

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА И СИЛЫ ПРИ ШТАМПОВКЕ КОЛЕСНЫХ ЗАГОТОВОК

А.В.Яковченко, С.А. Снитко (ДонНТУ, г. Донецк), А.С. Волков (ОАО «КМЗ», г. Кулебаки), Собхи Хасан, Н.И. Ивлева (ДонНТУ, г. Донецк)

На основе метода планируемого эксперимента получены новые зависимости для оценки в процессе разработки калибровок степени выполнения обода и ступицы и силы при штамповке колесных заготовок.

Одной из наиболее сложных задач при освоении производства новых профилируемых железнодорожных колес является разработка калибровок инструмента деформации по всем прессам и колесопрокатному стану. Вместе с тем, разработка калибровок для формовочного пресса занимает особое место, как по сложности решаемых задач, так и по их значительному влиянию на качество колес [1]. На данном прессе получают отформованную колесную заготовку с окончательными размерами ступицы и прилегающей к ней части диска и подготовленными для последующей прокатки на колесопрокатном стане ободом и прилегающей к нему частью диска. В процессе разработки калибровки необходимо знать, каким образом задаваемая в штампы формовочного пресса, предварительно подготовленная фасонная заготовка, будет его заполнять и в соответствии с этим вносить в нее требуемые корректировки. Кроме того, переполнение металлом части штампа, формирующего ступицу, существенно увеличивает требуемую силу штамповки до величин, значительно превышающих допустимые. Это связано с необходимостью выполнения энергоемкой операции по перемещению металла из зоны ступицы в обод.

При разработке калибровки на базе комплекса компьютерных программ [2, 3] оперативно выполняется ряд перерасчетов по корректировке формы и размеров, как формовочных штампов, так и задаваемой в него заготовки. И если при этом по каждой корректировке анализ степени заполнения ступицы и обода будет длиться несколько минут (не говоря уже о десятках минут), то время работы калибровщиков будет существенно увеличено. Поэтому такие расчеты должны выполняться в режиме реального времени, то есть практически мгновенно. В технической литературе необходимые для этого зависимости отсутствуют.

Анализ известных формул [4] для расчета силы штамповки колесных заготовок показал, что они, во-первых, практически не учитывают форму и размеры формовочных штампов и деформируемой в нем заготовки, и, во-

вторых, если по ним, например, определено, что сила штамповки будет больше допустимой, то неясно по причине переполнения металлом части штампа, формирующего обод или ступицу. А это важно знать для дальнейших корректировок калибровки, связанных с ее доводкой. Поэтому целью настоящей работы является получение зависимостей для выполнения оперативной оценки в процессе разработки калибровок степени заполнения металлом обода и ступицы, а также силы при штамповке колесных заготовок.

Разработка новых зависимостей была осуществлена на основе метода планируемого эксперимента [5]. Он спланирован по плану второго порядка. Применено центральное композиционное ортогональное планирование.

Исследованы две технологии: существующая (см. рис. 1а) на ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (Украина) и ОАО «Выксунский металлургический завод» (Россия) и новая, предусматривающая деформацию в формовочном штампе заготовки с частично выполненным ободом и ступицей (см. рис. 1б). Причем, в этом случае выполнялась штамповка колесной заготовки с гребнем.

Для колес типа $\varnothing 957$ мм планируемый эксперимент как по существующей, так и по новой технологии выполнен в зависимости от 2-х факторов:

ров: $\frac{S}{H_0}$ и $\frac{h_T}{h_d}$ (см. рис.1). Пределы изменения факторов и планы экспериментов представлены в табл. 1 и 2.

Реализация опытов была выполнена на ОАО «Кулебакский металлургический завод» (КМЗ) по программе QFORM 2D [6, 7] в ходе выполнения совместной работы по анализу концепции реконструкции прессы прокатной линии «Баннинг», которая предусматривала предложение мероприятий по расширению технологических возможностей данной линии и анализ загрузки нового трехпозиционного прессы силой 60 МН, в том числе при штамповке колесных заготовок по существующей и новой технологиям (см. рис. 1).

