

УДК 621.771.26.001.57:621.771.014-424

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ СТАНАХ

Шилов В.А., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением»

Непряхин С.О., к.т.н., ассистент кафедры «Обработка металлов давлением» (s.o.nepriakhin@urfu.ru)

Шварц Д.Л., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Наиболее экономичным способом производства стальных двутавровых профилей широкого сортамента является прокатка на современных универсальных рельсобалочных станах, снабженных непрерывно-реверсивными группами рабочих клетей с четырехвалковыми универсальными балочными калибрами. Такие станы эффективно используются в зарубежной металлургии для производства рельсов, балок и других сортовых профилей. В России два первых стана такого типа построены и в настоящее время осваиваются на ПАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ПАО «Челябинский металлургический комбинат». В работе предложена новая методика расчета калибровок валков универсальных рельсобалочных станков, основанная на результатах статистического обобщения действующих технологических режимов прокатки двутавровых профилей на универсальных балочных, рельсобалочных и сортовых станах, снабженных универсальными клетями, а также на разработанной авторами математической модели формоизменения металла при прокатке в универсальных калибрах, основанной на применении вариационного принципа минимума полной мощности. При анализе и обобщении действующих технологических режимов прокатки двутавров сформирована статистическая выборка, включающая основные характерные параметры калибровки: номер N и тип двутавра, число проходов $n_{пр}$, средние коэффициенты вытяжки в каждом проходе λ_i , суммарный (общий) коэффициент вытяжки λ_{Σ} за « n » проходов, характер распределения коэффициентов вытяжек по проходам. Общий объем выборки составил 472 точки, полученные по 55 калибровкам валков. Сформированную выборку исследовали с использованием аппарата корреляционно-регрессионного анализа. В результате получены регрессионные зависимости для расчета основных характерных параметров калибровки. С применением разработанной методики выполнен расчет калибровки валков чистовой группы тандем универсального рельсобалочного стана для прокатки двутавра 35Б2. Характерной особенностью полученного режима являются практически одинаковые коэффициенты вытяжки по шейке $\lambda_{ш}$ и фланцам $\lambda_{ф}$ при прокатке в каждом универсальном калибре. Разница значений $\lambda_{ш}$ и $\lambda_{ф}$ по проходам составляет 0,4–2,4 %, т.е. достигается равномерная деформация металла по элементам двутаврового профиля, что способствует получению высококачественного двутавра.

Ключевые слова: двутавровый профиль, прокатка, рельсобалочный стан, группа тандем, математическая модель, корреляционно-регрессионный анализ, статистическое обобщение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-187-193

Наиболее экономичным способом производства стальных двутавровых профилей широкого сортамента является прокатка на современных универсальных рельсобалочных станах, снабженных непрерывно-реверсивными группами рабочих клетей с четырехвалковыми универсальными балочными калибрами [1, 2]. Такие станы эффективно используются в зарубежной металлургии для производства рельсов, балок и других сортовых профилей. В России два первых стана такого типа построены и в настоящее время осваиваются на ПАО «ЕВРАЗ-ЗСМК» [3] и ПАО «Челябинский металлургический комбинат» [4].

Качество прокатываемых двутавровых профилей и эффективность работы универсального рельсобалочного стана в значительной мере зависят от научной обоснованности калибровки валков и режима обжатий (формоизменения) металла в процессе прокатки.

До настоящего времени при проектировании калибровок валков и технологических режимов прокатки применяются эмпирические формулы и эвристичес-

кие приемы [5, 6], а также методы соответственной полосы [7]. Не рассчитывается и не анализируется напряженно-деформированное состояние металла в элементах двутаврового профиля, отсутствуют критерии равномерности деформации металла в поперечных сечениях раската [8–10].

В данной работе предложена новая методика расчета калибровок валков универсальных рельсобалочных станков, основанная на результатах статистического обобщения действующих технологических режимов прокатки и на применении разработанной авторами математической модели формоизменения металла при прокатке в универсальных калибрах [11–14].

