

УДК 621.771.2

**Медведев В. С.
Базарова Е. В.****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА
В ЧЕРНОВЫХ ЗАКРЫТЫХ БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ**

Закрытые балочные калибры (рис. 1) применяются на сортовых станах при производстве двутавровых профилей широкого сортамента. Данные калибры располагаются в черновых клетях станов, где из прямоугольной заготовки за несколько проходов формируют подкаты двутавровой формы со стенкой и достаточно высокими фланцами. Основным недостатком этих калибров является трудность получения одинаковой высоты фланцев вследствие разного характера деформации металла в открытых и закрытых элементах калибров. Исправить асимметрию чернового двутаврового подката на последующих этапах технологического процесса в чистовых калибрах весьма затруднительно. Поэтому, для повышения точности готовых двутавровых профилей, в первую очередь необходимо обеспечить высокую точность фасонных подкатов в черновых калибрах. Для решения этой задачи разработчик технологии должен располагать надежными методами расчета формоизменения металла в калибрах.

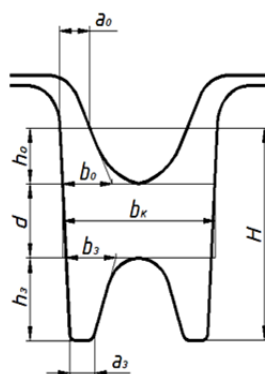


Рис. 1. Черновой закрытый балочный калибр

Однако процесс прокатки в черновых закрытых балочных калибрах изучен недостаточно полно. Исследования разрознены и носят частный характер, не установлено влияние различных технологических факторов прокатки на формоизменение металла, особенно в калибрах с отношением толщины стенки d к высоте профиля H в пределах от 0,2 до 0,4 (область не исследованных калибров). Проблема повышения точности прокатки двутавровых профилей может быть решена при условии установления физических закономерностей формоизменения металла в балочных калибрах и разработки научно-обоснованных методов проектирования калибровок валков.

В работах В. С. Медведева, В. А. Шпакова и Е. В. Базаровой [1–4] приведены результаты комплексных теоретических и экспериментальных исследований процесса прокатки в черновых закрытых балочных калибрах. С использованием метода конечных элементов и программного комплекса SIMULIA/ABAQUS выполнен анализ напряженно-деформированного состояния металла в калибрах, установлены общие закономерности пластического течения металла, определено влияние основных технологических факторов процесса прокатки (распределения обжатий по элементам профиля и геометрических параметров очага деформации) на высотную деформацию фланцев. Авторами получены количественные оценки оптимальных граничных параметров прокатки профилей и калибровок валков на начальной стадии технологического процесса. Прокатка профилей с оптимальными граничными параметрами

позволяет сформировать в черновых калибрах двутавровый раскат с максимально возможной высотой открытых и закрытых фланцев, а на последующих заключительных стадиях технологического процесса в предчистовых контрольных калибрах обеспечить надежное высотное обжатие фланцев и далее в чистовом универсальном калибре получить готовые двутавровые профили с точными размерами по ширине полок. Изменяя параметры прокатки в черновых калибрах, можно управлять высотной деформацией фланцев и регулировать ширину полок на готовом профиле, т. е. фактически прогнозировать и управлять конечным формоизменением металла для повышения точности прокатки двутавровых профилей. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально путем физического моделирования процесса прокатки на составных свинцовых образцах с координатными сетками [5].

В настоящей статье изложены результаты заключительного этапа теоретических исследований авторов.

Целью данной работы является разработка математической модели формоизменения металла в закрытых балочных калибрах с отношением толщины стенки d к высоте профиля H , равным 0,2–0,4.

Анализ действующих калибровок валков для производства двутавровых профилей показывает, что в черновых закрытых балочных калибрах происходит интенсивное увеличение высоты открытых и закрытых фланцев при уменьшении высоты полок (общей высоты профиля). Для получения двутаврового раската с максимально высокими фланцами течение металла в направлении высоты открытых и закрытых фланцев стенками калибров не ограничивают, уширение металла здесь является свободным. Точный прогноз положения свободных поверхностей металла в открытых и закрытых фланцах является основной задачей калибровщика.

