

УДК 621.771

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ ШАРОВ**

**Филиппова М.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение». ЕВРАЗ ЗСМК (flippova\_mv@mail.ru)

**Темлянец М.В.**, д.т.н., профессор, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, проректор по научной работе и инновациям (ucheb\_n\_otdel@sibsiu.ru)

**Перетьяко В.Н.**, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение». ЕВРАЗ ЗСМК (kafkshp@sibsiu.ru)

**Прудкий Е.Е.**, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение». ЕВРАЗ ЗСМК (kafkshp@sibsiu.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Изложены результаты моделирования прокатки точных по массе шаров диаметром 93 и 125 мм в винтовых калибрах в программах компьютерного моделирования QForm-3D и DEFORM-3D, описаны этапы и исходные данные создания модели виртуального шаропрокатного стана. Проведен анализ напряженного состояния металла в характерных точках вдоль оси прокатки: интенсивность напряжений, компоненты тензора напряжений, среднее нормальное напряжение. Представлены результаты замеров массы шаров, прокатанных на новых и изношенных валках. Проведены проверка качества металла внутренних слоев металла и замеры твердости прокатанных шаров по вертикальной и горизонтальной осям симметрии шара. Исследование формоизменения металла при моделировании прокатки шаров показало, что нагретая заготовка в виде прутка горячекатаной стали хорошо захватывается валками, процесс прокатки происходит стабильно без пробуксовок. Металл заготовки полностью заполняет калибры. Зазора между металлом и стенками калибра не наблюдается. Перемычки, соединяющие отформованные шары, полностью отделяются непосредственно в валках стана. При этом перемычка срезается ребордой валков и вдавливается в тело шара. Отделенный шар продолжает обкатываться на отделочном участке калибра, остатки перемычки заглаживаются, и из валков выходит полностью оформленный шар, имеющий гладкую поверхность. Установлено, что при моделировании напряженно-деформированного состояния все компоненты тензора напряжений имеют отрицательное значение, то есть все компоненты тензора напряжений при прокатке шаров сжимающие. Статистическая обработка данных по взвешиванию прокатанных шаров диаметром 93 и 125 мм показала, что отклонение массы от номинальной не превышает 1 %. Замеры твердости по диаметральному сечению шаров показали отсутствие провалов твердости во внутренних слоях прокатанного металла, что говорит о хорошем качестве сердцевинной зоны.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, компьютерное моделирование, шар, шаропрокатный стан, поперечно-винтовая прокатка качество шара, напряженно-деформированное состояние, статистическая обработка, твердость шара, среднее нормальное напряжение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-516-521

Развитие горнодобывающей и перерабатывающей отраслей промышленности привело к увеличению объемов производства мелющих шаров, что потребовало интенсификации процесса прокатки, а также расширения сортамента продукции. Расширение сортамента в сторону увеличения диаметра шара, высокие требования к качественным характеристикам шаров, в настоящий момент превышающие требования существующего государственного стандарта, привели к необходимости исследования процессов формоизменения металла в калибрах, качества прокатанных шаров и разработке новых энергоэкономичных процессов прокатки шаров крупного диаметра.

Одним из основных факторов процесса прокатки шаров в винтовых калибрах является определение режимов деформации, при которых отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия [1]. Установлено, что склонность металла к разрыхлению в осевой зоне увеличивается при уменьшении величины

обжатия в перемычке за половину оборота заготовки, увеличении ширины реборды калибра, снижении температуры прокатки заготовки [2].

Наиболее энергоэкономным способом калибровки валков является калибровка с непрерывно и монотонно изменяющимся шагом подрезки ширины реборды [3]. Однако копиры для нарезки таких валков должны изготавливаться на станке с программным управлением, что в условиях существующего производства пока невозможно. По этой причине однозачодная калибровка шаров с фактическим диаметром 93 и 125 мм рассчитывалась по дискретному способу с преобладанием «геометрического» подхода при построении калибра [4, 5].

