

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ КОЛЕСНЫХ ЗАГОТОВОК

С.А. Снитко, А.В.Яковченко, Н.И.Ивлева (ДонНТУ, г. Донецк)

*Предложена математическая модель процесса штамповки колесных заготовок с учетом разгонки металла конусной плитой. На ее основе разработана система автоматизированного проектирования калибровок инструмента деформации*

Сложившиеся для Украины и России тенденции на рынке железнодорожных колес привели к отсутствию полной загрузки имеющихся производственных мощностей за счет внутренних заказов и из стран СНГ и, соответственно, к увеличению доли экспортной продукции в страны дальнего зарубежья. Разработку новой технологии штамповки и прокатки осваиваемых колес в условиях конкуренции необходимо осуществлять в предельно сжатые сроки, обеспечивая высокое качество продукции, ее соответствие требованиям мировых стандартов и снижение затрат металла. Решение указанных задач невозможно без специализированных компьютерных программ, ориентированных как на разработку технологической документации, так и на анализ калибровок.

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) и конечно-элементного моделирования [1 – 3], являются универсальными. Вместе с тем, они не имеют узко специализированных программных средств, поддерживающих решение проектных задач в области колесопркатного производства [4]. Поэтому, в процессе разработки калибровок возникает необходимость использования нескольких систем одновременно. Например, систему AutoCAD используют для проектирования заготовок и штампов, а в системе конечно-элементного моделирования DEFORM выполняют анализ формоизменения и силовых параметров процесса деформации на основе разработанной калибровки. При этом не исключаются также ручные расчеты. Очевидно, что при таком подходе от калибровщиков требуется высокий пользовательский уровень при эксплуатации указанных систем. Кроме того, на выполнение конечно-элементного моделирования требуются значительные затраты времени. Следовательно, актуальной задачей является разработка новой математической модели процесса штамповки, которая бы позволила в рамках единой САПР выполнять все расчеты, связанные, как с проектированием, так и с моделированием, причем в режиме реального времени.

В существующей САПР, специализированной для условий колесо-прокатного производства, положительные результаты были достигнуты путем разработки математической модели процесса штамповки колесных заготовок для используемой на ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» и ОАО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) технологии, предусматривающей разгонку металла пуансоном.

Разработка этой модели была выполнена на основе планируемого расчетного эксперимента. А его реализация осуществлена путем конечно-элементного моделирования. В результате были получены регрессионные зависимости для оперативного расчета формоизменения металла и силы при штамповке заготовок в формовочных штампах [5]. Эти зависимости, совместно с формулами для расчета параметров очага деформации заготовочного пресса и координат точек сопряжений контуров заготовок [6], а также моделями окон программ, в которых выполняется визуализация формоизменения металла и проверка калибровок, положены в основу метода компьютерного проектирования калибровок для штамповки колесных заготовок.

На базе данного подхода целесообразна разработка математической модели процесса штамповки колесных заготовок для случая, когда разгонку металла выполняют конусной плитой (рис. 1). Перспективность этого направления исследований обусловлена преимуществами новой технологии, обеспечивающей снижение асимметрии заготовок и уменьшение цикла на прессе силой 50 МН за счет исключения операции разгонки металла поворотным пуансоном. Необходимо отметить, что данное направление работ на практике непосредственно связано с существенным снижением в условиях ОАО «ВМЗ» разноразмерности исходных заготовок за счет использования малоконусных слитков и их порезки на современных дисковых пилах.

Использование конусной плиты является одним из важных этапов новой технологии. Несмотря на внешнее сходство существующей технологической схемы, предусматривающей разгонку заготовок пуансоном, и схемы разгонки заготовок конусной плитой, они отличаются объемами металла, которые направляются в центральную и периферийную части заготовки. А это в свою очередь обуславливает отличия в формоизменении металла и силе штамповки.

Поэтому целью настоящей работы является разработка математической модели процесса штамповки колесных заготовок с учетом разгонки металла конусной плитой.