Интегральными количественными характеристиками, с помощью которых можно однозначно определить положение свободных поверхностей, являются безразмерные параметры: коэффициенты высотной деформации полки $\eta_H = H/H'$, открытого фланца $\eta_{ho} = h_o/h'_o$ и закрытого $\eta_{hz} = h_z/h'_z$, а также абсолютное значение деформации высоты полок $\Delta H = H - H'$ (утяжка полок) и абсолютное приращение высоты открытых фланцев $\Delta h = h'_o - h_o$ и закрытых $\Delta h = h'_z - h_z$. Здесь h и H' – высота полки, h_o и h'_o – высота открытого фланца, h_z и h'_z – высота закрытого фланца (здесь и далее по тексту: размеры без штриха – до прокатки, со штрихом – после прокатки).

Деформация металла в направлениях, где нет ограничения стенками калибров, зависит от формы и размеров профиля (геометрических параметров очага деформации) и распределения обжатий по его элементам (прямого обжатия стенки и бокового обжатия фланцев). Это основные технологические факторы процесса прокатки, влияющие на высотную деформацию фланцев.

Деформация по толщине элементов профиля характеризуется следующими безразмерными параметрами: коэффициент обжатия стенки по толщине $\eta_d = d/d'$, коэффициенты бокового обжатия открытого фланца $\eta_{to} = t_o/t'_o$ и закрытого $\eta_{tz} = t_z/t'_z$, а также средний по всему калибру коэффициент бокового обжатия открытых и закрытых фланцев $\eta_t = 0,5(\eta_{to} + \eta_{tz})$. Здесь d и d' – толщина стенки, t_o и t'_o – средняя толщина открытого фланца, t_z и t'_z – средняя толщина закрытого фланца.

Форма двутавра характеризуется безразмерными параметрами: B/d – отношение ширины профиля B к толщине стенки d ; B/H – отношение ширины профиля B к высоте полок H .

Теоретическое исследование деформированного состояния металла проводили на модели чернового закрытого калибра для двутавра № 16, прокатываемого на крупносортом стане 650 Мариупольского металлургического комбината ЧАО «МК «Азовсталь». Модель калибра и соответствующей исходной фасонной заготовки, выполненные в масштабе 1:2,

показаны на рис. 2. Данный калибр выбран в качестве базового. Расчеты произведены для стали СтЗсп при температуре 1100 °С и скорости прокатки 1,0 м/с. Результаты теоретических расчетов высотной деформации полок η_H и фланцев η_{ho} , η_{hz} при изменении технологических факторов прокатки η_d , η_t , B/d и B/H представлены массивом первичных данных в табл. 1.

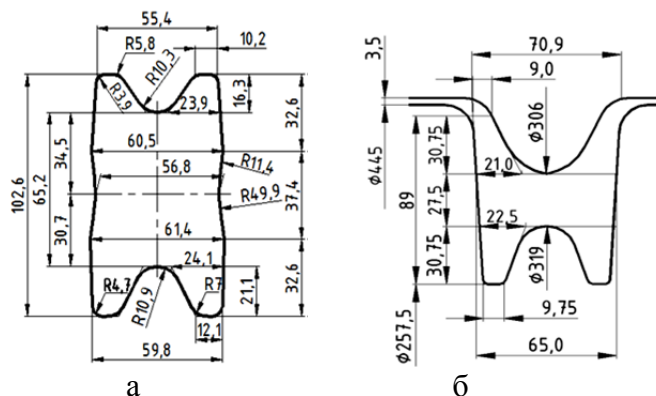


Рис. 2. Исходная заготовка (а) и черновой закрытый балочный калибр (б)

