

УДК 621.777

Данченко В. Н.  
Ремез О. А.  
Мроз С.  
Самсоненко А. А.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ШИРИНЫ ПРОФИЛЯ ПРИ ПРОКАТКЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ В КАЛИБРАХ ПРОСТОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА «FORGE 3»

При производстве сортовых профилей из специальных сталей, возникает ряд специфических явлений требующих дальнейшего изучения [1, 2]. Одной из таких проблем, является склонность некоторых марок сталей к повышенному уширению.

При производстве сортовых профилей из специальных сталей, экономически целесообразно прокатывать максимально возможное количество различных марок стали в валках одной и той же калибровки. Однако из-за склонности определенных марок сталей к повышенному уширению невозможно получить нижние размеры сортамента. Это приводит также к дополнительным затратам времени на настройку стана. В связи с этим актуальным является исследование причин возникновения повышенного уширения и факторов, влияющих на это явление.

Большинство авторов объясняют повышенное уширение металла при прокатке специальных сталей влиянием условий трения на контактной поверхности: чем больше коэффициент трения, тем больше уширение. Одно из первых объяснений данному явлению дано в работе Чижикова Ю. М. «Прокатываемость стали и сплавов». Однако экспериментальные исследования при прокатке различных металлов и сплавов на гладкой бочке, проведенные А. П. Грудевым, не подтвердили соответствие между уширением и коэффициентом трения [3]. Автор предполагает, что это связано с влиянием реологических свойств металлов, в частности, с интенсивностью упрочнения в процессе деформации.

При исследовании уширения в калибрах [4, 5] были получены поправочные коэффициенты для учета влияния химического состава стали. Но однозначного объяснения природы повышенного уширения не дано.

Следует отметить, что при создании методик расчета уширения большинство авторов [6] указывают на различный характер уширения сталей через коэффициент трения. Такой подход не учитывает влияние других факторов на уширение и не отражает в полной мере природу этого явления. Таким образом, перечисленные исследования не дают полного представления о влиянии факторов процесса прокатки на повышенное уширение различных сплавов при деформации в калибрах.

Целью работы является теоретическое исследование формоизменения, в частности уширения, при прокатке заготовок из различных марок сталей в калибрах простой формы, с учетом влияния таких факторов как степень деформации, температура и скорость прокатки.

Для дальнейшего исследования формоизменения металла была выбрана программа компьютерного моделирования «Forge 3» фирмы «Transvalor» (Франция). Исследования проводились совместно с сотрудниками Ченстоховского политехнического университета в рамках договора о сотрудничестве с НМетАУ.

Описание модели процесса формоизменения при моделировании поставленной задачи: используется закон трения Амонтона; принимается теория пластического течения несжимаемых сред Сен-Венана – Леви – Мизеса; задача считается трехмерной.

Для получения решения в программе «Forge 3» используется условие стационарности функционала смешанного вариационного принципа:

$$J = \frac{1}{2} \int_V \sigma_S \dot{\varepsilon}_i dV + \int_V \sigma \dot{\varepsilon}_0 dV - \int_F \sigma_\tau u_\tau dF,$$

где  $\sigma_S(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, t)$  – зависимость напряжения текучести  $\sigma_S$  от интенсивности скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_i$ , интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  и температуры  $t$ ;  $V$  – объем металла;  $\sigma_\tau$  и  $u_\tau$  – напряжение трения и скорость скольжения металла по инструменту;  $F$  – поверхность контакта металла с инструментом.

Зависимость  $\sigma_S(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, t)$  выбирается для конкретных материалов из литературных данных или по результатам пластометрических испытаний.

В программе используются конечные элементы в виде тетраэдров с линейной аппроксимацией среднего напряжения и кусочно-линейной аппроксимацией скорости (по угловым узлам элемента и узлу в центре тяжести элемента) [7].

Для проверки программы, было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными при прокатке металла на гладкой бочке и в калибрах.

