

С.А. Снитко /д.т.н./, А.В. Яковченко /д.т.н./, В.В. Пилипенко  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)  
Н.И. Ивлева

## РАЗРАБОТКА КАЛИБРОВКИ ДЛЯ ПРОКАТКИ ГЛАВНОГО ВАЛКА КОЛЕСОПРОКАТНОГО СТАНА НА КОЛЬЦЕПРОКАТНОМ СТАНЕ

*Предложено рассмотреть главный валок колесопрокатного стана как новый экономичный профиль, контур радиального сечения которого представляет собой фланец с наружным гребнем, изготовленный прокаткой на кольцепрокатных станах. Выполнено автоматизированное проектирование соответствующих контуров чистового и чернового фланцев, калибровок для их штамповки и прокатки, а также проверка калибровки путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевой заготовки с гребнем на кольцепрокатном стане.*

**Ключевые слова:** *главный валок колесопрокатного стана, фланец с наружным гребнем, прокатка на кольцепрокатном стане, автоматизированное проектирование калибровок, конечно-элементное моделирование процесса прокатки.*

### Постановка проблемы

Экономия металла определяется снижением металлоемкости проката и повышением его точности, что обуславливает необходимость создания новых экономичных профилей. Главный валок колесопрокатного стана контактирует в процессе горячей прокатки с поверхностью катания обода колеса и подвержен износу.

Новые валки изготавливают после окончания срока их службы, а также при освоении производства новых профилируемых колес. Предложено рассмотреть сами валки как новый экономичный профиль, который также можно изготовить прокаткой, но уже на кольцепрокатных станах.

### Анализ последних исследований и публикаций

Разработка технологии штамповки и прокатки главных валков колесопрокатных станов, контур радиального сечения которых представляет собой фланец с наружным гребнем, включает ряд этапов. К ним относятся проектирование контуров чистового, а затем и чернового фланцев, калибровок для их штамповки и прокатки, а также проверка калибровок путем конечно-элементного моделирования соответствующих процессов горячей деформации металла. Для проектирования чистовых и черновых фланцев с наружным гребнем, а также калибровок для их штамповки и прокатки рационально использовать методы и специализированные компьютерные программы, которые созданы в работах [1...3].

### Цель (задачи) исследования

Целью работы является проектирование калибровки для прокатки на кольцепрокатном стане главных валков колесопрокатных станов, контур радиального сечения которых представляет собой фланец с наружным гребнем, и проверка калибровки путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевой заготовки с гребнем.

### Основной материал исследования

С использованием контура сечения механически обработанного главного валка колесопрокатного стана спроектирован контур соответствующего чистового технологического фланца (рис. 1). На его основе затем выполнено проектирование соответствующего профиля чернового фланца и калибровок (рис. 2...6).

Разработанный метод и специализированная компьютерная программа, представленные в работе [1], обеспечивают возможность автоматизированного проектирования контуров сечений чистовых фланцев. Предусмотрен расчет основных параметров кольца и контура его сечения, а также выполнение чертежей с автоматической простановкой размеров. Основой метода проектирования чистовых фланцев являются созданные в работе [1] библиотеки элементов, из которых эти профили состоят. Пользователь выбирает необходимую комбинацию элементов, задает их размеры, а программа в автоматическом режиме объединяет элементы и проектирует профиль фланца. Контрольное построение чистового технологического фланца показано на рис. 1.