Расчеты выполнялись для условий, которые имеют место при штамповке колесных заготовок в условиях промышленного производства. Это относится к следующим величинам: температура металла, коэффициент трения, сопротивление металла деформации и технологический зазор δ (см. рис. 1а) между заготовкой и формовочным кольцом. Результаты расчетов по определению формоизменения показаны на рис. 2, а данные по силам штамповки представлены в табл. 1 и 2.

Расчеты масс и площадей элементов колесных заготовок, необходимые для вывода формул, выполнены по программе YI ROUGH RAILWAY WHEELS [2]. В соответствующих окнах программы восстанавливались те-

кущие и конечные контуры деформируемой заготовки. Результаты расчетов даны в табл. 1 и 2.

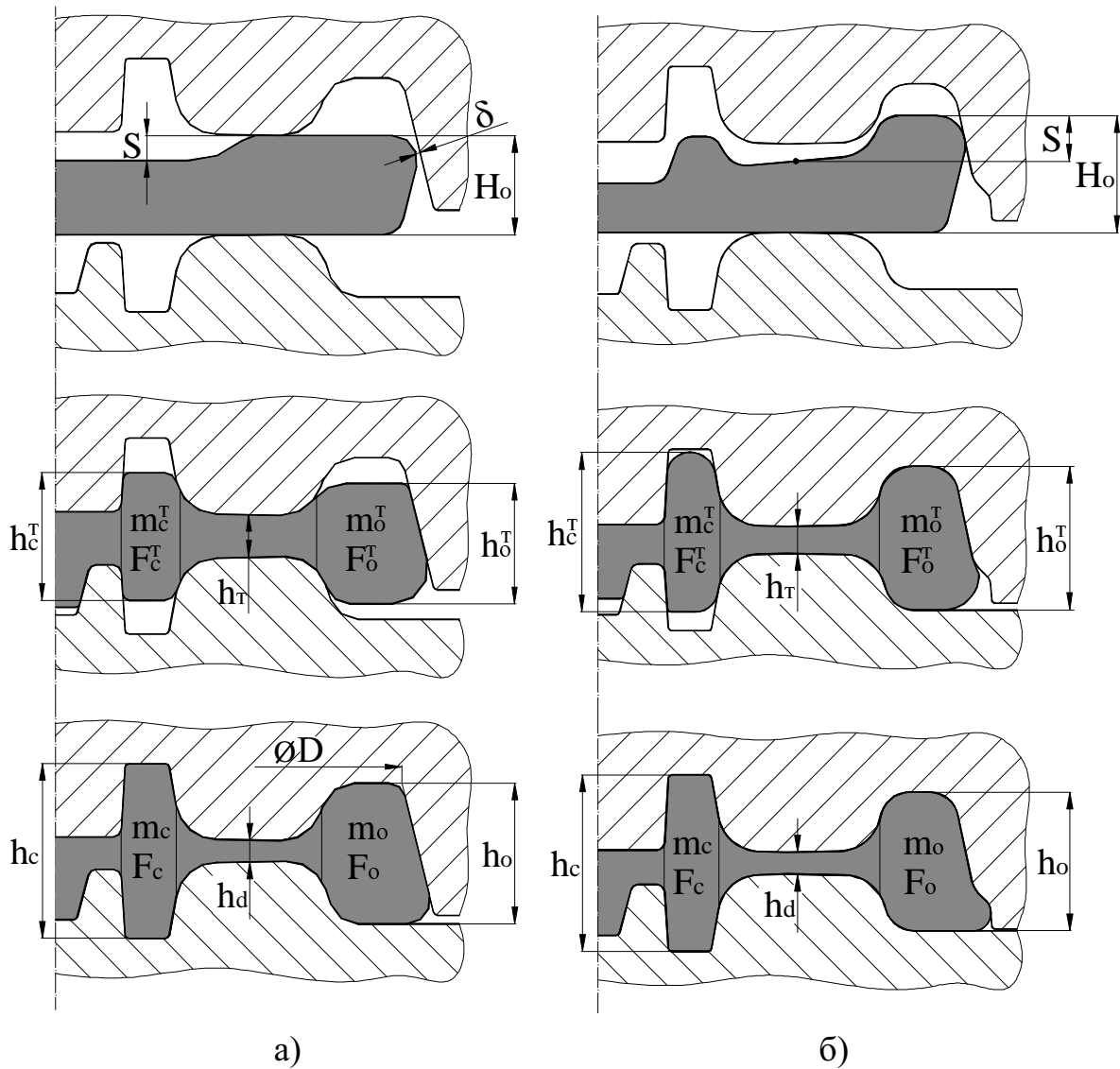


Рисунок 1 – Формовочные штампы и деформируемая в них заготовка:

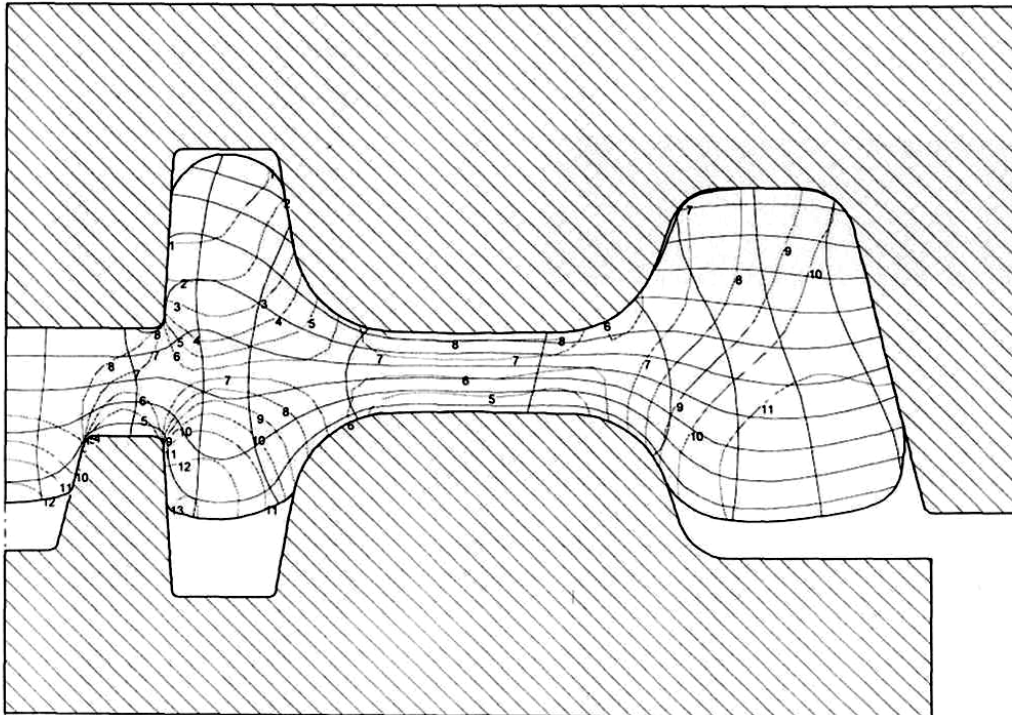
а – по существующей технологии; б – по новой технологии; m_o – масса обода колесной заготовки; m_o^T – масса обода в текущем (промежуточном) сечении; m_c, m_c^T – соответствующие массы ступиц; $F_{o,c}$ – площади соответствующих элементов колесной заготовки.

Таблица 1 – Центральное композиционное ортогональное планирование (для существующей технологии)