Разработка математической модели процесса штамповки включила получение формул для расчета следующих параметров: степени заполнения металлом штампов в зонах обода  $h_o^T / h_o$ , ступицы  $h_c^T / h_c$  и обобщенного коэффициента напряженного состояния металла в формовочных

штампах  $k$ . Формулы для указанных параметров разработаны применительно к широкому сортаменту колес. Параметры найдены в зависимости от семи факторов:  $\frac{D}{d}$ ;  $\frac{h_d}{h_b}$ ;  $\frac{h_o}{B_o}$ ;  $\frac{h_c}{B_c}$ ;  $\frac{S}{H_0}$ ;  $z$ ;  $\frac{h_T}{h_d}$  (рис. 2).

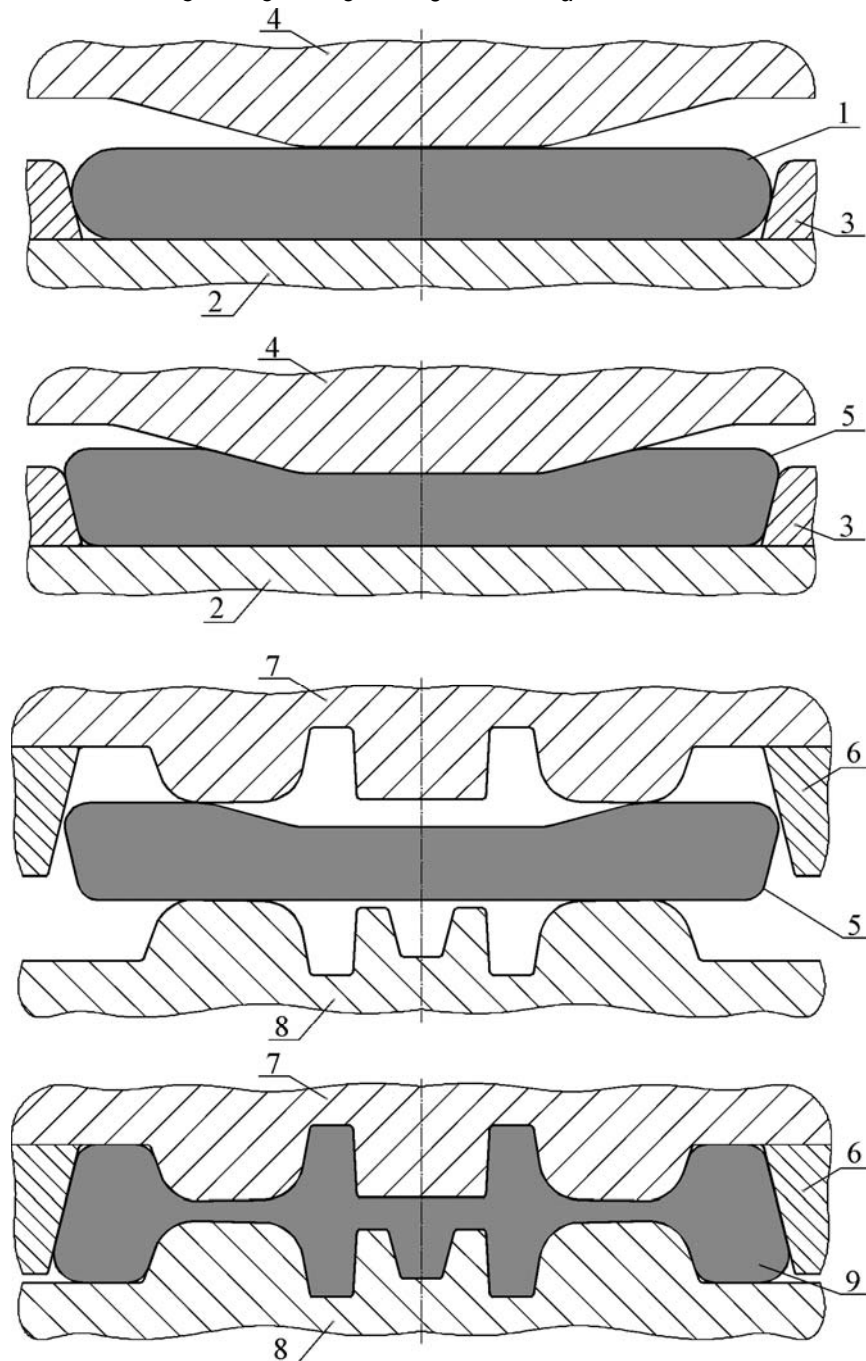


Рисунок 1 – Технологическая схема штамповки колесных заготовок на прессе силой 100 МН из заготовок, полученных разгонкой конусной плитой на прессе силой 50 МН: 1 – заготовка после осадки; 2 – нижняя обжимная плита; 3 – технологическое кольцо; 4 – конусная плита; 5 – заготовка после разгонки; 6 – формовочное кольцо; 7 – верхний формовочный штамп; 8 – нижний формовочный штамп; 9 – отштампованная колесная заготовка с ободом, диском и ступицей

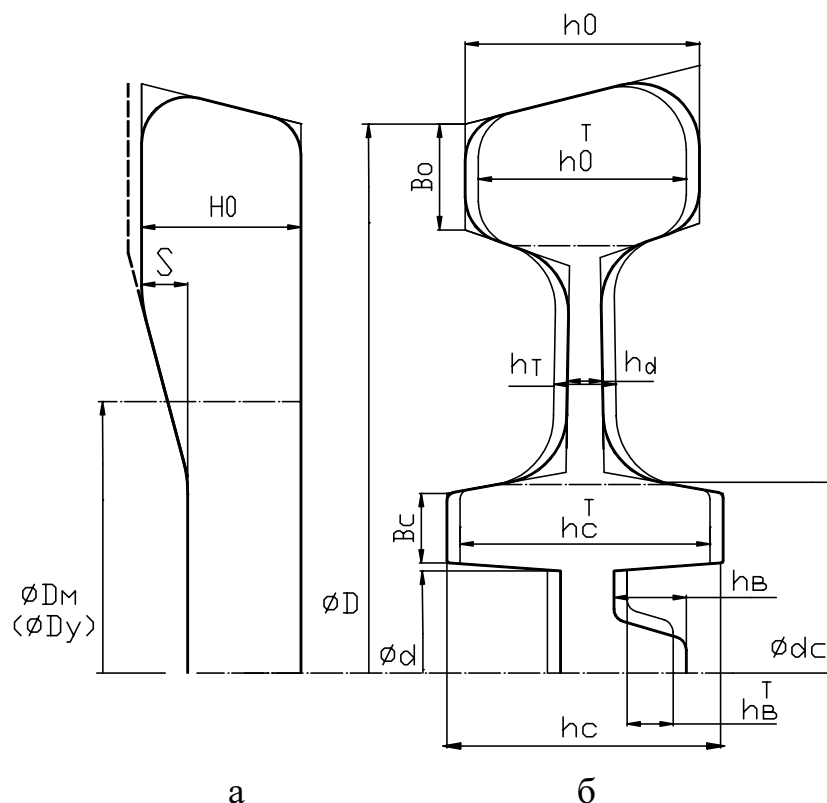


Рисунок 2 – Схемы заготовок: а – после разгонки конусной плитой на прессе силой 50 МН; б – после формовки в штампах прессы силой 100 МН