Для проверки качества шаров, прокатанных по рассчитанной калибровке (номинальный диаметр шаров 90 и 120 мм), проводились эксперименты с использованием математического и компьютерного моделирования. Исследование напряженно-деформированного со-

стояния металла при его обработке давлением с точки зрения математического моделирования является сложным процессом из-за большого числа определяющих параметров и неоднозначным характером их влияния. Корректная постановка задачи даже для простых случаев обработки металлов давлением приводит к системе интегрально-дифференциальных уравнений, решить которую аналитически не представляется возможным. В настоящее время для решения подобных задач широко применяется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программных продуктах конечно-элементного анализа. Исследование напряженно-деформированного состояния металла позволяет оценить проработку структуры металла, неравномерности деформации по объему детали, измельчения и распределения по объему неметаллических включений, а также анизотропию свойств металла [6 – 17].

Для разработки технологии прокатки точных по массе шаров в винтовых калибрах, при которой отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия, применялась методика математического моделирования с использованием численного метода МКЭ [8, 9, 15 – 17]. Порядок создания модели и получения результатов моделирования заключается в следующем. На первом этапе осуществляется описание исходных данных природы. Готовое изделие: геометрические размеры, масса, марка стали, чистота поверхности (припуски и допуски); оборудование и рабочие инструменты: материал валков, конфигурация калибра, геометрические размеры, чистота поверхности рабочего инструмента; технология процесса: тип нагревательного устройства, теплотехнические характеристики стали, температура нагрева, сопротивление деформации, пластические свойства и угар металла при температурах обработки давлением, время нагрева, время штамповки, скорость деформации, наличие смазки.

На втором этапе по исходным данным с использованием САД-систем (КОМПАС, Autocad др.) создаются трехмерные геометрические модели оборудования, инструментов и заготовки [8, 17]; виртуальное оборудование и рабочий инструмент; заготовка и технологический процесс или в целом виртуальный объект для компьютерного моделирования.

Виртуальный объект компьютерного моделирования имеет размеры, равные размерам природы, конфигурация, марка стали и размеры заготовки также соответствуют размерам природы, технологический процесс соответствует натуральному (изучаемому) технологическому процессу. Готовое виртуальное изделие имеет форму и размеры натуральной готовой продукции.

Для исследования прокатки шаров был создан виртуальный шаропрокатный стан, с помощью которого проводилось компьютерное моделирование технологического процесса прокатки металла в программных продуктах QForm-3D и DEFORM-3D. Решением ком-

пьютерного моделирования является математическая модель, представленная в графическом виде.

В качестве параметров оптимизации использовали основные инвариантные характеристики тензора напряжений [18]:

– интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

– компоненты тензора напряжений

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3;$$

– показатель напряженного состояния

$$k = \frac{\sigma_0}{T}, \quad k = \frac{\sqrt{3}}{3\sigma_i} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3);$$

здесь  $\sigma_0$  – среднее нормальное напряжение;  $T = \frac{\sqrt{3}}{3\sigma_i}$  – интенсивность касательных напряжений.

При моделировании инструменты принимаются абсолютно жесткими и обеспечивающими только теплопроводность и теплопередачу. Материал инструмента принимается отдельно в каждом случае моделирования. Взаимодействие между жестким инструментом и материалом заготовки моделируется с помощью контактных поверхностей. В процессе деформации контактные условия постоянно обновляются. Величина коэффициента трения принимается в каждом отдельном технологическом процессе.

В процессе деформации металла происходит теплообмен между металлом, инструментом и окружающей средой. Учитывается также наличие теплового эффекта за счет деформации металла. Начальная температура деформации рассчитывается из условий конкретного технологического процесса.

Рабочие валки виртуального прокатного стана имеют профиль в соответствии с разработанной калибровкой для прокатки шара номинальным диаметром 90 и 120 мм [4, 5, 19].

