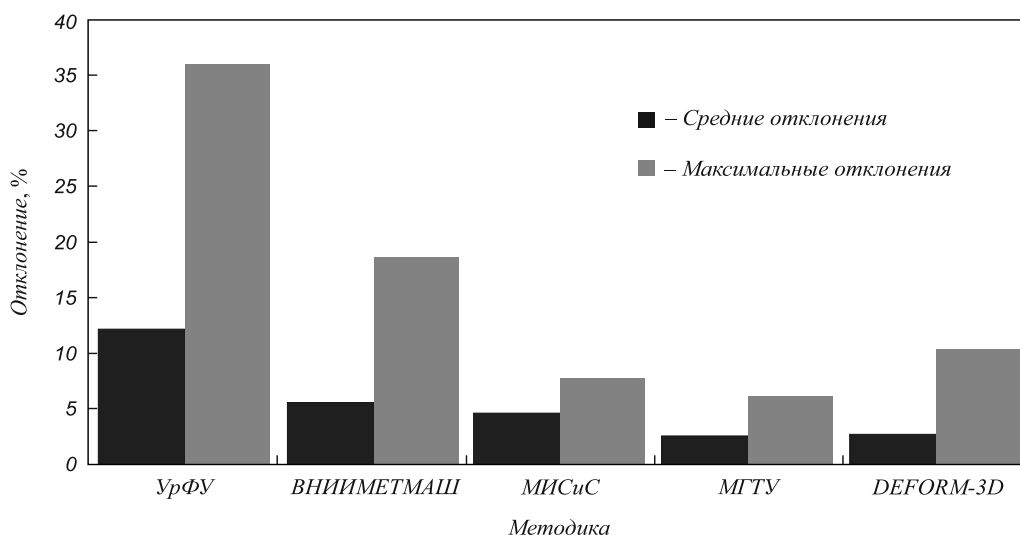


Рис. 2. Отклонения результатов расчета уширения от экспериментальных данных при прокатке в двух- и трехвалковых калибрах

пластичности металла и т.п. [8]. Применение способа расчета уширения, предложенного в МГТУ, обеспечивает высокую скорость расчета. Например, в случаях, когда требуется пересчет огромного числа различных нетиповых сечений при поиске оптимальной формы калибра по тому или иному критерию оптимальности (минимум работы деформации, максимум критерия эффективности калибровки и т.п.), использование формул – наиболее подходящий вариант расчета уширения. В отсутствие другой универсальной методики расчет уширения с помощью МКЭ – единственный способ моделирования прокатки сортовых профилей сложной формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

2. Вусатовский З. Основы прокатки. – М.: Металлургия, 1967. – 584 с.
3. Минкин А.В. Расчет систем вытяжных калибров. – М.: Металлургия, 1989. – 208 с.
4. Берковский В.С. Теоретические основы и расчет калибровки валков сортовых прокатных станов: Учеб.-метод. пособие. – М.: МИСиС, 2003. – 110 с.
5. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 386 с.
6. Kobayashi I.S., Oh S.I., Altan T. Metalforming and the Finite-Element Method. Oxford University Press, 1989. – 378 p.
7. Рычков С.С. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2011. Вып. 37. С. 146 – 151.
8. Кинзин Д.И., Рычков С.С. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 2. С. 45 – 48.

© 2012 г. Д.И. Кинзин, А.Б. Моллер,
С.С. Рычков
Поступила 14 мая 2012 г.

УДК 621.791:624

**Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев, З.В. Голдун,
Р.Е. Крюков, В.М. Шурупов**

Сибирский государственный индустриальный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ*

При изготовлении сварных конструкций основной задачей является получение сварных соединений, прочность которых равна прочности основного металла, а сами эти соединения обладают требуемыми механи-

ческими свойствами. Механические свойства сварных швов обеспечиваются составом металла, газонасыщенностью, загрязненностью металла неметаллическими включениями. Образующийся при сварке под флюсом шлак должен выполнять не только защитные функции, но и способствовать получению металла шва с минимальным количеством неметаллических включений [1, 2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации госзаказа 7.5021.2011.