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $D$  – наружный диаметр обода колесной заготовки ( $700 \text{ мм} \leq D \leq 930 \text{ мм}$ );  $d$  – диаметр отверстия в ступице ( $130 \text{ мм} \leq d \leq 230 \text{ мм}$ );  $h_o$  – ширина обода ( $130 \text{ мм} \leq h_o \leq 195 \text{ мм}$ );  $h_o^T$  – текущая высота обода;  $B_o$  – толщина обода ( $45 \text{ мм} \leq B_o \leq 110 \text{ мм}$ );  $h_c$  – высота ступицы ( $200 \text{ мм} \leq h_c \leq 250 \text{ мм}$ );  $h_c^T$  – текущая высота ступицы;  $B_c$  – толщина ступицы ( $40 \text{ мм} \leq B_c \leq 60 \text{ мм}$ );  $h_d$  – толщина диска ( $20 \text{ мм} \leq h_d \leq 60 \text{ мм}$ );  $h_T$  – текущая толщина диска;  $H_o$  – высота заготовки ( $83 \text{ мм} \leq H_o \leq 198 \text{ мм}$ );  $S$  – величина разгонки ( $0 \leq S \leq 67 \text{ мм}$ );  $z$  – технологический зазор между заготовкой и формовочным кольцом в первый момент штамповки ( $2 \leq z \leq 25 \text{ мм}$ );  $h_B$  – высота выдавки;  $h_B^T$  – текущая высота выдавки;  $D_M$  – диаметр нейтральной линии, относительно которой выполняется равенство масс в соответствующих частях заготовки и колесной заготовки;  $D_y$  – диаметр нейтральной линии, относительно которой выполняется равенство коэффициентов укова в частях колесной заготовки.