Прокатка на гладкой бочке проходила на стане 150 лаборатории кафедры обработки металлов давлением НМетАУ. Прокатка проходила для следующих условий: материал – сплав АД00, поперечное сечение заготовки  $20 \times 25$  мм, скорость прокатки 0,05 м/с. Сравнение экспериментальных данных и данных, полученных путем компьютерного моделирования прокатки на гладкой бочке, представлены на рис. 1.

Для характеристики уширения использовали показатель  $\Delta b/\Delta h$ , который наименее чувствителен к изменению формы очага деформации. Показатели деформации при прокатке алюминиевого сплава АД00 приведены в таб. 1.

Таблица 1

Показатели деформации при прокатке алюминиевого сплава АД00

$h_0$ , мм	$b_0$ , мм	$h_1$ , мм	$b_1$ , мм	температура, °С	$\varepsilon$ , %	$\lambda$	$\Delta b/\Delta h$
19,7	25,4	17,7	26,3	500	10,15	1,07	0,45
20,5	24,5	17,6	25,5	450	14,15	1,12	0,34
20	23,14	11,1	30,4	450	44,50	1,37	0,82
20	24,4	10,7	32,4	500	46,50	1,41	0,86

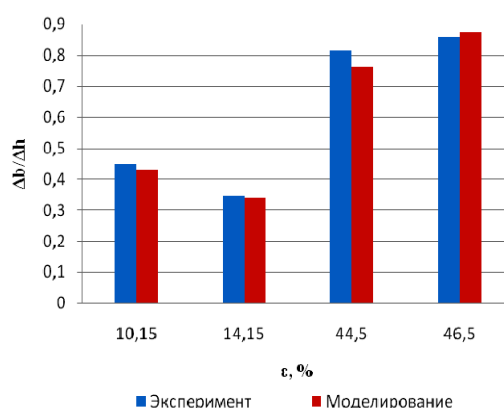


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных и данных, полученных путем компьютерного моделирования по уширению

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных при прокатке металла на гладкой бочке показало, что программа «Forge 3» с высокой точностью определяет формоизменение металла, относительная погрешность для двух случаев лежит в пределах 2 %.

Моделирование процесса прокатки в калибрах проводилось для образцов с разной шириной ( $B_1 = 30$  мм,  $B_2 = 33$  мм) и постоянной высотой  $H = 50$  мм, температура начала прокатки составляла 1100 °С, материал заготовки Ст 3. Схема калибра, а также сравнение экспериментальных данных и данных, полученных моделированием, приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