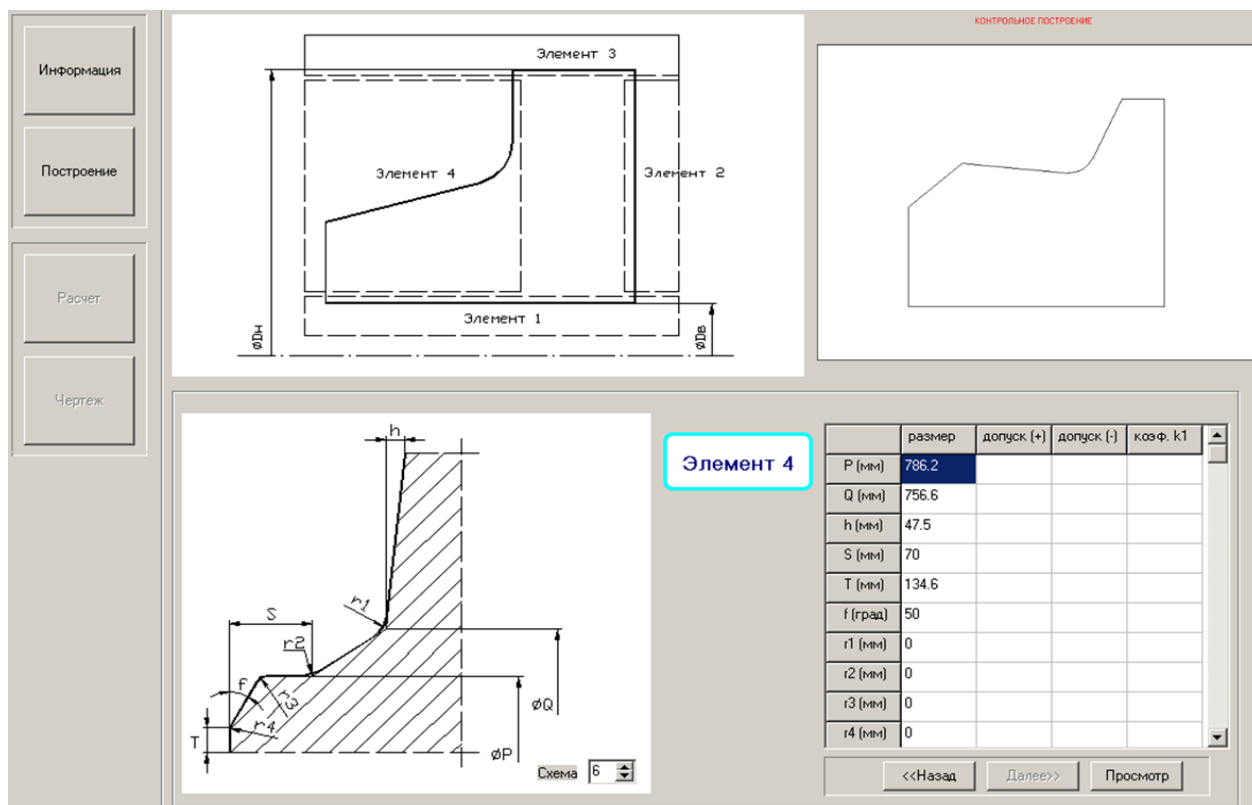


Рис. 1. Задание исходной информации для проектирования чистового технологического фланца и его контрольное построение

Сущность метода автоматизированного проектирования профилей черновых фланцев, изложенного в работе [2], заключается в следующем.

По различным элементам профиля задаются номинальные припуски, определяемые припусками на механическую обработку и допускаемыми отклонениями. Припуски назначают с целью устранения дефектного слоя металла и обеспечения требуемых размеров.

Порядок задания номинальных припусков по контуру фланца определен разработанной схемой, показанной в окне программы на рис. 2. Здесь показаны точки, в которых нормируются номинальные припуски. Их значения, а также ряд дополнительных размеров указываются в вертикально расположенной таблице.

После задания всей требуемой информации выполняют проектирование профиля чернового фланца по номинальным размерам. Цифровая информация об указанном контуре в виде координат точек сопряжений, координат точек центров дуг и значений радиусов этих дуг рассчитывается на базе математических моделей [4] и аналогичной информации по контуру чистового фланца.

Следующее окно программы (рис. 3) становится доступным после нажатия кнопки «перейти к таблице размеров» в предыдущем окне (рис. 2). В нем под схемой фланца предусмотрена таблица, в которую автоматически заносятся его

номинальные размеры, автоматически рассчитываемые программой на основе соответствующих размеров чистового технологического фланца и заданных номинальных припусков.

Допуски на прокатку задаются в таблицу (рис. 3) для тех размеров, у которых они предусмотрены. По остальным соответствующие ячейки остаются пустыми. В последней строке таблицы для любого из размеров, имеющих поле допуска, можно задать индивидуальный коэффициент  $k_1$ , отличающийся от базового значения, установленного ранее. Коэффициент  $k_1$  изменяется в диапазоне  $0 \dots 1$  и определяет требуемую часть поля допусков (например, при  $k_1=0$  выполняется проектирование по наименьшим размерам профиля, при  $k_1=1$  – по наибольшим размерам профиля, при  $k_1=0,5$  – с учетом среднего поля допусков).

Любой размер чернового фланца, вычисленный автоматически, может быть изменен калибровщиком (рис. 3). В этом случае, чтобы исключить автоматический перерасчет размеров, необходимо установить флажок в окне «произвольные размеры». Снятие флажка позволяет вернуться к прежнему режиму расчета.

После задания всей требуемой информации выполняют контрольное построение профиля чернового фланца по номинальным размерам или с учетом требуемой части полей допусков, а затем после его просмотра получают и