Таблица 1

Формоизменение металла при прокатке в черновых закрытых балочных калибрах

№ п/п	d , мм	B , мм	H , мм	t , мм	η_d	η_t	η_H	η_{ho}	η_{hz}	B/d	B/H
1	47,5	65,0	94,0	17,775	1,373	1,000	1,091	0,762	0,841	1,37	0,69
2	37,5	65,0	89,0	17,200	1,739	1,022	1,153	0,637	0,815	1,73	0,73
3	27,5	65,0	84,7	15,725	2,371	1,118	1,211	0,542	0,779	2,36	0,77
4	27,5	65,0	84,7	15,565	2,371	1,102	1,211	0,542	0,779	2,36	0,77
5	27,5	65,0	82,6	14,065	2,371	1,195	1,242	0,547	0,834	2,36	0,79
6	27,5	65,0	79,5	12,565	2,371	1,305	1,291	0,566	0,909	2,36	0,82
7	27,5	65,0	84,7	15,700	2,371	1,119	1,211	0,542	0,779	2,36	0,77
8	27,5	75,0	85,8	15,700	2,371	1,125	1,196	0,528	0,770	2,73	0,87
9	27,5	85,0	86,7	15,550	2,371	1,130	1,184	0,519	0,759	3,10	0,98
10	27,5	95,0	86,2	15,550	2,371	1,125	1,190	0,526	0,762	3,45	1,10
11	27,5	105,0	85,8	15,615	2,371	1,124	1,196	0,529	0,767	3,82	1,22
12	27,5	115,0	85,4	15,725	2,371	1,118	1,201	0,536	0,767	4,18	1,35
13	27,5	125,0	83,9	15,875	2,371	1,107	1,223	0,556	0,779	4,55	1,49
14	27,5	155,0	80,6	16,000	2,371	1,098	1,273	0,601	0,812	5,64	1,92
15	27,5	185,0	78,9	15,625	2,371	1,095	1,300	0,613	0,851	6,73	2,34

В результате моделирования процесса прокатки определены основные параметры формоизменения металла в черновых закрытых калибрах с отношением толщины стенки d к высоте профиля H , равным 0,2–0,4. Установлены зависимости высотной утяжки полок, приращения высоты открытых и закрытых фланцев от обжатия стенки, бокового обжатия фланцев и ширины стенки.

На рис. 3–5 приведены графики изменения коэффициентов высотной деформации полок η_H , открытых и закрытых фланцев η_{ho} и η_{hz} от технологических факторов прокатки – обжатия стенки η_d , бокового обжатия фланцев η_t и ширины стенки (отношения B/d).

Результаты моделирования обработаны классическими методами регрессионного анализа с использованием программ MathCad14 и SPSS.

В итоге получены следующие регрессионные зависимости интегральных характеристик формоизменения металла в черновых закрытых балочных калибрах, учитывающие влияние бокового обжатия фланцев, обжатия и ширины стенки на изменение высоты фланцев:

$$\eta_H = 0,3437 + 0,2671 \cdot \eta_d + 0,2117 \cdot \eta_t - 0,2365 \cdot B/d + 0,7231 \cdot B/H \quad (R = 0,99; \sigma = 0,05),$$

$$\eta_{ho} = 0,7300 - 0,1151 \cdot \eta_d + 0,0572 \cdot \eta_t - 0,1341 \cdot B/d + 0,4290 \cdot B/H \quad (R = 0,98; \sigma = 0,06),$$

$$\eta_{hs} = 0,1229 + 0,0403 \cdot \eta_d + 0,5085 \cdot \eta_t - 0,2139 \cdot B/d + 0,6476 \cdot B/H \quad (R = 0,99; \sigma = 0,04).$$

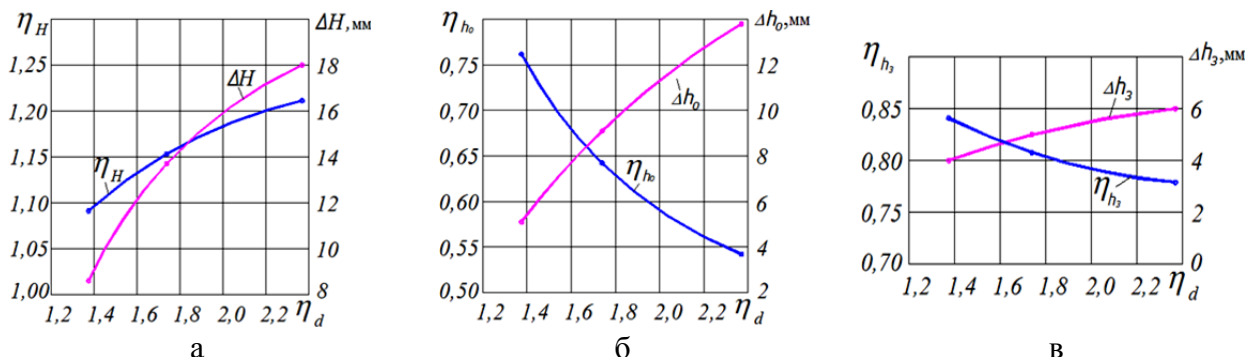


Рис. 3. Зависимость высотной деформации полок (а), открытых (б) и закрытых (в) фланцев от обжатия стенки