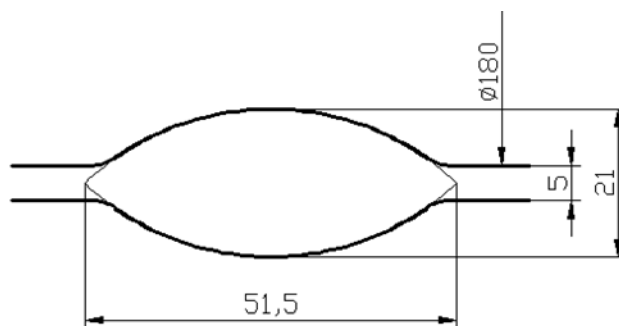


Рис. 2. Схема калибра стана 180

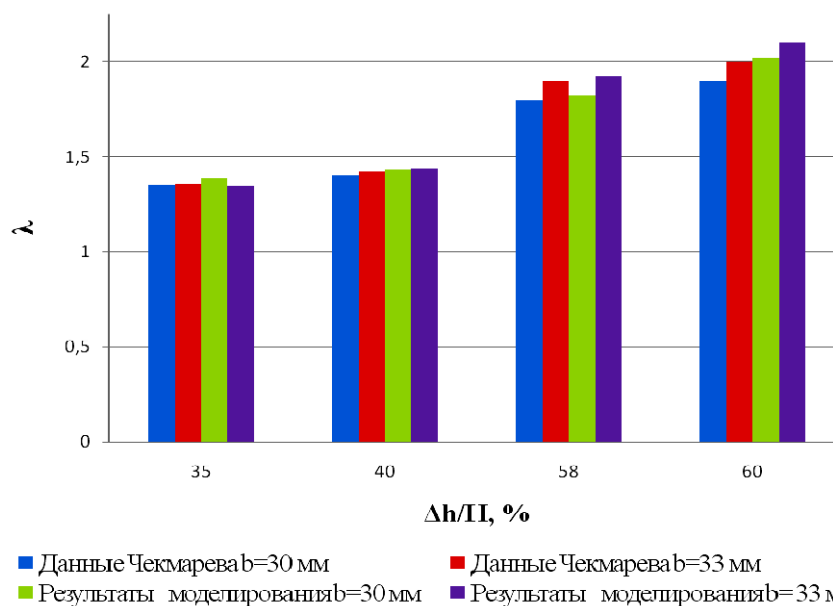


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных и данных, полученных путем моделирования, при прокатке в овальном калибре

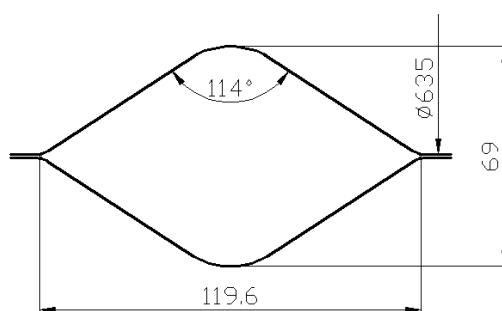


Рис. 4. Схема исследуемого ромбического калибра

Сравнение данных моделирования и экспериментальных данных [8] прокатки Ст 3 в овальном калибре показало, что максимальное отклонение при расчете составляет не более 6 %. Это указывает на то, что данная программа дает достаточно точные расчеты формоизменения при прокатке в калибрах и на гладкой бочке.

Теоретическое исследование формоизменения металла при прокатке в калибрах сталей с различным химическим составом проводилось при таких условиях: система калибров «Квадрат-Ромб», марки стали 08X13, 12X17 и стали 10. Марки стали выбирались из следующих соображений: 08X13 и 12X17 – стали ферритного класса, которые склонны к повышенному уширению, а стали 10 – выбиралась, как эталонная сталь с обыкновенными свойствами. Схема исследуемого калибра представлена на рис. 4, а химический состав исследуемых сплавов представлен в табл. 2.

Таблица 2

## Химический состав исследуемых сплавов

Химический элемент	C, %	Si, %	Mn, %	Cu, %	Ni, %	S, %	Ti, %	P, %	Cr, %
Сплав 08X13	0,08	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,3	≤ 0,6	≤ 0,025	≤ 0,2	≤ 0,03	12,0–14,0
Сплав 12X17	0,12	≤ 0,8	0,8	≤ 0,3	≤ 0,6	≤ 0,025	≤ 0,2	≤ 0,035	16,0–18,0
Ст.10	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,04	–	≤ 0,035	0,15

Условия моделирования прокатки в калибрах: диаметр валков 630 мм; размеры заготовки: 98 × 98 × 300 мм; показатель трения задан по условию закона трения Амонтона и равен 0,3 для всех марок. Также варьировались такие факторы: температура прокатки, °С ( $X_1$ ), степень деформации, % ( $X_2$ ), скорость вращения валков, об/мин ( $X_3$ ). План полнофакторного эксперимента и результаты моделирования представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

На основании полученных данных установлено, что наибольшее уширение при моделировании прокатки в калибрах проявляется в стали 08X13.

Сравнение показателя уширения для трех марок сталей представлено на рис. 5, где максимальные значения показателя уширения проявляются при относительном обжатии по вершине калибра 30 %.