Пределы изменения факторов и уровни их варьирования из технологических соображений определены следующими неравенствами:  $2,7 \leq \frac{D}{d}$

$$\leq 6,3; 0,09 \leq \frac{h_d}{h_o} \leq 0,3; 1,5 \leq \frac{h_o}{B_o} \leq 4,4; 2,4 \leq \frac{h_c}{B_c} \leq 4,4; 0 \leq \frac{S}{H_o} \leq 0,43; 2,0 \leq z \leq 25; 0,88 \leq \frac{h_T}{h_d} \leq 1,4.$$

Методика проведення плануємого расчетного експеримента подробно изложена в работах [5, 7]. Эксперимент спланирован по плану второго порядка. Применено центральное композиционное ортогональное планирование. Кодирование факторов ( $x$ ) и уровни их варьирования представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

Интервал варьирования и уровни факторов	$\frac{D}{d}$	$\frac{h_d}{h_o}$	$\frac{h_o}{B_o}$	$\frac{h_c}{B_c}$
Кодовое обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Нулевой уровень $X_i=0$	4,5	0,194	2,97	3,406
Интервал варьирования	0,95	0,056	0,77	0,527
Нижний уровень $X_i=-1$	3,55	0,138	2,20	2,879
Верхний уровень $X_i=+1$	5,45	0,25	3,74	3,933
Нижний уровень в звездной точке $X_i=-1,9095$	2,686	0,087	1,50	2,40
Верхний уровень в звездной точке $X_i=+1,9095$	6,314	0,301	4,44	4,41

Продолжение таблицы 1

Интервал варьирования и уровни факторов	$\frac{S}{H_o}$	$z$ , мм	$\frac{h_T}{h_d}$
Кодовое обозначение	$X_5$	$X_6$	$X_7$
Нулевой уровень $X_i=0$	0,213	13,5	1,138
Интервал варьирования	0,118	6,049	0,138
Нижний уровень $X_i=-1$	0,102	<b>7,4</b>	<b>1,0</b>
Верхний уровень $X_i=+1$	<b>0,325</b>	19,5	1,275
Нижний уровень в звездной точке $X_i=-1,9095$	0	1,9	0,875
Верхний уровень в звездной точке $X_i=+1,9095$	0,427	25,0	1,40

Разработка математической модели процесса штамповки потребовала выполнения 143 опытов. Выполнены расчеты по 77 калибровкам. Несовпадение количества опытов и количества калибровок связано с тем, что

по каждой калибровке выполнялось от 2-х до 3-х опытов. Путем статистической обработки результатов реализации опытов получены регрессионные зависимости для расчета параметров ( $y$ ) в следующем виде:

$$y = a_0 + a_1 * x_1 * x_1 + a_2 * x_2 * x_2 + a_3 * x_3 * x_3 + a_4 * x_4 * x_4 + a_5 * x_5 * x_5 + a_6 * x_6 * x_6 + a_7 * x_7 * x_7 + a_8 * x_1 + a_9 * x_2 + a_{10} * x_3 + a_{11} * x_4 + a_{12} * x_5 + a_{13} * x_6 + a_{14} * x_7 + a_{15} * x_1 * x_2 + a_{16} * x_1 * x_3 + a_{17} * x_1 * x_4 + a_{18} * x_1 * x_5 + a_{19} * x_1 * x_6 + a_{20} * x_1 * x_7 + a_{21} * x_2 * x_3 + a_{22} * x_2 * x_4 + a_{23} * x_2 * x_5 + a_{24} * x_2 * x_6 + a_{25} * x_2 * x_7 + a_{26} * x_3 * x_4 + a_{27} * x_3 * x_5 + a_{28} * x_3 * x_6 + a_{29} * x_3 * x_7 + a_{30} * x_4 * x_5 + a_{31} * x_4 * x_6 + a_{32} * x_4 * x_7 + a_{33} * x_5 * x_6 + a_{34} * x_5 * x_7 + a_{35} * x_6 * x_7 + a_{36} * x_1 * x_2 * x_3 + a_{37} * x_1 * x_2 * x_4 + a_{38} * x_1 * x_2 * x_5 + a_{39} * x_1 * x_2 * x_6 + a_{40} * x_1 * x_2 * x_7 + a_{41} * x_1 * x_3 * x_4 + a_{42} * x_1 * x_3 * x_5 + a_{43} * x_1 * x_3 * x_6 + a_{44} * x_1 * x_3 * x_7 + a_{45} * x_1 * x_4 * x_5 + a_{46} * x_1 * x_4 * x_6$$

где  $a_0, \dots, a_{46}$  – коэффициенты полинома, определяемые при статистической обработке полученных результатов

Также были разработаны зависимости для расчета параметров очага деформации заготовочного пресса и координат точек сопряжений контуров проектируемых заготовок с учетом их разгонки конусной плитой и модель окна компьютерной программы, в которой непосредственно проектируются калибровки (рис. 3). Эти зависимости необходимы для функционирования САПР. Они получены на основе подхода, изложенного нами в работе [6].

Проектирование контура сечения заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН, которая является калибровкой по металлу для перехода «заготовочный пресс силой 50 МН – формовочный пресс силой 100 МН», выполняется после того, как уже разработан контур сечения колесной заготовки, имеющей обод, диск и ступицу, которую штампуют на прессе силой 100 МН. Режим работы программы при разработке указанной калибровки предусматривает задание исходной информации в вертикальную таблицу, показанную на рис. 3. Основными результатами являются высота ( $H$ ) и диаметр ( $Q$ ) заготовки. Предусмотрен также расчет масс и площадей соответствующих частей заготовки и колесной заготовки, разделенных нейтральной линией по диаметру  $D$  (см. рис. 3). На основе полученных результатов выполняется контрольное построение проектируемой заготовки. Оно показано на рис. 3.

После того, как контур заготовки спроектирован и осуществлена проверка захода заготовки в штампы пресса 100 МН, выполняют анализ формоизменения металла и силовых параметров процесса штамповки. Решение задачи выполнено путем программирования полученных выше регрессионных зависимостей (1) и разработки модели окна программы визуа-

лизации формоизменения металла и расчета силы штамповки (рис. 4).