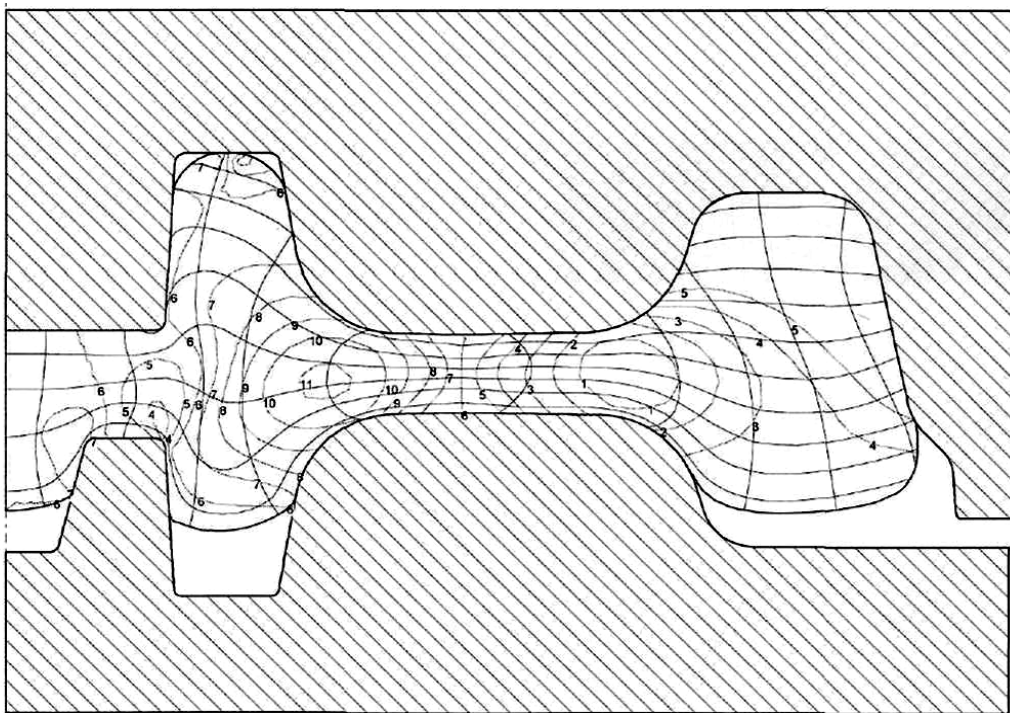
Опыт	Факторы				Параметры y_i											
	X1	X2	$\frac{S}{H_0}$	$\frac{h_T}{h_d}$	по заполнению обода				по заполнению ступицы				по силе штамповки			
	$\begin{pmatrix} S \\ H_0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} h_T \\ h_d \end{pmatrix}$			$\frac{m_o^T}{m_o}$	$\frac{F_o^T}{F_o}$	$\frac{h_o^T}{h_o}$	$\frac{m_c^T}{m_c}$	$\frac{F_c^T}{F_c}$	$\frac{h_c^T}{h_c}$	P , МН	F , м ²	k			
Ядро плана	-1	-1	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	115,6	0,6385	2,88			
	+1	-1	0,4	1,0	1,011	1,010	1,0	0,952	0,950	0,939	101,2	0,5523	2,92			
	-1	+1	0,1	2,0	0,899	0,906	0,840	0,942	0,931	0,879	51,7	0,3162	2,60			
	+1	+1	0,4	2,0	0,953	0,961	0,900	0,660	0,637	0,544	49,3	0,3067	2,56			
Звездные точки	-1	0	0,1	1,5	0,932	0,935	0,892	1,048	1,048	1,050	59,5	0,3395	2,79			
	+1	0	0,4	1,5	0,983	0,984	0,969	0,778	0,767	0,711	58,0	0,3287	2,81			
	0	-1	0,25	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	99,8	0,6385	2,49			
Нулевая точка	0	+1	0,25	2,0	0,920	0,927	0,857	0,822	0,806	0,731	40,3	0,3160	2,03			
	0	0	0,25	1,5	0,955	0,955	0,938	0,916	0,911	0,887	44,1	0,3347	2,10			

Таблица 2 – Центральное композиционное ортогональное планирование (для новой технологии)