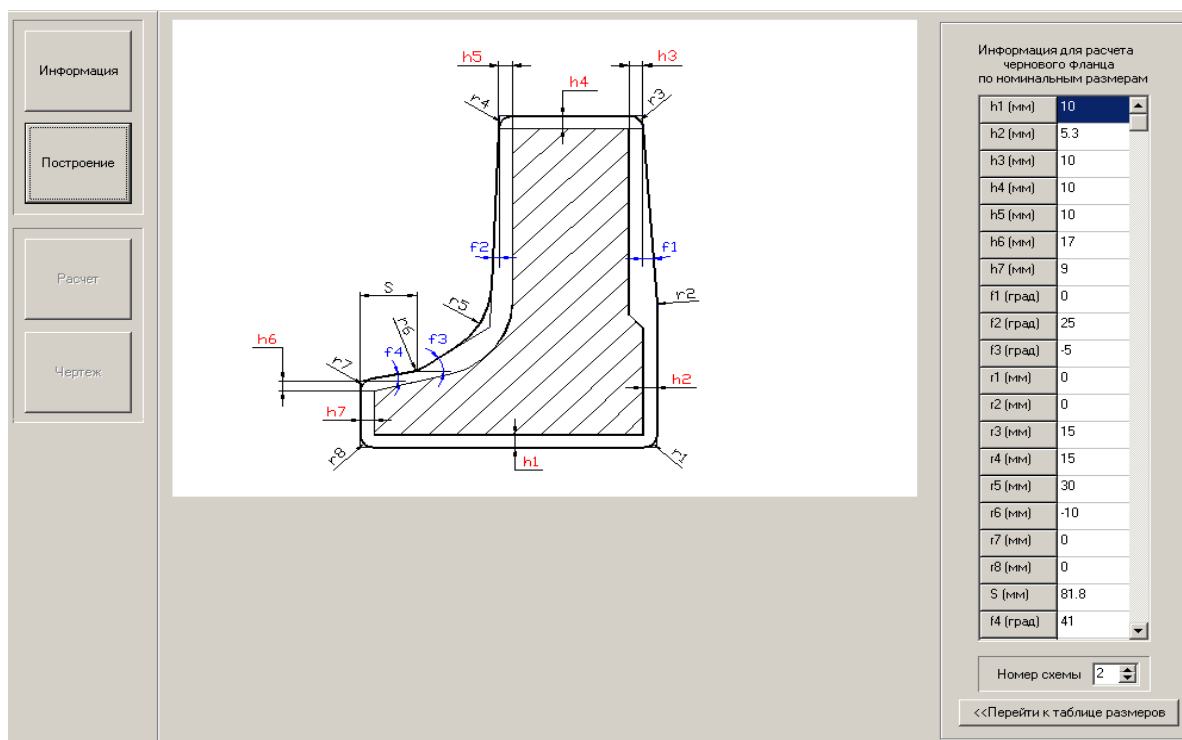


Рис. 2. Окно задания номинальных припусков для чернового фланца

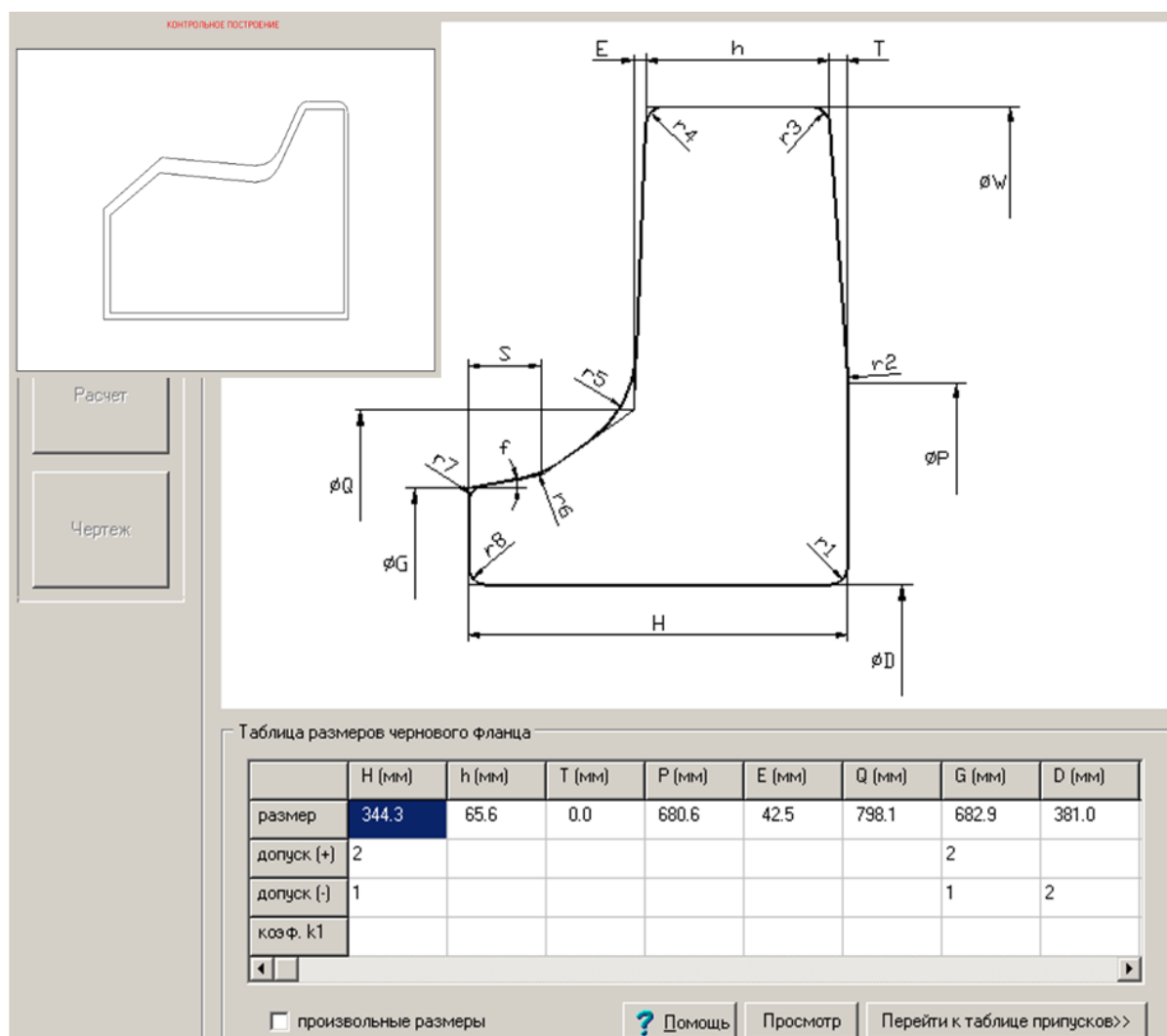


Рис. 3. Окно задания поля допусков на прокатку чернового фланца

анализируют результаты расчетов и чертеж, который выполняется с автоматической простановкой размеров.

На рис. 4 представлены результаты расчета основных параметров черного фланца, контура его сечения с учетом температурного расширения металла (соответствующий коэффициент равен 1,015) и параметров исходной заготовки.

После учета температурного расширения металла получают контур, который, по сути, является калибровкой по «металлу» для кольцепрокатного стана. Он обеспечивает проектирование калибровки валков и, соответственно, контуров ручьев, нарезаемых в валках (рис. 5). Здесь для наглядности в контур черного фланца вписан контур сечения чистового механически обработанного главного валка колесо-прокатного стана.

В работе [3] представлены метод и специализированная компьютерная программа проекти-

рования калибровок для штамповки заготовок с гребнем.

На основе калибровки кольцепрокатного стана выполняется разработка калибровки заготовочного пресса.

Контур заготовки с гребнем, получаемый штамповкой на прессе, разрабатывается на базе представленного на рис. 5 контура сечения черного фланца, прокатанного на стане. Разработка калибровки выполняется в окне программы, показанном на рис. 6.