На рис. 1 представлена схема прокатных валков и заготовки в начальном положении перед прокаткой, где 1 и 2 – прокатные валки, 3 – нагретая заготовка, 4 – толкатель, 5 – проводка, 6 – линейки.

В соответствии с реальным технологическим процессом прокатные валки для виртуального стана изготовлены из стали 35ХГСА. Температура валков 200 °С. Материал заготовки сталь 40, температура нагрева заготовки 1000 °С, коэффициент трения 0,4. Скорость вращения валков составляет 60 об/мин, что соответствует скорости реального технологического процесса.

При исследовании напряженно-деформированного состояния при прокатке шара пренебрегали инерционными и массовыми силами, деформируемый металл за-

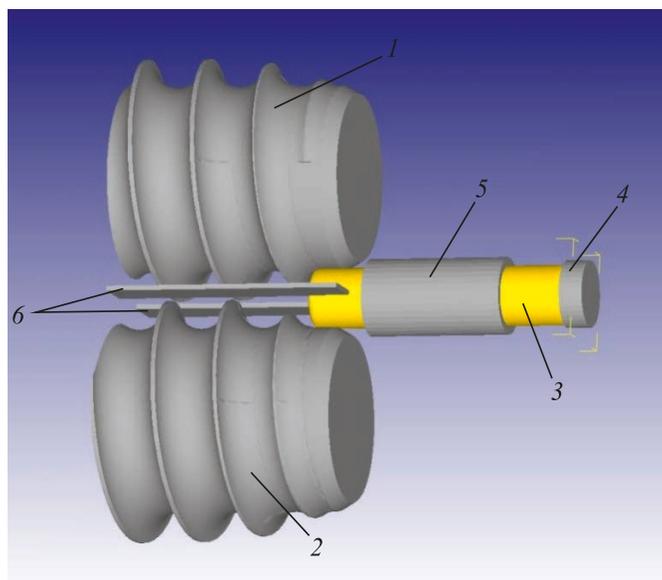


Рис. 1. Схема прокатки шаров в начальном положении

Fig. 1. Scheme of balls rolling in the initial position

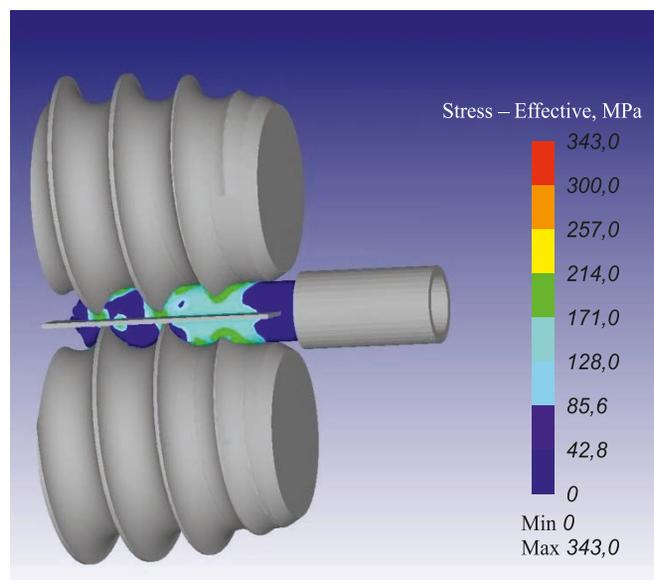


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений в заготовке

Fig. 2. Distribution of stress intensity in the blank

готовки считали несжимаемым. В уравнениях состояния использовали случай простого нагружения. Для материала проката принята упругопластическая модель.

Исследование формоизменения металла при прокатке шаров показало, что нагретая заготовка в виде прутка горячекатаной стали хорошо захватывается валками, процесс прокатки происходит стабильно без пробуксовок. Металл заготовки полностью заполняет калибры. Зазора между металлом и стенками калибра не наблюдается. Перемычки, соединяющие отформованные шары, полностью отделяются непосредственно в валках стана. При этом перемычка срезается ребордой валков и вдавливается в тело шара. Отделенный шар продолжает обкатываться на отделочном участке калибра, остатки перемычки заглаживаются, и из валков выходит полностью оформленный шар, имеющий гладкую поверхность.