При анализе и обобщении действующих технологических режимов прокатки двутавров по данным работ [2, 6, 15, 16] сформирована статистическая выборка, включающая основные характерные параметры калибровки: номер N и тип двутавра, число проходов $n_{пр}$, средние коэффициенты вытяжки в каждом проходе λ_i , суммарный (общий) коэффициент вытяжки λ_{Σ}

за «n» проходов, характер распределения коэффициентов вытяжек по проходам и т. п. Общий объем выборки составил 472 точки, полученные по 55 калибровкам валков для прокатки двутавров N 20 – 60 на универсальных балочных, рельсобалочных и сортовых станах, снабженных универсальными клетями.

Сформированную выборку исследовали с использованием аппарата корреляционно-регрессионного анализа [17, 18] в электронных таблицах Microsoft Excel [19, 20]. В результате получены регрессионные зависимости для расчета основных характерных параметров калибровки.

Число проходов, необходимое для получения заданного номера профиля N, описывается уравнением

$$n_{пр} = 6,525e^{0,009N} \quad (1)$$

с коэффициентом множественной корреляции $R = 0,725$, значимость которого подтверждена по критерию Фишера.

Средний по калибровке коэффициент вытяжки $\lambda_{ср}$ имеет значимую корреляционную зависимость от номера балки N и вида двутавра (балочный Б, широкополочный Ш, колонный К), который численно выражается уравнением

$$\lambda_{ср} = B_d N^{-0,091}, \quad (2)$$

где B_d – коэффициент, учитывающий вид двутаврового профиля и принимающий численные значения в соответствии с табл. 1.

При известном числе проходов $n_{пр}$ и рассчитанном среднем коэффициенте вытяжки суммарный коэффициент вытяжки по калибровке с достаточно высокой степенью корреляции рассчитывается по формуле

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{ср}^{n_{пр}}. \quad (3)$$

Характерный вид зависимости $\lambda_{ср}$ (а) и λ_{Σ} (б) по уравнениям (2) и (3) показан на рис. 1 при $n_{пр} = const$.

Как видно, частные и суммарные коэффициенты вытяжки уменьшаются с увеличением номера двутавра, что обычно объясняют относительным увеличением доли шейки в общей площади профиля [9, 10, 15]. Увеличение ширины фланцев у широкополочных и колонных двутавров также приводит к понижению средних и суммарных коэффициентов вытяжки, что, вероятно, связано с ограничениями по мощности привода стана. При прокатке более «тяжелого» профиля требуются более высокие затраты энергии и в условиях постоянства мощности привода рабочих клетей приходится идти на уменьшение коэффициентов вытяжки.

При определении закономерностей распределения коэффициентов вытяжки по проходам рассчитывали

Таблица 1

Характеристики уравнения (2)

Table 1. Characteristics of equation (2)

Вид двутаврового профиля	Коэффициент B_d	Коэффициент парной корреляции R	Значимость уравнения	
			расчетный коэффициент Фишера F_p	табличный коэффициент Фишера F_T
Б	1,619	0,922	136,58	4,259
Ш	1,576	0,794	18,82	4,844
К	1,520	0,911	88,07	4,414