Здесь в левом поле окна показана схема контура проектируемой заготовки. Для ввода исходной информации служит вертикальная таблица, расположенная справа от нее. Левое нижнее поле предназначено для вывода расчетных параметров заготовки: массы, площади ее радиального сечения и высоты кольцевой части фланца.

На рис. 6 представлено контрольное построение захода профиля, полученного штамповкой на прессе, в калибр кольцепрокатного стана.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА**

Координаты точек сопряжения контура сечения, мм

N	x	y	r-связь
1	349.972	192.850	0.000
2	349.972	345.404	0.000
3	349.972	482.451	15.000
4	334.972	497.451	0.000
5	292.940	497.451	15.000
6	279.348	488.796	0.000
7	249.144	424.089	-30.000
8	219.306	406.896	0.000
9	87.263	418.624	10.000
10	79.818	416.210	0.000

Центры дуг контура сечения, мм

N	x-ц	y-ц	R
1	334.972	482.451	15.000
2	292.940	482.451	15.000
3	221.960	436.778	30.000
4	86.378	408.663	10.000

Основные расчетные параметры

Площадь, мм <sup>2</sup>	81681.010
X- центра тяжести	190.874
Y- центра тяжести	313.282
R- центра тяжести	313.282
Объем, мм <sup>3</sup>	160781470.836

Доля металла на угар (нагрев 1)

Доля металла на угар (нагрев 2)

Масса выдавки, кг

Масса угара 1, кг

Масса угара 2, кг

Масса заготовки для порезки, кг

Плотность, кг/м<sup>3</sup>

Масса, кг

Рис. 4. Результаты расчета основных параметров черного фланца, контура его сечения и параметров исходной заготовки