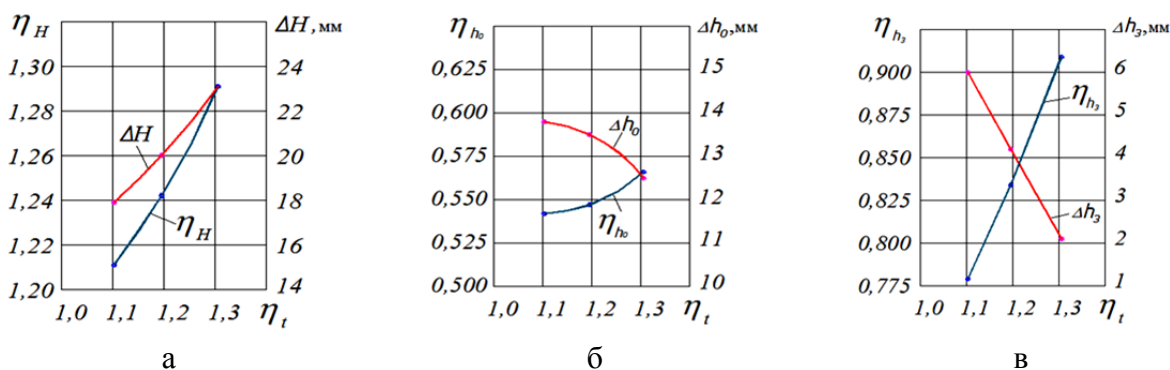


Рис. 4. Зависимость высотной деформации полок (а), открытых (б) и закрытых (в) фланцев от бокового обжатия фланцев

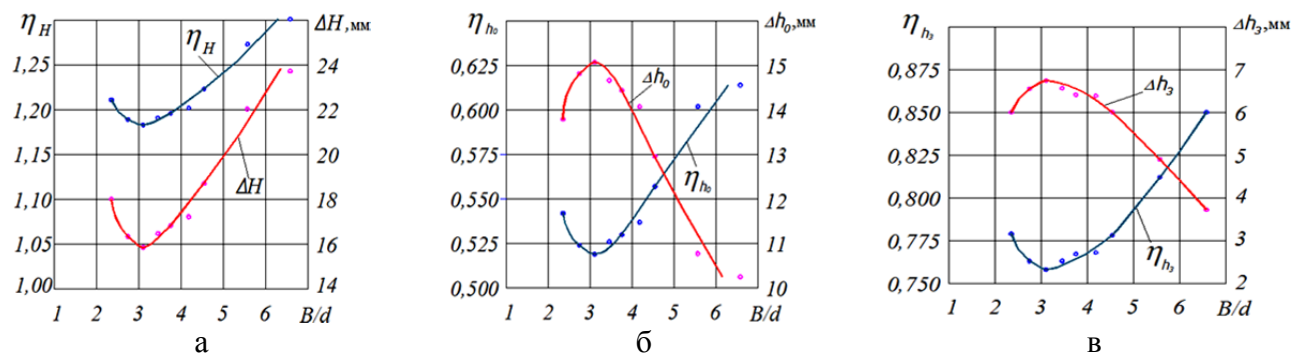


Рис. 5. Зависимость высотной деформации полок (а), открытых (б) и закрытых (в) фланцев от ширины стенки

Границы варьирования безразмерных параметров прокатки, влияющих на высотную деформацию полок и фланцев, ограничены пределами: $1,373 \leq \eta_d \leq 2,371$, $1,000 \leq \eta_t \leq 1,305$, $1,37 \leq B/d \leq 6,73$ и $0,69 \leq B/H \leq 2,34$.