Таблица 3

## План полнофакторного эксперимента

№	$X_1, t, ^\circ\text{C}$	$X_2, \varepsilon, \%$	$X_3, V_{\text{в}}, \text{об/мин}$
Верхний уровень	1200	30	220
Нижний уровень	1100	20	100
Нулевой уровень	1150	25	160
Интервал варьирования	50	5	60
1	–	–	–
2	+	–	–
3	–	+	–
4	+	+	–
5	–	–	+
6	+	–	+
7	–	+	+
8	+	+	+

Таблица 4

## Геометрические размеры полосы при прокатке трех марок сталей

$h_0, \text{мм}$	$b_0, \text{мм}$	$b_1, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	08X13			12X17			Ст 10		
				$\Delta b$	$\Delta h$	$\Delta b/\Delta h$	$\Delta b$	$\Delta h$	$\Delta b/\Delta h$	$\Delta b$	$\Delta h$	$\Delta b/\Delta h$
98	98	101,89	78,91	3,60	19,73	0,18	3,57	19,73	0,18	3,63	19,73	0,18
98	98	101,86	78,91	3,56	19,73	0,18	3,55	19,73	0,18	3,52	19,73	0,18
98	98	105,67	69	7,38	29,64	0,25	7,24	29,64	0,24	7,23	29,64	0,24
98	98	105,54	69	7,24	29,64	0,24	7,27	29,64	0,25	7,23	29,64	0,24
98	98	101,81	78,91	3,52	19,73	0,18	3,59	19,73	0,18	3,64	19,73	0,18
98	98	101,92	78,91	3,64	19,73	0,18	3,62	19,73	0,17	3,63	19,73	0,18
98	98	105,59	69	7,30	29,64	0,25	7,21	29,64	0,24	7,11	29,64	0,24
98	98	105,47	69	7,18	29,64	0,24	7,16	29,64	0,24	7,13	29,64	0,24

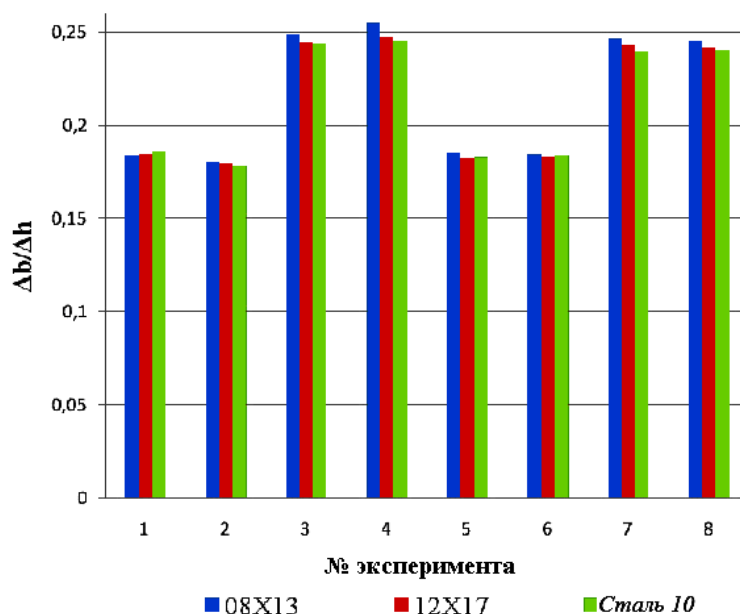


Рис. 5. Диаграмма сравнения показателя уширения по трем маркам стали

Для более глубокого изучения возникновения уширения полосы из стали 08X13 рассмотрим изменение ширины в очаге деформации. Изменение ширины полосы в очаге деформации измерялось в семи сечениях 2, 3; 4, 5, 6 – находятся на равном расстоянии друг от друга: сечения 1, 7 имеют конечную и начальную ширину прокатанного профиля, соответственно. Схема сечений, а также распределение ширины полосы по сечениям в очаге деформации представлены на рис. 6 и 7, соответственно.