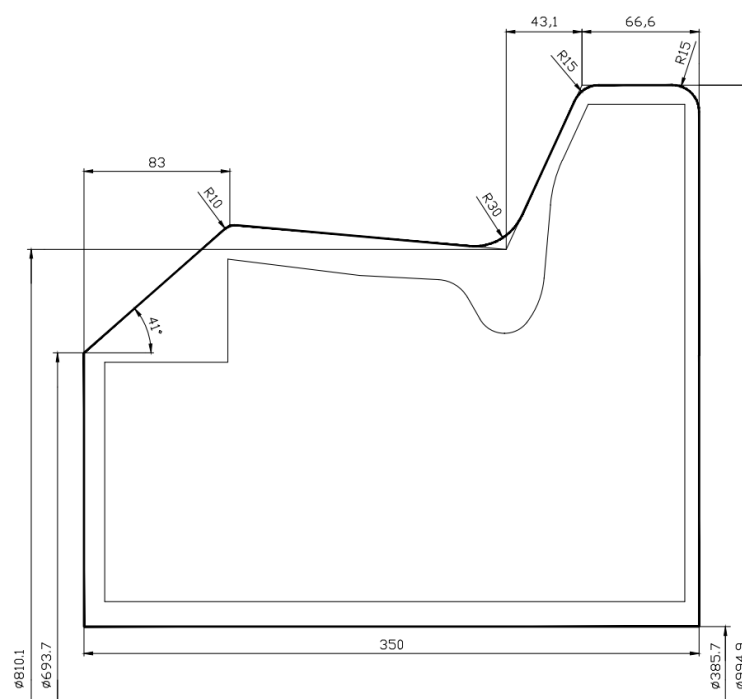


Рис. 5. Проектирование в автоматизированном режиме контура черного фланца с учетом температурного расширения металла, калибровка по металлу для кольцепрокатного стана с вписанным контуром сечения чистового механически обработанного главного вала колесопрокатного стана

Изменяя в вертикально расположенной таблице размеры гребня проектируемой заготовки, калибровщик обеспечивает заход профиля, исключая образование заката с левой стороны гребня.

В окне контрольного построения контура проектируемой заготовки (показан красным цветом) и контура, прокатанного из нее на стане черного фланца (показан синим цветом), предусмотрены размеры  $a$  и  $b$  (по умолчанию указываются толщины гребневых частей соответствующих контуров).

Указанные выше контуры совмещаются, при этом по умолчанию скелетные точки контуров, разделяющие их кольцевые и гребневые части, автоматически располагаются на вертикально расположенной прямой, показанной пунктирной линией. В случае необходимости величину  $b$  калибровщик может изменить. При этом нормирование вытяжек и масс будет осуществляться относительно нейтральной линии, смещенной от скелетной точки, разделяющей гребневую и кольцевую части готового фланца.

В общем случае, изменяя в окне программы величины  $H$ ,  $a$ ,  $b$ , можно задать требуемое суммарное осевое обжатие отштампованной заготовки наклонными валками кольцепрокатного стана и его распределение на левую и правую стороны профиля. Пунктирная линия, показанная на рис. 6, по существу является нейтральной линией, относительно которой металл в калибре

стана течет в его кольцевую и гребневую части. Определение требуемых параметров, в том числе нормирующих заход гребня, выполняется на базе известного технического решения [5], полученного для условий прокатки кольцевых профилей с наружным гребнем.

Разработка калибровки является итерационным процессом. Задаваемые параметры калибровщик может скорректировать по результатам конечно-элементного моделирования рассматриваемого процесса или по результатам опытной прокатки. Важным критерием является соотношение вытяжек в гребневой и кольцевой частях профиля, рассчитываемые значения которых приводятся в таблице, расположенной в правом нижнем поле окна программы (рис. 6). Для предотвращения утяжки гребня по его высоте вытяжка по кольцевой части фланца не должна превышать вытяжку по гребневой части.

В вертикально расположенной таблице, которая служит для ввода исходной информации, задается требуемый внутренний диаметр кольцевой заготовки, получаемой на прессе. Соответственно, автоматически рассчитываются площадь радиального сечения заготовки с пресса и вытяжка при прокатке на стане, которые учитываются при разработке калибровки. В окне программы выполнено также нормирование масс и вытяжек соответствующих частей штампованной заготовки и проката, а также их контрольное построение с учетом захода металла в калибр.