На рис. 2 приведена объемная модель распределения интенсивности напряжений при прокатке шара. Справа приведена масштабная шкала. Можно отметить, что процесс прокатки симметричен относительно горизонтальной плоскости. Для количественного определения интенсивности напряжений были выбраны характерные точки в направлении прокатки по оси симметрии прокатываемого металла, вдоль осевой линии – оси  $X$ : точка 1 – передний торец валков; точка 2 – внедрение первой реборды; точка 3 – центр первого шара; точка 4 – внедрение второй реборды; точка 5 – центр второго шара. На рис. 3 приведена мозаика распределения интенсивности напряжений при прокатке шара в одном из положений валков. Как видно, интенсивность напряжений распределена по сечению шара неравномерно. Наибольшая величина интенсивности напряжений 180 – 220 МПа наблюда-



Рис. 3. Интенсивность напряжений при прокатке шара в одном из положений валков

Fig. 3. Stress intensity in ball rolling in one of the rolls positions

ется под ребордой при ее внедрении в металл заготовки. На отделочном участке, где происходит обкатка шаров, интенсивность напряжений значительно меньше.

Компоненты тензора напряжений измеряли также в выбранных характерных точках вдоль осевой линии прокатки. Результаты приведены в табл. 1.

Можно отметить, что все компоненты тензора напряжений имеют отрицательное значение, это гарантирует отсутствие разрушения металла при прокатке его на шаропрокатном стане.

Оценку количественной величины среднего нормального напряжения  $\sigma_0$  и показателя напряженного состояния  $k$  также проводили в характерных точках. В качестве примера ниже приведены результаты исследования в одном из положений валков:

|  |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Характерные точки                          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $\sigma_0, \text{Па} \cdot 10^8$ . . . . . | -7,78 | -9,83 | -7,40 | -7,16 | -7,95 |
| $k$ . . . . .                              | -3,65 | -4,46 | -2,90 | -2,28 | -3,40 |

Видно, что величина среднего нормального напряжения и показатель напряженного состояния во всех

Т а б л и ц а 1

**Компоненты тензора напряжений и интенсивность напряжений**

Table 1. Components of stress tensor and stress intensity

| Напряжение | Значения напряжений, $\times 10^8$ Па, в характерных точках |       |       |       |       |
|------------|---|-------|-------|-------|-------|
|            | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $\sigma_x$ | -8,06   | -9,48 | -7,01 | -8,78 | -7,99 |
| $\sigma_y$ | -8,07   | -9,96 | -6,88 | -5,43 | -7,10 |
| $\sigma_z$ | -7,22   | 10,04 | -8,30 | -7,26 | -8,77 |
| $\sigma_i$ | 1,23  | 1,27  | 1,47  | 1,81  | 1,35  |

Пр и м е ч а н и е.  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – напряжения соответственно вдоль оси прокатки, вдоль направления уширения, вдоль направления обжатия,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

точках деформированного металла отрицательны. Это означает, что напряженное состояние металла – объемное сжатие, что способствует пластической деформации металла без разрушения. Наибольшие значения среднего нормального напряжения и показателя напряженного состояния наблюдаются под первой ребордой прокатного вала.

Интенсивность деформаций при прокатке шара рассмотрена в работе [8].

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования установлено, что все компоненты тензора напряжений являются сжимающими. Такое напряженное состояние шара гарантирует отсутствие разрыхления металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия.