На рис. 8 изображено изменение ширины по всей длине очага деформации  $\Delta b_{од}$  по сечениям в стали 08X13 и стали 10.

Определение изменения ширины очага деформации по сечениям:

$$\Delta b_{од_i} = b_{од_i} - b_{од_{i+1}},$$

где  $\Delta b_{од_i}$  – разница ширин очага деформации в сечениях;  $b_{од_i}$  – длина очага деформации в  $i$ -ом сечении.

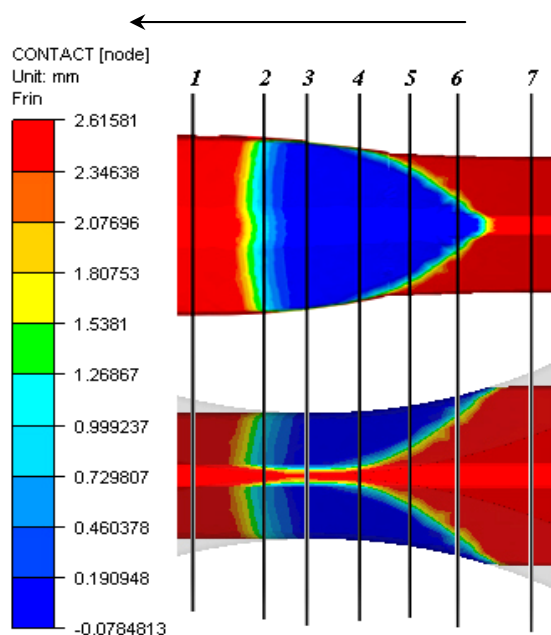
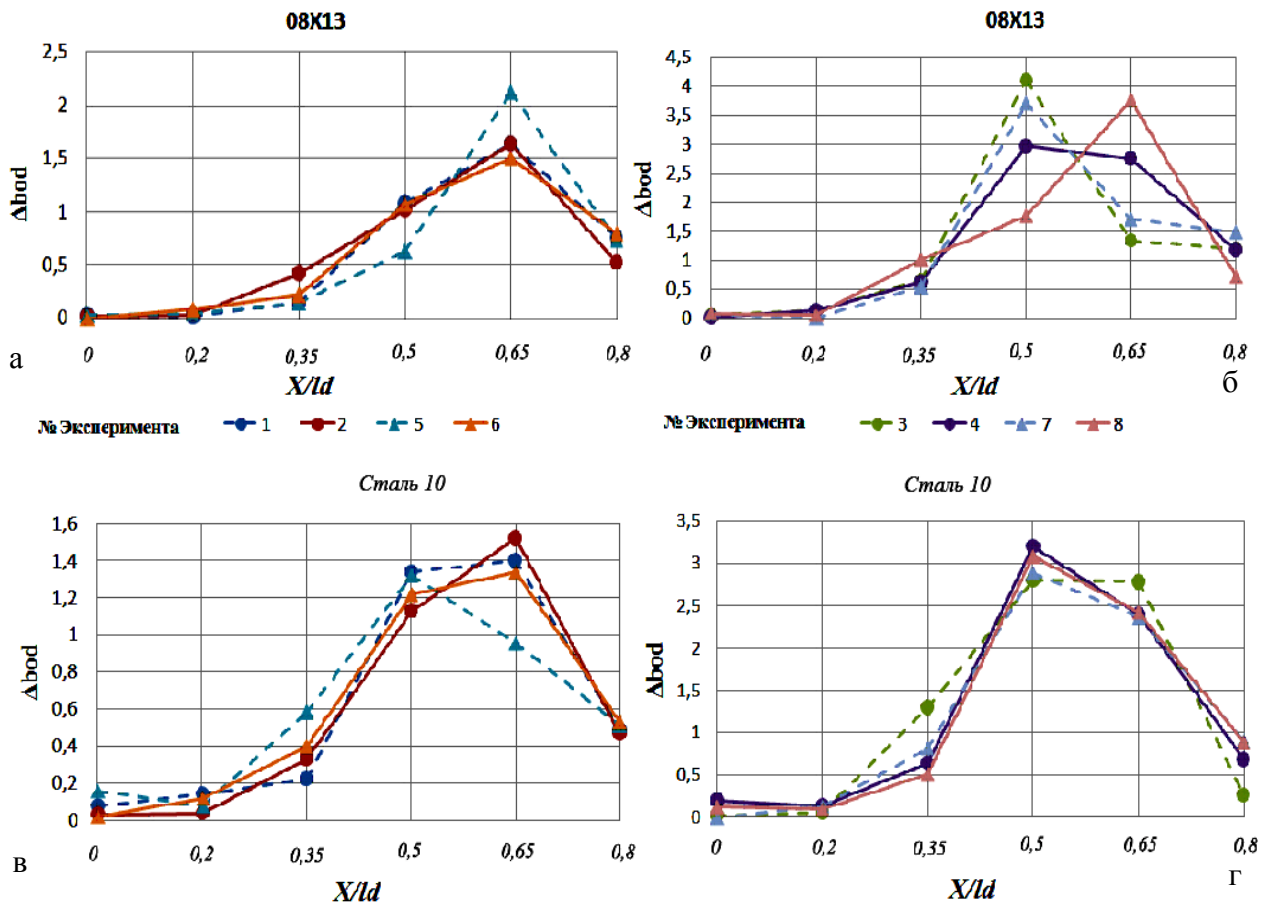