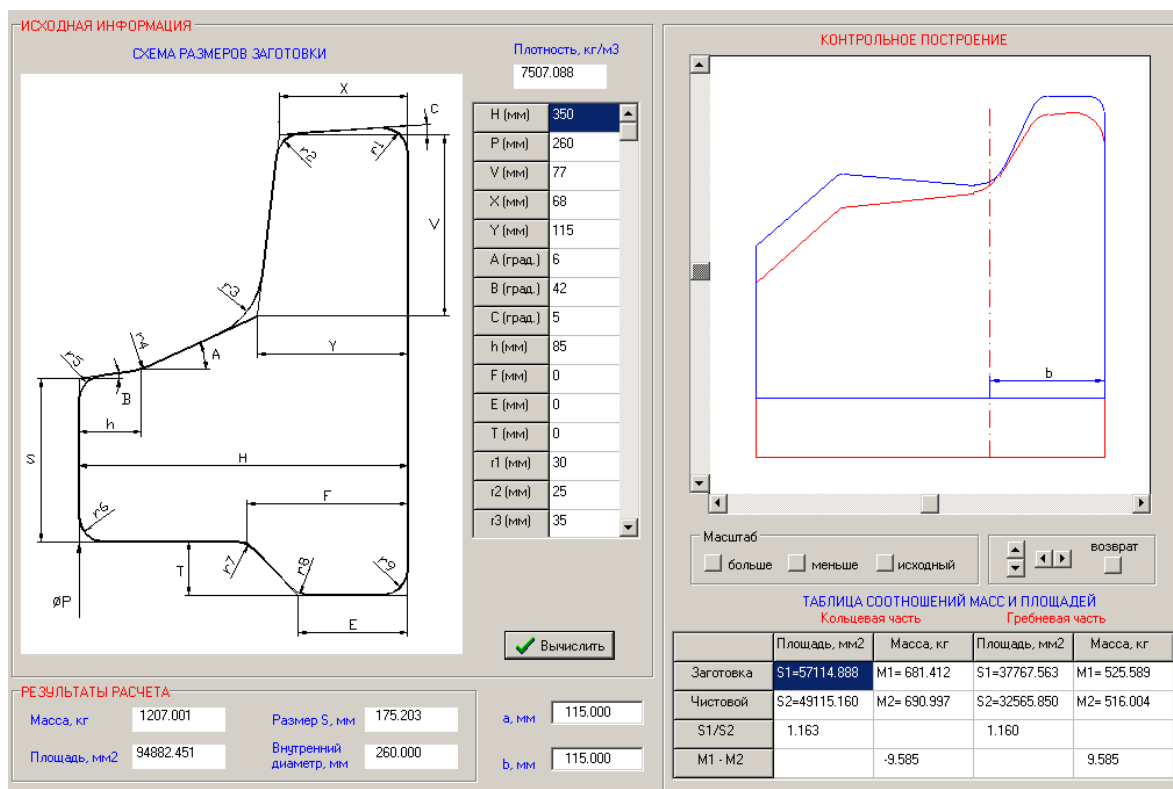


Рис. 6. Проектирование калибровки для штамповки заготовки с наружным гребнем на заготовочном прессе

Автоматизация процесса проектирования калибровки позволяет повысить производительность труда калибровщиков, а также улучшить качество технической документации.

На рис. 7, 8 представлены результаты про-

верки разработанной калибровки путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевой заготовки с гребнем в калибре, который образован вертикальными валками кольцевого прокатного стана.