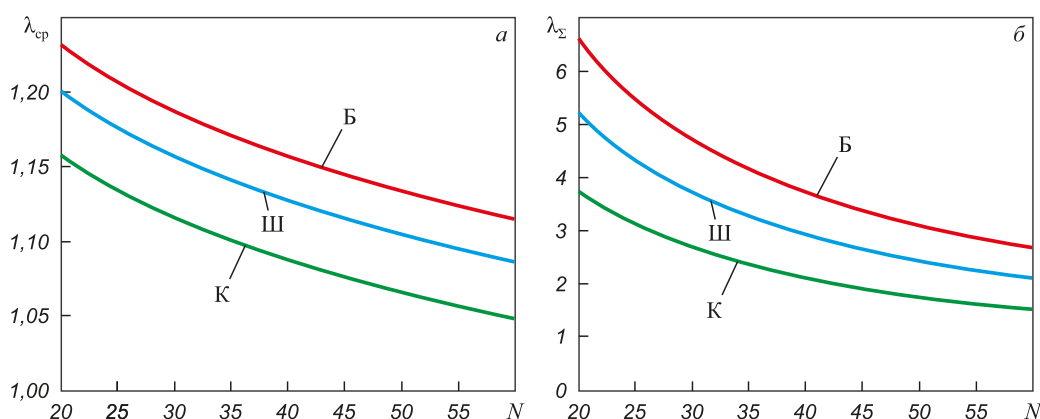


Рис. 1. Графическая зависимость $\lambda_{ср}$ и λ_{Σ} от номера балки и вида профиля

Fig. 1. Graphical dependence of $\lambda_{ср}$ and λ_{Σ} on number and type of the profile

для каждой калибровки относительную долю вытяжки металла в каждом проходе $\lambda_i - 1$ от общего количества металла, смещенного в вытяжку за всю калибровку $\lambda_\Sigma - 1$ (за $n_{\text{пр}}$ проходов), т. е. определяли отношение $\varepsilon_i = \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_\Sigma - 1}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n_{\text{пр}}$. В результате корреляционно-регрессионного анализа полученных выборок $\varepsilon_i = f(i, n_{\text{пр}}, \lambda_\Sigma)$ получены следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} &\text{— для балочных профилей} \\ \varepsilon_i &= 0,00426 - 0,00675(\lambda_\Sigma - 1) + 0,27789 \left(\frac{i}{n_{\text{пр}}} \right) - \\ &\quad - 0,2053 \left(\frac{i}{n_{\text{пр}}} \right)^2; \\ &\text{— для широкополочных профилей} \\ \varepsilon_i &= 0,00716 - 0,01105(\lambda_\Sigma - 1) + 0,28715 \left(\frac{i}{n_{\text{пр}}} \right) - \\ &\quad - 0,1987 \left(\frac{i}{n_{\text{пр}}} \right)^2; \\ &\text{— для колонных профилей} \\ \varepsilon_i &= 0,00738 - 0,01056(\lambda_\Sigma - 1) + 0,30867 \left(\frac{i}{n_{\text{пр}}} \right) - \\ &\quad - 0,2338 \left(\frac{i}{n_{\text{пр}}} \right)^2, \end{aligned} \right\} (4)$$

где i – номер прохода в универсальных клетях против хода прокатки.

Характеристика уравнений (4) приведена в табл. 2.

С учетом рассчитанных по уравнениям (4) значений ε_i распределение коэффициентов вытяжки производится по общей формуле

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i(\lambda_\Sigma - 1). \quad (5)$$

Полученные по формулам (1) – (5) параметры являются определяющими для расчета деформации

металла и размеров калибров в каждом проходе. С этой целью используется разработанная авторами [11 – 14] математическая модель процесса прокатки в универсальном балочном калибре с равномерным распределением деформации (одинаковыми коэффициентами вытяжки) по шейке и фланцам. Указанная модель позволяет при заданном (распределенном для каждого прохода) коэффициенте вытяжки λ_i рассчитать коэффициент обжатия фланцев $1/\eta_\phi$ и приращение (утяжку) высоты фланцев Δh_ϕ по формулам

$$\frac{1}{\eta_\phi} = \frac{a'}{a} = 1,0073\lambda^{1,054}, \quad \Delta \tilde{h}_\phi = \frac{\Delta h_\phi}{d} = \frac{\lambda^{4,22} A_\Gamma^{0,13} B_\phi^{1,2}}{l_{\text{ш}}^{1,43} e^{1,21+0,93 \text{tg}\phi}}, \quad (6)$$

где a' и a – начальная и конечная толщина фланцев профиля; A_Γ – приведенный диаметр горизонтального валка; B_ϕ – приведенная ширина фланцев профиля; $l_{\text{ш}}$ – приведенная длина шейки калибра; $\text{tg}\phi$ – уклон (выпуск) боковых граней горизонтального валка.