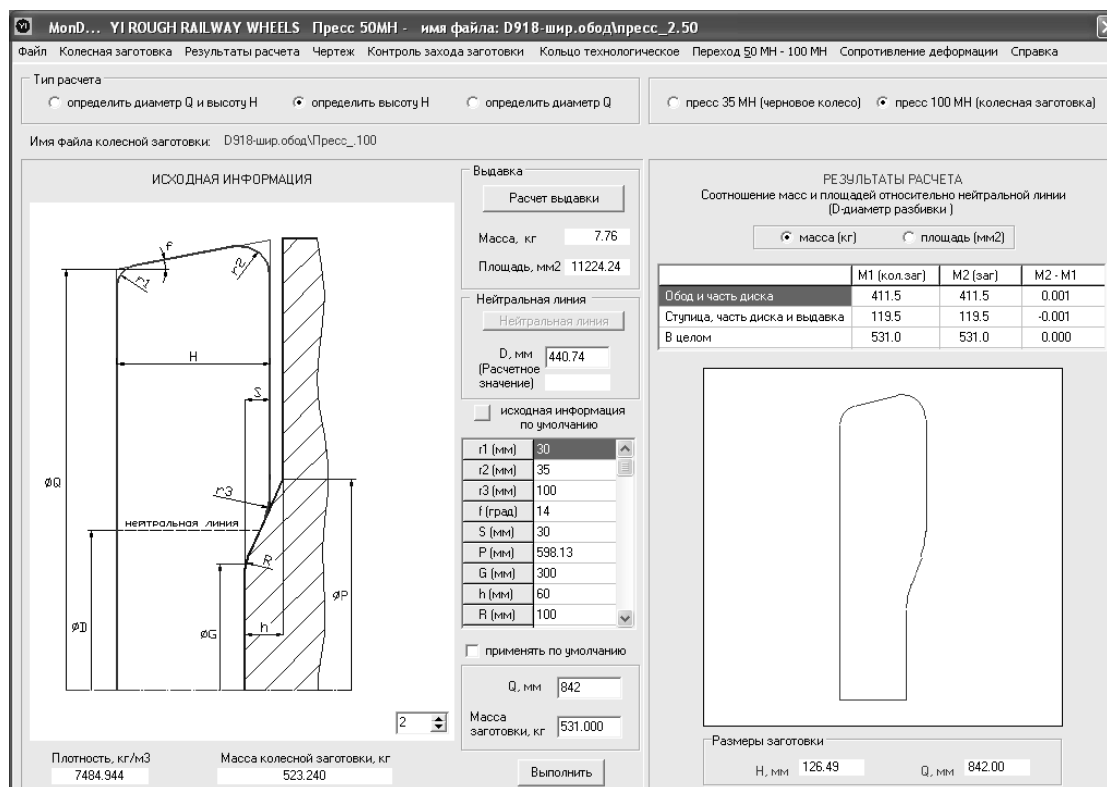


Рисунок 3 – Окно программы проектирования калибровок для прессы силой 50 МН (для колес Ø918 мм)

Анализ формоизменения металла выполняется на основе трех контуров. Их построение предусмотрено в контрольном окне (см. рис. 4). Первый контур (1) (имеющий красный цвет), показывает текущий профиль деформируемой заготовки (при  $0,9 \leq h_T / h_d \leq 1,4$ ). Второй контур (2) (имеющий синий цвет) показывает профиль сечения колесной заготовки в последний момент штамповки ( $h_T / h_d = 1$ ), причем с учетом требуемого заполнения штампов металлом. Третий контур (3) (имеющий зеленый цвет) показывает текущее положение верхнего и нижнего штампов в рассматриваемый момент штамповки. Наличие указанных трех контуров позволяет более полно охарактеризовать степень заполнения штампов. Так, если контур деформируемой заготовки при  $h_T / h_d > 1$  (то есть, до завершения процесса штамповки), например, в зоне ступицы совпадает с контуром штампов, то можно сделать вывод о том, что в зоне ступицы калибровкой предусмотрен избыточный объем металла. В этом случае необходимо вернуться в окно программы, показанное на рис. 3, внести требуемые корректировки в таблицу исходной информации и выполнить проектирование контура заготовки.