Математическая модель адекватно описывает формоизменение металла в черновых закрытых балочных калибрах и ее рекомендуется использовать на практике при разработке технологии прокатки и рабочих калибровок валков для производства двутавровых профилей повышенной точности.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель расчета интегральных характеристик формоизменения металла (коэффициентов высотной деформации полки, открытого и закрытого фланцев) в зависимости от прямого обжатия стенки, бокового обжатия фланцев и геометрических параметров очага деформации. В основу математической модели положен многофакторный теоретический эксперимент в динамической постановке с варьированием безразмерных технологических параметров прокатки (коэффициента обжатия стенки по толщине, среднего коэффициента бокового обжатия по толщине открытых и закрытых фланцев и отношения ширины стенки к ее толщине) в калибрах с отношением толщины стенки к высоте профиля, равным 0,2–0,4. Полученную математическую модель рекомендуется использовать на практике при разработке рабочих калибровок двутавровых профилей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретическое исследование течения металла в закрытых балочных калибрах методом конечных элементов / В. С. Медведев, П. В. Боровик, В. А. Шпаков, Е. В. Базарова // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. Донбасской государственной машиностроительной академии.* – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 166–172.
2. Медведев В. С. Влияние обжатия стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах элементов / В. С. Медведев, Е. В. Базарова, В. А. Шпаков // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Серія: Інформаційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 43 (1086). – С. 81–88.
3. Медведев В. С. Влияние бокового обжатия фланцев на изменение их высоты в черновых закрытых балочных калибрах / В. С. Медведев, Е. В. Базарова // *Вестник НТУУ «КПИ» : сб. науч. тр. Серія: Машиностроение.* – К. : НТУУ «КПИ», 2016. – № 1 (76). – С. 81–87.
4. Медведев В. С. Влияние ширины стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах / В. С. Медведев, Е. В. Базарова, В. А. Шпаков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. Донбасской государственной машиностроительной академии.* – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 175–181.
5. Медведев В. С. Экспериментальное исследование течения металла в балочных калибрах / В. С. Медведев, В. А. Шпаков, Е. В. Базарова // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. праць СНУ ім. В. Даля.* – Луганськ, 2013. – № 1 (14). – С. 52–61.

REFERENCES

1. Teoretycheskoe yssledovanye techeniya metalla v zakrytyh balochnyh kalybrah metodom konechnykh jelementov / V. S. Medvedev, P. V. Borovyk, V. A. Shpakov, E. V. Bazarova // *Obrabotka materyalov davlenyem : sb. nauch. tr. Donbasskoj gosudarstvennoj mashynostroytel'noj akademyy.* – Kramatorsk : DGMA, 2014. – № 1 (38). – S. 166–172.
2. Medvedev V. S. Vlyjanye obzhatyja stenky na yzmenenye vysoty flancev v chernovyh zakrytyh balochnyh kalybrah jelementov / V. S. Medvedev, E. V. Bazarova, V. A. Shpakov // *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI» : zb. nauk. pr. Serija: Informacijni tehnologii' ta obladnannja obrobky materialiv u mashy-nobuduvanni ta metalurgii'.* – H. : NTU «HPI», 2014. – № 43 (1086). – S. 81–88.
3. Medvedev V. S. Vlyjanye bokovogo obzhatyja flancev na yzmenenye yh vysoty v chernovyh zakrytyh balochnyh kalybrah / V. S. Medvedev, E. V. Bazarova // *Vestnyk NTUU «KPY» : sb. nauch. tr. Seryja : Mashynostroenye.* – K. : NTUU «KPY», 2016. – № 1 (76). – S. 81–87.
4. Medvedev V. S. Vlyjanye shyryny stenky na yzmenenye vysoty flancev v chernovyh zakrytyh balochnyh kalybrah / V. S. Medvedev, E. V. Bazarova, V. A. Shpakov // *Obrabotka materyalov davlenyem : sb. nauch. tr. Donbasskoj gosudarstvennoj mashynostroytel'noj akademyy.* – Kramatorsk : DGMA, 2015. – № 1 (40). – S. 175–181.
5. Medvedev V. S. Jeksperimental'noe yssledovanye techeniya metalla v balochnyh kalybrah / V. S. Medvedev, V. A. Shpakov, E. V. Bazarova // *Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnycstva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni : zb. nauk. prac' SNU im. V. Dalja.* – Lugans'k, 2013. – № 1 (14). – S. 52–61.

Медведев В. С. – д-р техн. наук, гл. науч. сотруд. ГП УкрНТЦ «Энергосталь»;

Базарова Е. В. – ассистент ВНУ им. В. И. Даля.

ГП УкрНТЦ «Энергосталь» – Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков.

ВНУ им. В. И. Даля – Восточноукраинский национальный университет имени В. И. Даля, г. Северодонецк.

E-mail: mbc1642@ukr.net

Статья поступила в редакцию 15.02.2019 г.