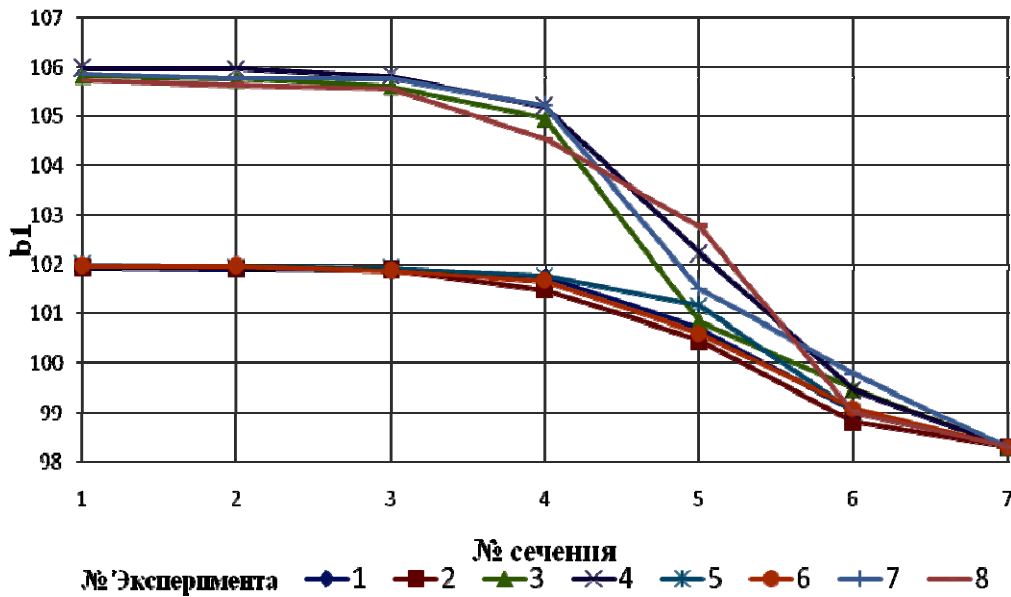


Рис. 6. Расчетная схема очага деформации при прокатке полосы в ромбическом калибре



Полученные графики показывают поведение уширения в очаге деформации для сталей: 08X13, стали 10. На графике показана зависимость ширины относительной координаты  $X/ld$ . Анализ графиков показывает, что наибольшая разность в уширении для двух марок стали наблюдается для относительной координаты равной 0,65, т. е. в начале очага деформации.