Полученный комплекс формул (1) – (6) позволяет рассчитывать калибровку валков и режим обжатий при прокатке двутавровых профилей в чистовой группе клетей типового современного универсального рельсобалочного стана (рис. 2, а). При этом расчет производят в следующем порядке:

1. По формуле (1) рассчитывают число проходов в универсальных клетях и с учетом его составляют схему калибровки (рис. 2, б).

2. Определяют средний и суммарный коэффициент вытяжки по формулам (2) – (3) с учетом данных табл. 1.

3. Используя уравнения (4) и (5), распределяют по проходам суммарный коэффициент вытяжки λ_Σ таким образом, чтобы произведение всех частных вытяжек было равно суммарному коэффициенту вытяжки $\prod_1^{n_{\text{пр}}} \lambda_i = \lambda_\Sigma$. При этом на предварительном этапе расчетов для вспомогательных клетей коэффициенты вытяжки принимают равными единице (впоследствии они уточняются в процессе расчетов).

4. Рассчитывают деформацию металла и размеры калибров, идя против направления прокатки от

Таблица 2

Статистическая характеристика уравнений (4)

Table 2. Statistical characteristic of equation (4)

Тип профиля	Коэффициент множественной корреляции r	Значимость уравнения	
		расчетный коэффициент Фишера F_p	табличный коэффициент Фишера F_T
Балочный	0,916	271,45	2,662
Широкополочный	0,884	135,23	2,685
Колонный	0,906	261,05	2,657

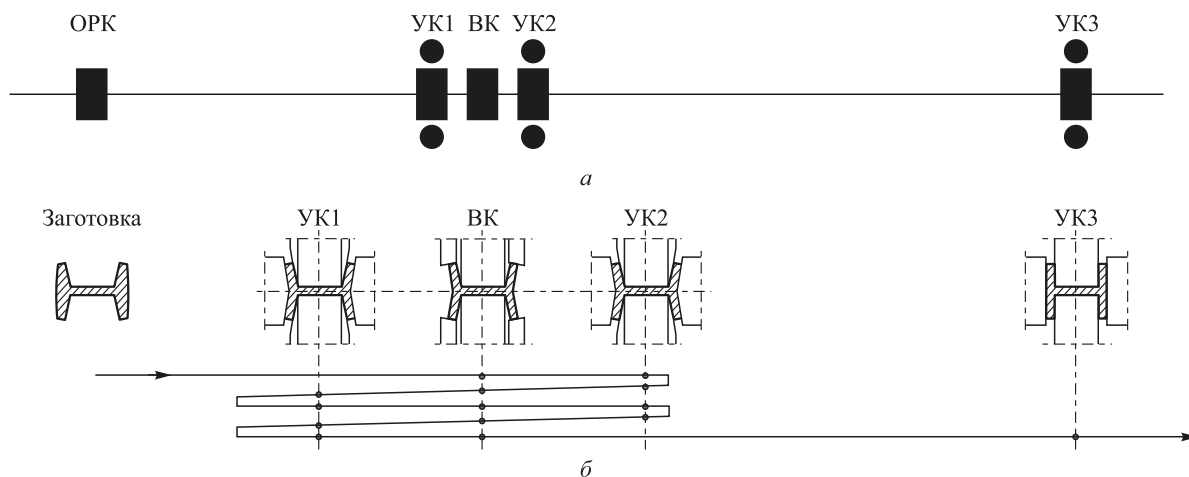


Рис. 2. Схемы расположения оборудования (а) и калибровки валков (б) при прокатке двутавровых профилей в чистовой группе клетей универсального рельсобалочного стана:

ОРК – обжимная реверсивная клеть дуо; УК1 и УК2 – универсальные реверсивные клетки группы тандем; ВК – вспомогательная горизонтальная клеть; УК3 – чистовая универсальная неревверсивная клеть. Точками обозначены проходы в универсальных и вспомогательных клетях

Fig. 2. Schemes of equipment (a) and rolls calibration (b) at H-beam rolling in finishing stands of universal rail-beam mill: ОРК – breakdown reversible stand; УК1 and УК2 – universal reversible stands of tandem group; ВК – service horizontal stand; УК3 – finishing universal irreversible stand. The dots indicate the passes in universal and service horizontal stands

чистового калибра с заданными размерами. При этом последовательность расчета зависит от вида калибра.