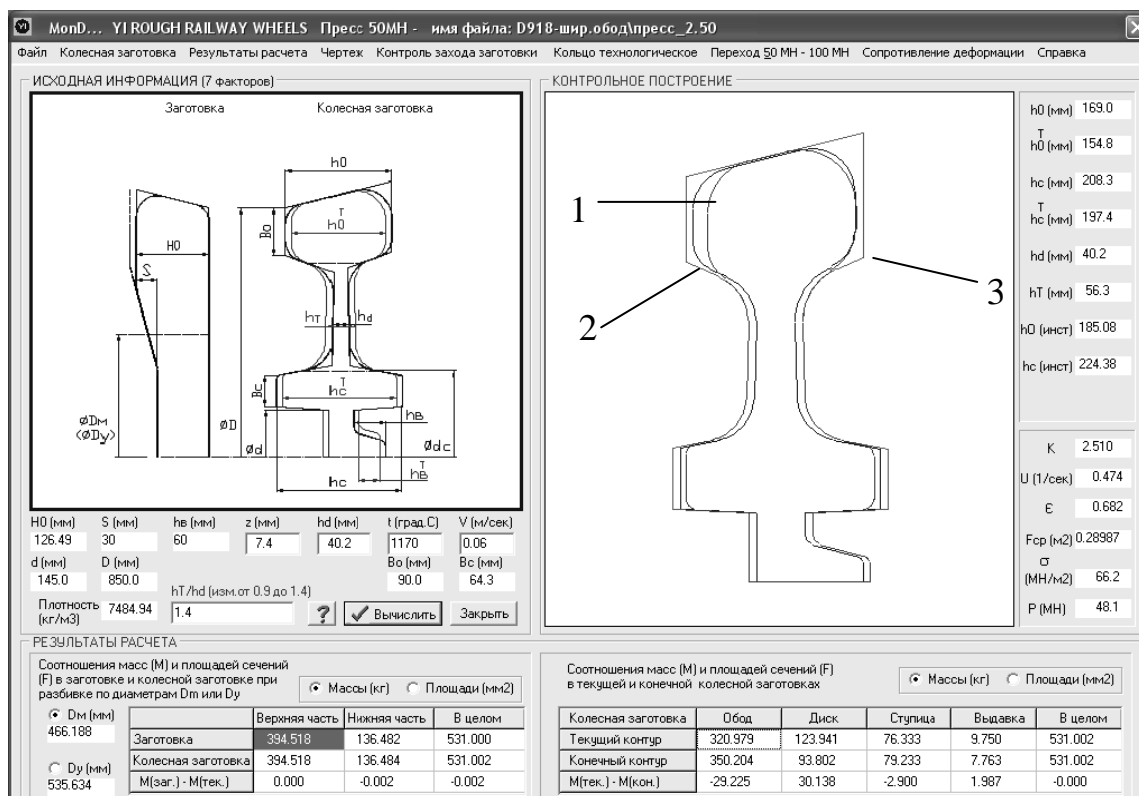


Рисунок 4 – Окно программы визуализации формоизменения металла и расчета силы штамповки на прессе силой 100 МН (для колес Ø918 мм)

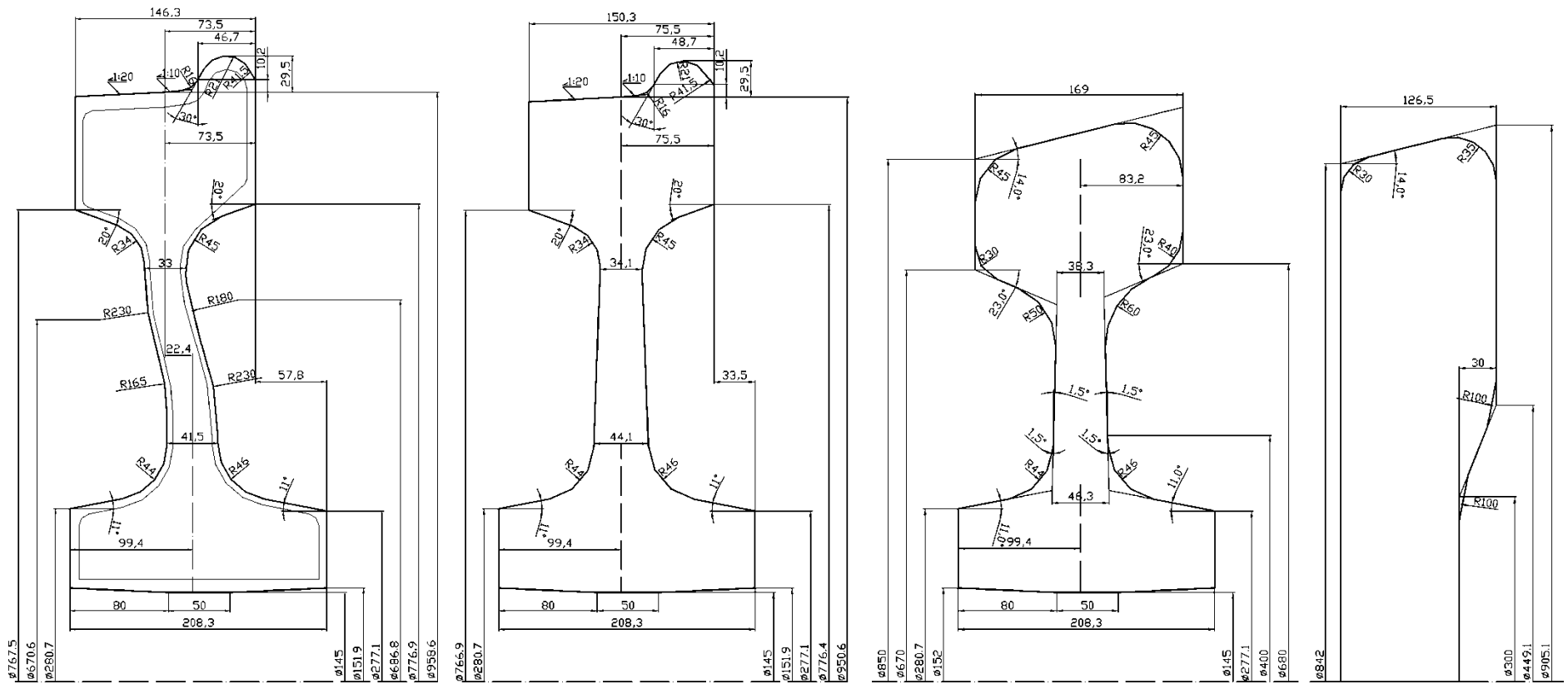
В окне программы, представленном на рис. 4, показаны результаты расчета силы штамповки, параметров формоизменения металла и других величин. Вся представленная информация используется в процессе разработки калибровок.