При обжатии 20 % по относительной координате, равной 0,65, наибольшую разницу в уширении относительно всех остальных имеет кривая, относящаяся к пятому опыту ( $t = 1100$  °С,  $V_g = 220$  об/мин), как для стали 10, так и для стали 08X13. А при обжатии 30 % наибольшая разница в уширении проявляется на кривой, относящейся к третьему опыту ( $t = 1100$  °С,  $V_g = 100$  об/мин). Кривые, построенные для 8, 3 и 7-го опытов стали 08X13, имеют наибольшую разницу в ширине для  $X/ld = 0,5$  и  $X/ld = 0,65$  (4 и 5 сечение). Это свидетельствует о том, что уширение получает развитие в начале очага деформации.

### ВЫВОДЫ

Анализ литературных источников показал, что явление уширения металла при прокатке специальных сталей в калибрах простой формы в полной мере не исследовано. В представленных методиках расчета уширения в калибрах не учитывается комплексное влияние таких факторов как: степень легирования металла, температура начала прокатки, скорость вращения валков, интенсивность упрочнения в процессе деформации, различный характер влияния условий трения на контактной поверхности, систем калибров и т. д.

Сравнение экспериментальных результатов при прокатке алюминиевого сплава АД00 на гладкой бочке, а также при прокатке Ст 3 в системе калибров «Квадрат-Овал», и данных, полученных путем моделирования с использованием программного обеспечения «Forge 3», показывают хорошую сходимость результатов, где максимальные отклонения лежат в пределах 6 %.

Установлено, что сталь 08X13 более склонна к уширению при влиянии таких факторов как: температура начала прокатки и степень обжатия. Наиболее явное проявление этих факторов наблюдается для таких относительных координат:  $X/ld = 0,5$  и  $X/ld = 0,65$  (4 и 5 сечение).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием : [учебное пособие для вузов] / Барков Л. А., Выдрин В. Н., Пастухов В. В., Чернышев В. Н. – Челябинск : Металлургия, 1988. – 304 с.
2. Теоретическое исследование формоизменения специальных сталей при прокатке в калибрах простой формы / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, О. А. Ремез, О. А. Ярошенко, А. А. Самсоненко // Обработка материалов давлением : тематич. сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 270–274.
2. Грудев А. П. О влиянии природы металла на уширение при прокатке / А. П. Грудев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – № 3. – С. 39–40.
3. Берковский В. С. Исследование формоизменения сталей различного химического состава при прокатке в калибрах / В. С. Берковский, С. П. Воробьев, В. В. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – № 9. – С. 45–47.
5. Оптимальное управление режимами деформации при прокатке сортовых профилей из легированных сталей / Ю. В. Инатович, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, С. П. Куделин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 7. – С. 25–27.
6. Николаев В. А. Определение уширения металла при прокатке в калибрах / В. А. Николаев // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2006. – № 5. – С. 48–52.
7. Forge 3 - a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T, Ducloux R., Wey E. // Forging and Related Technology. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.
8. Исследование калибровок валков для прокатки с большими обжатиями при угле захвата больше угла трения / А. П. Чекмарев, С. Н. Филипов, А. А. Динник, В. П. Гречко // Научные труды. Институт черной металлургии. – 1957. – С. 316–338.

Данченко В. Н. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой НМетАУ;  
Ремез О. А. – аспирант НМетАУ;  
Мроз С. – д-р техн. наук, проф. Политехника Ченстохово;  
Самсоненко А. А. – ассистент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепрпетровск;  
Политехника Ченстохово – институт моделирования и автоматизации процессов пластической обработки, г. Ченстохово, Польша.

E-mail: remez@fregat.com