Для универсальных калибров расчет ведут в следующем порядке:

- принимают коэффициент обжатия шейки равным коэффициенту вытяжки $\frac{1}{\eta_{ш}} = \lambda_i$;

- рассчитывают толщину шейки в следующем проходе против хода прокатки (рис. 3): $d' = d \frac{1}{\eta_{ш}}$;

- длину шейки профиля во всех универсальных калибрах принимают постоянной $l'_{ш} = l_{ш}$, равной соответствующей длине шейки готового профиля;

- по формулам (6) рассчитывают коэффициент обжатия фланцев $1/\eta_{\phi}$ и приращение фланцев Δh_{ϕ} , а затем определяют толщину фланца в следующем

против хода прокатки калибре $a' = a \frac{1}{\eta_{\phi}}$ и высоту

фланца в следующем против хода прокатки калибре $h'_{\phi} = h_{\phi} - \Delta h_{\phi} - 0,5\Delta d \cos \varphi$;

- принимают уклон фланцев в соответствии с известными рекомендациями [6, 7, 15]: 12 – 16 % для черновых калибров и 6 – 8 % для предчистовых калибров.

Указанные расчеты позволяют определить все необходимые размеры и построить универсальные калибры (см. рис. 3).

Во вспомогательных калибрах толщину шейки и фланцев не изменяют. Обжимают только высоту фланцев, причем величина обжатия зависит от взаимного расположения вспомогательных и универсальных клетей. Если ВК установлена по ходу прокатки перед УК, то в ней обжимают фланцы на величину приращения в универсальной клетке. Если за ВК по ходу прокатки следуют две универсальные клетки, то обжатие высоты фланцев должно быть равно их суммарному приращению в обеих универсальных клетях. На практике часто применяют примерно одинаковую высоту фланцев двутаврового профиля во всех вспомогательных клетях равной высоте фланцев в предчистовом контрольном калибре.

5. В результате описанных расчетов формоизменения металла против хода прокатки $i = 1, 2, 3, \dots, n_{пр}$ получают размеры исходной двутавровой (разрезной) заготовки для непрерывно-реверсивной группы клетей.

В качестве примера использования рассмотренной методики в табл. 3 представлены результаты расчета режима деформации металла при прокатке двутавра 35Б2 в чистовой группе клетей универсального рельсо-

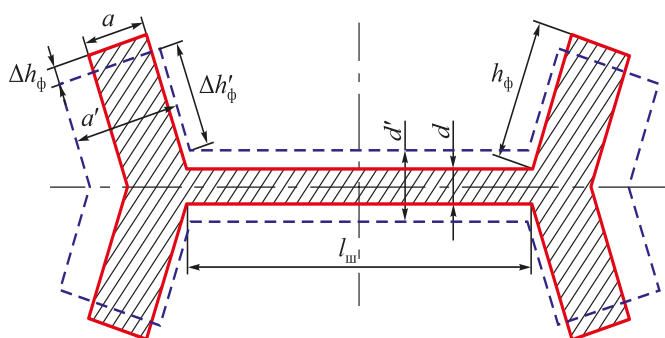


Рис. 3. Схема построения универсального балочного калибра. Пунктирными линиями показан рассчитываемый профиль, сплошными линиями – профиль с известными (рассчитанными) размерами

Fig. 3. Construction scheme of universal beam caliber: dashed lines – the calculated profile, solid lines – profile with known (calculated) sizes

Таблица 3

Расчетный режим деформации металла при прокатке двугаврового профиля № 35Б2 в непрерывно-реверсивной группе tandem универсального рельсобалочного стана (против хода прокатки)

Table 3. Calculated mode of metal deformation during rolling of 35B2 H-beam in continuously-reversing tandem group of universal rail-beam mill (reverse direction rolling)