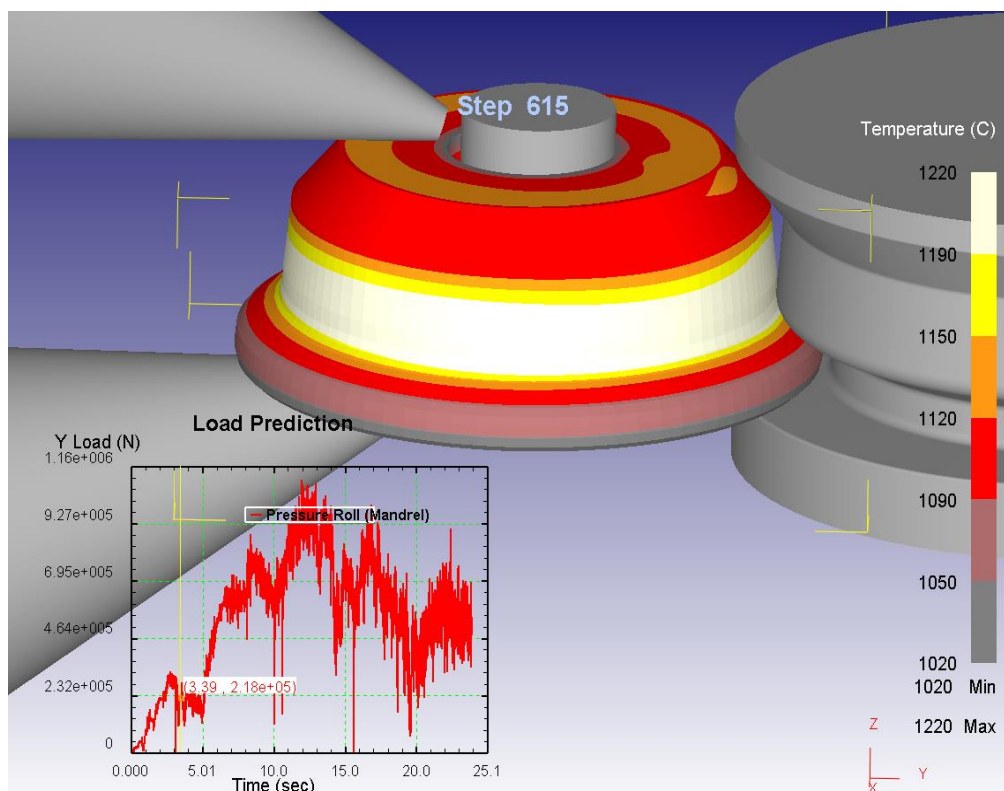


Рис. 7. Моделирование температурного поля в процессе прокатки

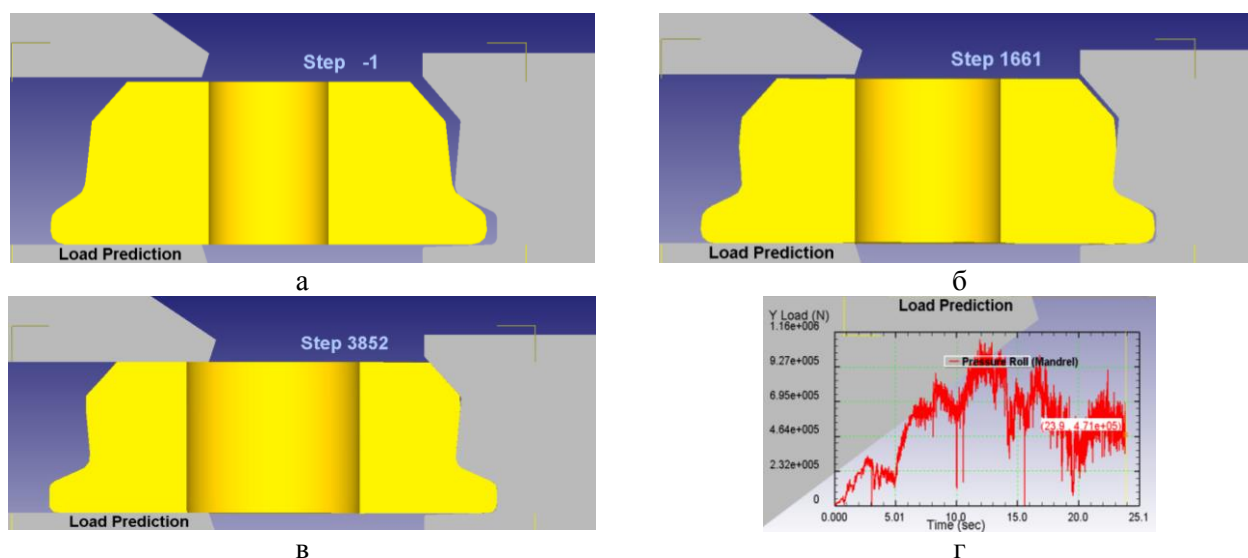


Рис. 8. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки главного вала колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане:  
 а – начальный момент прокатки; б – промежуточный момент прокатки;  
 в – конечный момент прокатки; г – график силы прокатки

Профиль чернового фланца, показанный на рис. 5, при прокатке формировался между не-приводным валком-оправкой и главным приводным валком (см. рис. 7), которые установлены вертикально. Обжатие стенки кольца и соответствующее увеличение его диаметра осуществлялось перемещением вала-оправки в сторону главного вала с помощью гидравлического привода. Стан имеет два конических вала (см. рис. 7, 8), выполняющих обжатие кольца по высоте, которые установлены диаметрально противоположно вертикальным валкам. При прокатке кольцо центрируется роликами, которые удерживают его на оси стана.

Процесс прокатки кольцевых заготовок на кольцепрокатном стане реализован в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в шаблоне Ring Rolling, который является специализированным модулем, разработанным для решения указанных задач [6...9].

Для кольцевой заготовки использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали конструкционную углеродистую качественную сталь 60, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных DEFORM 3D. Поведение материала заготовки в процессе решения описывали на базе диаграммы «напряжение течения – деформация». В компьютерной программе напряжения и деформации, используемые в указанной диаграмме, являются эквивалентными напряжениями, или напряжениями по Мизесу  $\sigma$ , и эквивалентными деформациями  $\epsilon$ .

При моделировании использовали концепцию напряжения течения, в соответствии с кото-

рой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения. Авторами обоснована целесообразность использования для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , разработанной на базе теории [10].

Для валков выбран недеформируемый тип материала. Дополнительно указаны направление перемещения и закон перемещения вала-оправки, координаты оси вращения и скорость вращения главного вала.

На рис. 7 представлены результаты моделирования неравномерного температурного поля в процессе прокатки (с учетом неравномерного температурного поля перед прокаткой), которое учитывалось при расчетах формоизменения металла (см. рис. 8а...в) и графика силы прокатки в радиальном очаге деформации (см. рис. 8г). Имеет место заполнение металлом всех элементов калибра, сила прокатки не превышает допустимое значение на существующих станах, равное 1,5 МН, что свидетельствует о правильности разработанной калибровки.

## Выводы

Прокатка главного вала колесопрокатного стана, контур радиального сечения которого представляет собой фланец с наружным гребнем, на кольцепрокатном стане обеспечивает экономию металла и повышение эффективности производства.