Опыт	Факторы				Параметры u_i											
	X1	X2	$\frac{S}{H_0}$	$\frac{h_T}{h_d}$	по заполнению обода				по заполнению ступицы				по силе штамповки			
	$\begin{pmatrix} S \\ H_0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} h_T \\ h_d \end{pmatrix}$			$\frac{m_o^T}{m_o}$	$\frac{F_o^T}{F_o}$	$\frac{h_o^T}{h_o}$	$\frac{m_c^T}{m_c}$	$\frac{F_c^T}{F_c}$	$\frac{h_c^T}{h_c}$	P , МН	F , м ²	k			
Ядро плана	-1	-1	0,35	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,999	1,0	116,5	0,6864	2,71			
	+1	-1	0,45	1,0	1,005	1,004	1,0	0,990	0,991	1,0	104,4	0,6765	2,46			
	-1	+1	0,35	1,2	0,969	0,975	1,028	1,019	1,017	1,022	54,1	0,5087	1,69			
	+1	+1	0,45	1,2	0,985	0,992	1,037	0,908	0,905	0,904	56,5	0,5178	1,74			
Звездные точки	-1	0	0,35	1,1	0,985	0,989	1,014	1,012	1,012	1,011	102,5	0,5818	2,81			
	+1	0	0,45	1,1	0,999	1,002	1,018	0,933	0,932	0,954	78,6	0,6300	1,99			
	0	-1	0,40	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	92,6	0,6864	2,15			
Нулевая точка	0	+1	0,40	1,2	0,976	0,983	1,032	0,963	0,960	0,969	40,6	0,5027	1,29			
	0	0	0,40	1,1	0,984	0,989	1,016	1,011	1,009	1,012	62,1	0,6326	1,56			



а)



б)

Рисунок 2 – Исследование течения металла при заполнении обода и ступицы колесной заготовки:

а – при штамповке колесной заготовки по существующей технологии; б – при штамповке колесной заготовки с гребнем по новой технологии.

Формулы для расчета параметров, определяющих формоизменение металла и силу штамповки, были найдены в следующем виде

$$y_i = a_0 + a_1 \left(\frac{S}{H_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{h_T}{h_d} \right)^2 + a_3 \left(\frac{S}{H_0} \right) + a_4 \left(\frac{h_T}{h_d} \right) + a_5 \left(\frac{S}{H_0} \frac{h_T}{h_d} \right). \quad (1)$$

Результаты расчета констант a_i , входящих в формулу (1), даны в табл. 3 и 4.

Таблица 3 – Коэффициенты a_i , входящие в формулы для расчета параметров y_i при штамповке колесной заготовки по существующей технологии

$a_i \backslash y_i$	$\frac{m_0^T}{m_0}$	$\frac{m_c^T}{m_c}$	P	k
a_0	1,17205	0,856389	387,1889	4,299259
a_1	0,207407	-0,711111	495,5556	24,59259
a_2	0,028667	-0,072000	89,80000	0,053333
a_3	-0,18981	0,858889	-328,111	-11,8741
a_4	-0,20150	0,235000	-337,833	-0,460000
a_5	0,143333	-0,78000	40,0000	-0,266667

Таблица 4 – Коэффициенты a_i , входящие в формулы для расчета параметров y_i при штамповке колесной заготовки по новой технологии

$a_i \backslash y_i$	$\frac{m_0^T}{m_0}$	$\frac{m_c^T}{m_c}$	P	k
a_0	1,544778	-2,33978	1592,578	37,02222
a_1	1,533333	-5,73333	8133,333	226,6667
a_2	-0,016667	-0,533333	-361,667	-11,3333
a_3	-1,71500	9,475000	-7416,17	-201,233
a_4	-0,308333	3,02667	235,167	14,60000
a_5	0,550000	-5,05000	725,0000	15,00000

Сила штамповки при корректировке калибровок может быть также определена по формуле

$$P = k \sigma F, \quad (2)$$

где σ – сопротивление металла горячей пластической деформации, МН/м²;

k – коэффициент напряженного состояния;

F – усредненная по верхнему и нижнему штампам площадь проекции поверхности контакта (м²).

На основе методики [8] для условий штамповки колесных заготовок в формовочных штампах получена формула расчета σ для колесной марки стали ($C=0,67\%$; $Mn=0,60\%$; $Si=0,15\%$).

$$\sigma = 75,292 \left(\frac{V}{H_0} \right)^{0,152} \left(10 \frac{H_0 - h_d}{H_0} \right)^{0,195} \left(\frac{\Theta}{1000} \right)^{-3,059}, \quad (3)$$

где V – скорость опускания верхнего штампа, м/с;

H_0 – высота заготовки (см. рис.1а), м;

h_d – толщина диска, м;

Θ – средняя температура металла в очаге деформации, °С.