Номер прохода в универсальном калибре n_{up}	общий N_{up}	Наименование рабочей клетки	Коэффициент обжатия шейки $1/\eta_{ш}$	Коэффициент обжатия фланцев $1/\eta_{ф}$	Толщина шейки d , мм	Толщина фланцев a , мм	Уклон фланцев $tg\phi$	Высота фланца $h_{ф'}$, мм	Приращение фланца $\Delta h_{ф'}$, мм	Коэффициент вытяжки		Общий коэффициент вытяжки λ
										шейки $\lambda_{ш}$	фланцев $\lambda_{ф}$	
1	1	УК3	1,030	1,039	6,0	8,9	0	74,2	0,15	1,030	1,032	1,031
2	2	ВК	–	–	6,2	9,2	0,08	74,0	–	1,000	1,003	1,002
2	3	УК1	1,103	1,117	6,2	9,2	0,08	74,2	0,20	1,103	1,112	1,109
3	4	УК1	1,160	1,178	6,8	10,3	0,08	73,7	0,28	1,160	1,172	1,166
4	5	ВК	–	–	7,9	12,2	0,16	72,9	–	1,000	1,018	1,010
4	6	УК2	1,201	1,222	7,9	12,2	0,16	74,2	0,38	1,201	1,213	1,207
5	7	УК2	1,226	1,249	9,5	14,8	0,16	73,0	0,48	1,226	1,227	1,227
6	8	ВК	–	–	11,7	18,6	0,08	71,6	–	1,000	1,034	1,020
6	9	УК1	1,236	1,259	11,7	18,6	0,08	74,2	0,58	1,236	1,242	1,239
7	10	УК1	1,229	1,252	14,4	23,4	0,08	72,3	0,68	1,229	1,232	1,231
8	11	ВК	–	–	17,7	29,2	0,16	69,9	–	1,000	1,057	1,034
8	12	УК2	1,207	1,228	17,7	29,2	0,16	74,2	0,79	1,207	1,206	1,206
9	13	УК2	1,169	1,187	21,4	35,9	0,16	71,6	0,79	1,169	1,167	1,168
14	14	ВК	–	–	25,0	42,7	0,16	69,1	–	1,000	1,025	1,015
		Заготовка	–	–	25	42,7	0,16	71,0	–	–	–	–

балочного стана (см. рис. 2). Как видно, характерной особенностью полученного режима являются практически одинаковые коэффициенты вытяжки по шейке $\lambda_{ш}$ и фланцам $\lambda_{ф}$ при прокатке в каждом универсальном калибре: разница значений $\lambda_{ш}$ и $\lambda_{ф}$ по проходам составляет 0,4 – 2,4 %, т. е. достигается равномерная деформация металла по элементам двутаврового профиля, что способствует получению высококачественного двутавра.

Выводы. Статистическое обобщение калибровок двутавровых профилей и использование математической модели процесса прокатки в универсальном балочном калибре позволило разработать новую методику расчета формоизменения металла при прокатке двутавровых профилей на современном универсальном рельсобалочном стане.