Необходимо отметить, что разработанные окна программ (см. рис. 3, 4), во многом определяя сущность, последовательность и оперативность выполнения расчетов, являются неотъемлемой частью методов компьютерного проектирования калибровок инструмента деформации. Поэтому их описанию в статье уделено внимание.

С помощью как ранее разработанных, так и созданных в рамках настоящей работы компьютерных программ выполнено проектирование калибровок для штамповки и прокатки колес Ø918 мм (рис. 5). Проектирование калибровки для заготовочного пресса силой 50 МН (см. рис. 5г) выполнено с учетом разгонки металла конусной плитой.

Следует отметить, что на рис. 5 представлена калибровка по металлу, разработка которой заключается в определении формы и размеров контуров ряда последовательных радиальных сечений колесных заготовок и черновых колес, получаемых осадкой, разгонкой, штамповкой, прокаткой и выгибкой на различных прессах и колесопрокатном стане.





а

б

в

г

Рисунок 5 – Калибровка по металлу для штамповки и прокатки колес  $\varnothing 918$  мм: а – профиль черного колеса с вписанным в него контуром чистового колеса (калибровка для выгибного прессы силой 35 МН); б – калибровка для колесопркатного стана; в – калибровка для формовочного прессы силой 100 МН; г – калибровка для заготовочного прессы силой 50 МН

Таким образом, на основе метода планируемого расчетного эксперимента и метода конечных элементов разработана математическая модель процесса штамповки колесных заготовок с учетом разгонки металла конусной плитой. Модель включает: регрессионные зависимости для расчета формоизменения металла и сил при штамповке колесных заготовок для широкого сортаментного ряда колес; зависимости для расчета параметров очага деформации заготовочного пресса и координат точек сопряжений контуров заготовок. На основе данной модели разработаны модели окон программы и сама программа проектирования калибровок для пресса силой 50 МН, визуализации формоизменения металла и расчета сил штамповки колесных заготовок на прессе силой 100 МН.

### **Литература**

1. Соломонов К.Н. Автоматизированное проектирование инструмента и технологий объемной штамповки (обзор) // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003. – № 8. – С. 42–48.
2. Гольшков Р., Латаев А., Харламов А. Оптимизация технологических процессов колесопрокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM // САПР и графика. – 2006.–№ 7.–С. 73–75.
3. 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.
4. 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.
5. Моделирование формоизменения металла и силы при штамповке колесных заготовок / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, А.С. Волков и др. // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 102.– С. 124–135.
6. Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлева Н.И. Экспериментально-теоретический метод компьютерного проектирования калибровок для штамповки колесных заготовок // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2004. – С. 589–594.
7. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – Киев: Техника, 1975. – 168 с.

**© Снитко С.А., Яковченко А.В., Ивлева Н.И. 2007**