Например, при $H_0=0,1185$ м; $h_d=0,025$ м; $\Theta=1170$ °С и $V=0,06$ м/с сопротивление деформации $\sigma=62,78$ МН/м².

Выполнена проверка адекватности полученных формул. На рис. 3 даны кривые, построенные как по экспериментальным данным, так и расчетным по формуле (2). Результаты, представленные на рис. 3, относятся к существующей технологии штамповки колесных заготовок (см. рис. 1а). Сопоставительный анализ показал, что отклонение расчетных значений от экспериментальных составляют 12 ... 17 %.

Также были разработаны аналогичные зависимости и для более широкого круга колесных заготовок. В частности, для тех, которые имеют отличающиеся отношения массы обода (m_0) к массе ступицы (m_c) по сравнению с рассмотренными выше колесными заготовками, а также отличающиеся отношения толщины диска h_d к высоте заготовки H_0 . Параметры (y_i) в этом случае уже зависят от четырех факторов и имеют следующие пределы изменения:

$$0 \leq \frac{S}{H_0} \leq 0,5; \quad 0,17 \leq \frac{h_d}{H_0} \leq 0,25; \quad 3,4 \leq \frac{m_0}{m_c} \leq 6,2; \quad 1 \leq \frac{h_T}{h_d} \leq 1,5.$$

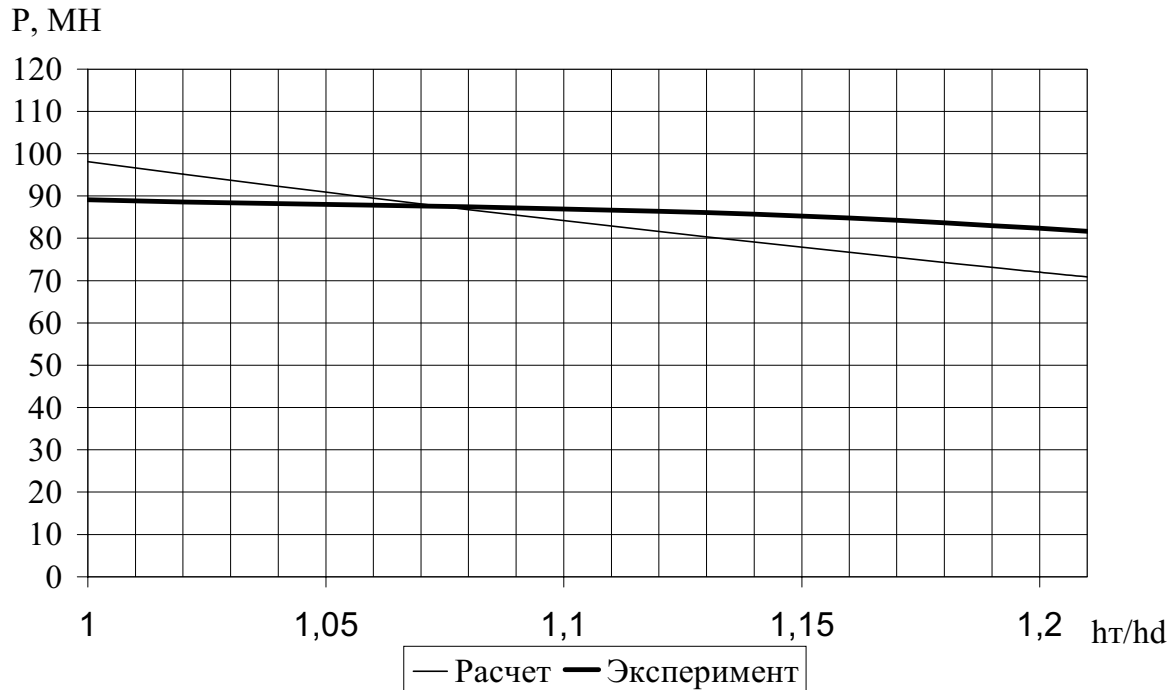


Рисунок 3 – Графики сил на заключительном этапе штамповки колесной заготовки.