Предлагаемая методика обеспечивает получение равномерного распределения деформации металла по элементам двутаврового профиля и тем самым способствует повышению качества стального двутавра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев Б.Н. Современные рельсoproкатные станы // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2006. № 2. С. 40 – 43.
2. Кольбмюллер В. Непрерывно–реверсивная (тандемная) прокатка балок и профилей // Черные металлы. 1982. № 10. С. 23 – 29.
3. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В. и др. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 6. С. 32 – 38.
4. Огородников С.И., Попов А.Е., Загуменнов О.В. Освоение производства фасонного проката на универсальном рельсобалочном стане // Сталь. 2013. № 11. С. 46 – 47.
5. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства: Учебник для вузов. – М.: Арт-Бизнес-Центр; Металлургия, 1994. – 650 с.
6. Полухин П.И. Прокатка и калибровка двутавровых балок. – М.: Металлургиздат, 1956. – 314 с.
7. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инарович Ю.В. Калибровка прокатных валков. – М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
8. Zhang W., Zhu C., Widera G.E.O. On the use of upper-bound method for load determination in H-beam rolling // Journal of Material processing technology. 1996. No. 56. P. 820 – 833.
9. Jin X.G. etc. A three-dimensional analysis of universal beam tandem rolling process. Part I: Deformation analysis // Journal of Material processing technology. 2000. No. 102. P. 59 – 64.
10. Jin X.G. etc. A three-dimensional analysis of universal beam tandem rolling process. Part II: Stress analysis // Journal of Material processing technology. 2000. No. 102. P. 65 – 69.
11. Непряхин С.О., Шилов В.А., Шварц Д.Л. Новый метод расчета формоизменения металла и энергосиловых параметров при прокатке в универсальном балочном калибре // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 67 – 68.
12. Непряхин С.О., Шилов В.А., Шварц Д.Л. Исследование процесса прокатки двутавровых профилей в универсальном калибре с применением вариационного принципа минимума полной мощности // Сталь. 2014. № 6. С. 54 – 58.
13. Nepryakhin S.O., Shilov V.A., Shvarts D.L. Metal flow and forces when rolling I beams in universal grooves // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 11. P. 842–846.
14. Shvarts D.L., Nepryakhin S.O., Shilov V.A. New variational solutions for the rolling of flanged sections in universal roll passes // Metallurgist. 2017. Vol. 60. No. 3. P. 1256 – 1261.
15. Грицуц Н.Ф., Антонов С.П. Производство широкополочных двутавров. – М.: Металлургия, 1973. – 304 с.
16. Митрофанов А.А., Смирнов В.К. Анализ производства двутавровых профилей на универсальном балочном стане // Металлург. 2005. № 5. С. 59 – 61.
17. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
18. Харченко Л.П., Ионин В.Г., Глинский В.В. и др. Статистика: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 445 с.
19. Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Решение инженерных задач в Excel: Учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 365 с.
20. Кошелев В.Е. Excel 2007. Эффективное использование. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 544 с.

Поступила 12 мая 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 3, PP. 187–193.

STATISTICAL ANALYSIS AND CALCULATION OF METAL FORMING DURING ROLLING OF H-BEAM PROFILES ON THE UNIVERSAL RAIL-BEAM MILL

V.A. Shilov, S.O. Nepryakhin, D.L. Shvarts

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The most economical way of producing steel H-beam profiles of wide assortment is the rolling on modern universal rail-beam mills equipped with continuous and reversible groups of stands with four-roll universal beam calibers. They are effectively used in the foreign metallurgy for the production of rails and beams. In Russia, the first two such mills are constructed and are currently being developed at the EVRAZ ZSMK (Novokuznetsk) and in the Chelyabinsk metallurgical plant. The proposed new method of calculating the roll pass design for universal rail-beam mills is based on the results of the statistical generalization of existing technological rolling modes of H-beam profiles on the universal beam, rail-beam and section mills equipped with universal stands, as well as on authors' mathematical model of metal forming

by rolling in universal calibers based on variational principle of minimum total power. At the analysis and generalization of existing technological rolling modes of H-beam profiles a statistical sample was formed that includes the main characteristic parameters of calibration: number (N) and H-beam profile type, the number of passes (n), average reduction ratio in each pass (λ_n), the total (common) reduction ratio (λ_{Σ}) for “ n ” passes and distribution reductions ratio at the passes. The total volume of the sample amounted to 472 points, received at 55 rolls calibrations. Generated sample was investigated using correlation and regression analysis. As a result, regression dependences were obtained for calculation of basic characteristic parameters of calibration. With the application of the developed method roll pass design have been calculated for the finishing rail tandem of universal rail-beam mill for rolling 35B2H-beam. Characteristic features of the obtained mode are almost the same reduction ratio of the neck $\lambda_{ш}$ and flanges $\lambda_{ф}$ during rolling in every universal caliber and the difference of values $\lambda_{ш}$ and $\lambda_{ф}$ in passes are 0.4 – 2.4 %, i.e. uniform deformation of the metal is

achieved along the profile elements, which contributes to a high quality H-beam.