В подтверждение результатов компьютерного моделирования был проведен промышленный эксперимент прокатки шаров номинальным диаметром 90 и 125 мм на шаропрокатном стане по разработанной технологии. Для исследования отклонения массы полученных шаров от номинального веса было отобрано несколько партий шаров номинальным диаметром 90 и 125 мм по 30 штук в каждой партии. Шары отбирали после прокатки на новых валках – первая серия исследований и изношенных валках перед перевалкой – вторая серия исследований. Взвешивание каждого шара проводили на лабораторных прецизионных весах VM 1200 второго класса точности. Отбор шаров осуществляли сразу после прокатки на стане. Шары выбирали только заполненные, без видимых дефектов формы. После охлаждения шаров проводили их взвешивание. Результаты статистической обработки экспериментальных данных по взвешиванию шаров, приведены в табл. 2 [20], в которой  $S^2$  – выборочная дисперсия;  $S$  – среднее квадратическое отклонение.

Проверку качества внутренних слоев металла проводили после операций термической обработки и охлаждения шаров. Шары разрезали по диаметальному сечению, проходящему через полюса (место отрыва перемычек) шара, шлифовали поверхность темплета и удаляли поверхностный наклепанный слой. Затем проводили визуальный осмотр поверхности реза при 5-кратном увеличении. При осмотре поверхности раз-

Т а б л и ц а 2

**Результаты статистической обработки экспериментальных данных по взвешиванию шаров**

Table 2. Results of statistical processing of experimental data on ball weighing

| Диаметр шара, мм |             | $\bar{m}, \text{г}$     | $S^2$                         | $S$                   | $\Delta m, \text{г}$        | Погрешность, % |
|------------------|-------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|
| расчетный        | фактический |                         |                               |                       |                             |                |
| 120              | 125         | $\frac{7978,7}{8294,3}$ | $\frac{27\ 818,8}{29\ 721,9}$ | $\frac{166,8}{172,4}$ | $\frac{\pm 62,1}{\pm 64,2}$ | $\pm 0,80$     |
| 90               | 93          | $\frac{3308,0}{3329,0}$ | $\frac{2776,7}{3269,8}$       | $\frac{52,69}{57,18}$ | $\frac{\pm 19,6}{\pm 21,3}$ | $\pm 0,63$     |

Пр и м е ч а н и е. Числитель – новые валки; знаменатель – изношенные валки.

реза дефектов в виде пористости или микротрещин не обнаружено. Далее проводили замеры (с шагом 5 мм) твердости по всему сечению шара.

Замеры твердости в диаметральной плоскости шара номинальным диаметром 90 мм из низколегированной стали после термической обработки приведены на рис. 4. Исследования замеров твердости по горизонтальной и вертикальной осям шара показали, что шар имеет одинаковую твердость 55 – 60 HRC (среднее значение 57,1) как по вертикальной, так и по горизонтальной осям симметрии.

Аналогичные замеры твердости по горизонтальной и вертикальной осям шара номинальным диаметром 120 мм из углеродистой стали приведены в работе [8].

**Выводы.** Наличие сжимающих напряжений при прокатке шара и отсутствие провалов твердости во внутренних его слоях гарантируют отсутствие разрушения металла при его прокатке на шаропркатном стане и обеспечивают получение качественного изделия без трещин и разрыхления металла в сердцевине заготовки.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарич, М.В. Васильчиков и др. – М.: Металлургия, 1971. – 336 с.
2. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. – М.: Металлургия, 1980. – 116 с.
3. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 9 – 10. P. 363 – 367.
4. Peretyatko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Roller grooving in ball-rolling mills. Part 1 // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 4. P. 168 – 170.
5. Перетяtko В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропркатного стана. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 16 – 20.
6. Романенко В.П., Сизов Д.В. Компьютерное моделирование процесса винтовой прокати крупных заготовок в двухвалковом стане // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 13 – 16.
7. Chumachenko E.N., Aksenov S.A., Logashina I.V. Mathematical modeling and energy conservation for roling in passes // Metallurgist. 2010. No. 8. P. 498 – 503.
8. Филиппова М.В., Сметанин С.В., Перетяtko В.Н. Компьютерное моделирование прокати шаров большого диаметра // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2016. № 9. С. 75 – 78.
9. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the Deform 3D software package // Russian Metallurgy (Metally). 2011. No. 3. P. 188 – 193.
10. Liu F., Shan D., Lü Y. Experimental study and numerical simulation of isothermal closed die forging for aluminum alloy rotor // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. 2005. Vol. 15. No. 2. С. 136 – 141.
11. Kapustova M., Kravarik L., Bliznak J. Computer simulation of precision die forging // Machine design. 2011. Vol. 3. No. 2. P. 143 – 146.
12. Gohil D., Maisuria M. Computer Simulation Technique for the Closed Die Forging Process: A Modular Approach // Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on system science and simulation in engineering. 2008. P. 61 – 66.