Формула для расчета силы штамповки получена в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 P = & a_0 + a_1 \left(\frac{S}{H_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{h_d}{H_0} \right)^2 + a_3 \left(\frac{m_o}{m_c} \right)^2 + a_4 \left(\frac{h_T}{h_d} \right)^2 + a_5 \left(\frac{S}{H_0} \right) + \\
 & + a_6 \left(\frac{h_d}{H_0} \right) + a_7 \left(\frac{m_o}{m_c} \right) + a_8 \left(\frac{h_T}{h_d} \right) + a_9 \left(\frac{S}{H_0} \frac{h_d}{H_0} \right) + a_{10} \left(\frac{S}{H_0} \frac{m_o}{m_c} \right) + \\
 & + a_{11} \left(\frac{S}{H_0} \frac{h_T}{h_d} \right) + a_{12} \left(\frac{h_d}{H_0} \frac{m_o}{m_c} \right) + a_{13} \left(\frac{h_d}{H_0} \frac{h_T}{h_d} \right) + a_{14} \left(\frac{m_o}{m_c} \frac{h_T}{h_d} \right) + \\
 & + a_{15} \left(\frac{S}{H_0} \frac{h_d}{H_0} \frac{m_o}{m_c} \right) + a_{16} \left(\frac{S}{H_0} \frac{m_o}{m_c} \frac{h_T}{h_d} \right) + a_{17} \left(\frac{h_d}{H_0} \frac{m_o}{m_c} \frac{h_T}{h_d} \right) + \\
 & + a_{18} \left(\frac{S}{H_0} \frac{h_d}{H_0} \frac{m_o}{m_c} \frac{h_T}{h_d} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Величины констант a_i , входящих в формулу (4), даны в табл. 5.

Таблица 5 – Константы a_i уравнения (4)

a_0	a_1	a_2	a_3
942,3259	244,1630	-632,450	5,893371
a_4	a_5	a_6	a_7
20,06437	-537,323	-1000,37	-157,817
a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
-654,649	200,325	8,6840	394,0593
a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
188,1510	1041,348	91,90556	123,6894
a_{16}	a_{17}	a_{18}	
-38,3443	-167,538	-79,1880	

Таким образом, на основе метода планируемого эксперимента получены новые зависимости для оперативной оценки при разработке калибровок, как формоизменения металла, так и силы при штамповке колесных заготовок. Предложенный подход может быть использован для разработки аналогичных зависимостей и от большего числа переменных.

Список литературы

1. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик, А.М. Иоффе, А.В. Праздников, М.И. Староселецкий.– М.: Metallurgy, 1982. – 232 с.
2. Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлева Н.И. Пути совершенствования компьютерных программ проектирования калибровок инструмента деформации для производства штамповано-катаных железнодорожных колес // Металл и литье Украины.– 2003.– № 6.– С. 30 – 35.
3. Яковченко А.В., Луговой А.В., Ивлева Н.И. Экспериментально–теоретический метод компьютерного проектирования калибровок для прокатки железнодорожных колес // Металл и литье Украины, 2004.– № 1 – 2.– С. 59 – 63.
4. Тубольцев А.Г. Определение усилия штамповки формовочного пресса при производстве железнодорожных колес // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: “Системні технології”. 2005. – С. 562 – 564.
5. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техника, 1975.– 168 с.
6. Система ФОРМ-2D и моделирование технологии объемной штамповки/

- Гун Г.Я., Биба Н.В., Лишний А.И. и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1994.– № 7.– С. 9 – 11.
7. Биба Н.В., Стебунов С.А. Применение программы QFORM 2D/3D для разработки малоотходной технологии штамповки // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: “Системні технології”. 2002. – С.221-226.
8. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава // Сталь. 1972.– № 6.– С. 522 – 523.

**© Яковченко А.В., Снитко С.А., Волков А.С.,
Собхи Хасан, Ивлева Н.И. 2005**