Keywords: H-beam profile, rolling, rail-beam mill, tandem group, mathematical model, correlation and regression analysis, statistical generalization.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-3-187-193

REFERENCES

1. Matveev B.N. Modern rail rolling mills. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2006, no. 2, pp. 40–43. (In Russ.).
2. Kol'bmyuller V. Continuously-reversible (tandem) rolling of beams and profiles. *Chermye metally*. 1982, no. 10, pp. 23–29. (In Russ.).
3. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning the universal rail-beam mill and mastering the technology for manufacturing the rails in the modern equipment of the rail-beam shop at the EVRAZ ZSMK. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 6, pp. 32–38. (In Russ.).
4. Ogorodnikov S.I., Popov A.E., Zagumenov O.V. Mastering the manufacture of rolled shape steel-rolled stock in the universal rail-beam rolling mill. *Stal'*. 2013, no. 11, pp. 46–47. (In Russ.).
5. Grudev A.P., Mashkin L.F., Khanin M.I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva. Uchebnik dlya vuzov* [Technology of rolling production]. Moscow: Art-Biznes-Tsentr; Metallurgiya, 1994, 650 p. (In Russ.).
6. Polukhin P.I. *Prokatka i kalibrovka dvutavrovyykh balok* [Rolling and calibration of H-beams]. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 314 p. (In Russ.).
7. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Calibration of rolling rolls]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 490 p. (In Russ.).
8. Zhang W., Zhu C., Widera G.E.O. On the use of upper-bound method for load determination in H-beam rolling. *Journal of Material processing technology*. 1996, no. 56, pp. 820–833.
9. Jin X.G. etc. A three-dimensional analysis of universal beam tandem rolling process. Part I: Deformation analysis. *Journal of Material processing technology*. 2000, no. 102, pp. 59–64.
10. Jin X.G. etc. A three-dimensional analysis of universal beam tandem rolling process. Part II: Stress analysis. *Journal of Material processing technology*. 2000, no. 102, pp. 65–69.
11. Nepryakhin S.O., Shilov V.A., Shvarts D.L. New method of metal forming and power-energy parameters calculation under rolling in universal beam groove. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 5, pp. 67–68. (In Russ.).
12. Nepryakhin S.O., Shilov V.A., Shvarts D.L. Investigation of rolling process of H-beam profiles in a universal caliber using variation principle of the total power minimum. *Stal'*. 2014, no. 6, pp. 54–58. (In Russ.).
13. Nepryakhin S.O., Shilov V.A., Shvarts D.L. Metal flow and forces when rolling I beams in universal grooves. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 11, pp. 842–846.
14. Shvarts D.L., Nepryakhin S.O., Shilov V.A. New variational solutions for the rolling of flanged sections in universal roll passes. *Mettallurgist*. 2017, vol. 60, no. 3, pp. 1256–1261.
15. Gritsuk N.F., Antonov S.P. *Proizvodstvo shirokopolochnykh dvutavrov* [Production of wide-strip H-beams]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 304 p. (In Russ.).
16. Mitrofanov A.A., Smirnov V.K. Analysis of H-beam production at universal beam mill. *Metallurg*. 2005, no. 5, pp. 59–61. (In Russ.).
17. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p. (In Russ.).
18. Kharchenko L.P., Ionin V.G., Glinskii V.V. etc. *Statistika: uchebnik* [Statistics: Textbook]. Moscow: INFRA-M, 2008, 445 p. (In Russ.).
19. Shishkin A.S., Shishkin S.F. *Reshenie inzhenernykh zadach v Excel: uchebnoe posobie* [Solution of engineering tasks in Excel]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, 365 p. (In Russ.).
20. Koshelev V.E. *Excel 2007. Effektivnoe ispol'zovanie* [Excel 2007. Effective use]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2008, 544 p. (In Russ.).

Information about the authors:

V.A. Shilov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming"
S.O. Nepryakhin, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Chair "Metal Forming" (s.o.nepriakhin@urfu.ru)
D.L. Shvarts, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming"

Received May 12, 2016