Выполнены автоматизированное проектирование контуров чистового и чернового фланцев,



необходимых для получения путем механической обработки главных валков колесопрокатных станков, калибровок для их штамповки и прокатки, а также проверка калибровки путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевой заготовки с гребнем на кольцепрокатном стане. Установлено, что имеет место выполнение всех элементов профиля, сила прокатки не превышает допустимое значение на существующих станах, равное 1,5 МН, что свидетельствует о правильности разработанной калибровки.

### Список литературы

1. Метод автоматизированного проектирования профилей механически обработанных бандажей и фланцев / А.В. Яковченко [и др.] // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – №4(21). – С. 38-53.
2. Метод автоматизированного проектирования профилей черновых бандажей и фланцев / А.В. Яковченко [и др.] // Вестник ДонНТУ. – 2019. – №2(16). – С. 109-116.
3. Метод автоматизированного проектирования калибровок инструмента деформации для штамповки и прокатки фланцев / А.В. Яковченко [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов: материалы 5-й Междунар. научн.-практ. конф., 21-23 мая 2019 г., Донецк. – Донецк: ДОННТУ, 2019. – Т.3. – С. 98-103.
4. Яковченко, А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес: монография / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2008. – 491 с.
5. А.с. №1733172 СССР, МКИ В21Н1/08. Способ производства кольцевых изделий с наружным гребнем / А.В. Яковченко [и др.] (СССР). – №4731311/27; заявл. 11.04.89; опубл. 15.05.92.
6. Giorleo, L. Validation of hot ring rolling industrial process 3D simulation / L. Giorleo, C. Giardini, E. Ceretti // International Journal of Material Forming. – 2013. – No.1. Vol.6. – P. 145-152.
7. Mathematic modeling and FE simulation of radial-axial ring rolling large L-section ring by shape axial roll / P. Zhou [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – No.5-8. Vol. 72. – P.729-738.
8. Kang, J.H. Research on Filling Limit of Profile Ring Rolling on Circumferential Surface // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – No.12. Vol.4. – P. 40-45.
9. Deform 3D v6.1 Ring Rolling System Manual. – Columbus: Scientific Forming Technologies Corporation, 2007. – 30 p.
10. Солод, В.С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей / В.С. Солод, Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин // Металл и литье Украины. – 2006. – № 7-8. – С. 52-56.

S.A. Snitko /Dr. Sci. (Eng.), A.V. Yakovchenko / Dr. Sci. (Eng.), V.V. Pilipenko

Donetsk National Technical University (Donetsk)

N.I. Ivleva

### DEVELOPMENT OF CALIBRATION FOR ROLLING THE MAIN ROLL OF A WHEEL-ROLLING MILL ON A RING-ROLLING MILL

**Background.** The production of the main roll of a wheel-rolling mill, the contour of the radial section of which is a flange with an external ridge, on a ring-rolling mill provides metal savings, increases production efficiency and is an urgent task.

**Materials and/or methods.** The main element of stamping and rolling on the ring-rolling mill of the main rolls of wheel-rolling mills, the contour of the radial section of which is a flange with an external ridge, is the calibration of rolls and dies. The design of finishing and roughing flanges with an external ridge, as well as calibrations for their stamping and rolling, can be efficiently performed.

**Results.** Computer-aided design performed of the contours of the finishing and roughing flanges necessary for obtaining by mechanical processing of the main rolls of wheel-rolling mills, calibrations for their stamping on the press and rolling on the ring-rolling mill as well as checking the calibration by finite element process modelling of rolling an annular billet with a ridge on a ring-rolling mill.

**Conclusion.** Based on finite element process modelling of rolling an annular billet with a ridge on a ring-rolling mill, determined that all profile elements are executed, the rolling force does not exceed



*the permissible value of 1.5 MN on existing mills, which indicates that the developed calibration is correct.*

**Keywords:** *the main roll of the wheel-rolling mill, the flange with an external ridge, rolling on the ring-rolling mill, computer-aided design of calibrations, finite element modelling of the rolling process.*

#### Сведения об авторах

##### С.А. Снитко

SPIN-код: 8463-3786  
Author ID: 844696  
ORCID iD: 0000-0002-1099-5801  
Телефон: +380 (71) 420-66-39  
Эл. почта: snitko\_sa@mail.ru

##### В.В. Пилипенко

SPIN-код: 9290-0787  
Author ID: 1030563  
ORCID iD: 0000-0002-6132-5605  
Телефон: +380 (71) 414-20-36  
Эл. почта: VictorPilipenkoDNTU@gmail.com

##### А.В. Яковченко

SPIN-код: 1314-1795  
Author ID: 850425  
ORCID iD: 0000-0003-2320-9504  
Телефон: +380 (71) 334-82-35  
Эл. почта: mond1991@mail.ru

##### Н.И. Ивлева

Телефон: +380 (62) 304-33 77  
Эл. почта: ivl22@mail.ru

*Статья поступила 05.04.2020 г.*

© С.А. Снитко, А.В. Яковченко, В.В. Пилипенко, Н.И. Ивлева, 2020

*Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько*