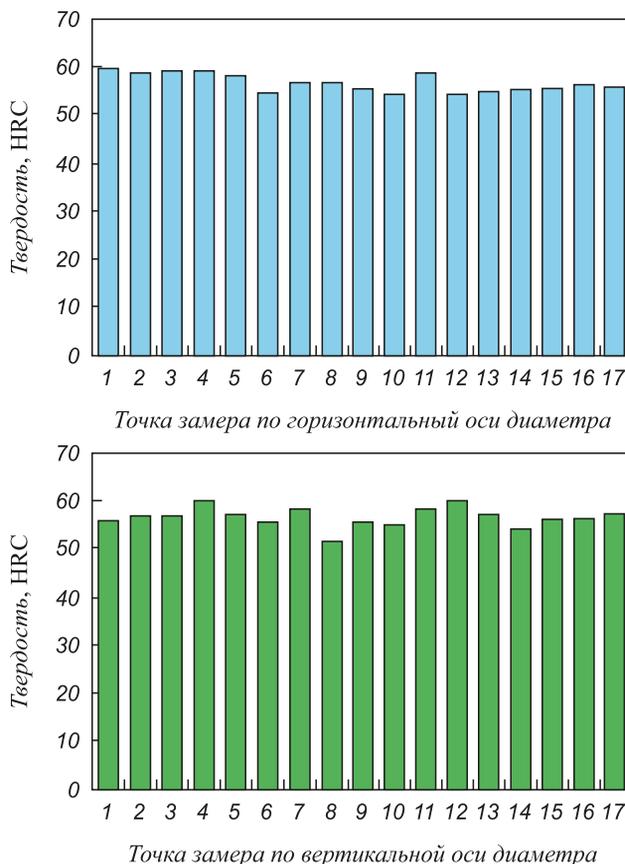


Рис. 4. Распределение твердости по осям шара диам. 90 мм

Fig. 4. Distribution of hardness along the axes of the ball of 90 mm in diameter

13. Ulik A., Kravarik L., Bernadic L. Research of metal flow in closed die in precision forging // Slovak university of technology in Bratislava. 2009. No. 27. P. 113 – 118.
14. Slagter W., Florie C., Venis A. Advances in Three-Dimensional Forging Process Modelling // Proceedings of the 15th National Conference on Manufacturing Research. 1999. P. 73 – 78.
15. Скрипаленко М.М. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования прошивки слитков в двухвалковом стане винтовой прокатки // Кузнечно-штамповочное производство. 2016. № 12. С. 22 – 26.
16. Ershov A.A., Loginov Y.N., Demakov S.L. Assessing the consequences of the softening of metal during hot-working by using the software package QForm V8 // Metallurgist. 2015. Vol. 59. No. 7. P. 659 – 663.
17. Максимов В.М., Хлыбов О.С. Моделирование процессов прошивки в стане винтовой прокатки с использованием QForm // Кузнечно-штамповочное производство. 2016. № 12. С. 17 – 21.
18. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформация, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
19. Перетяtko В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков для прокатки шара // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2012. Вып. 30. С. 44 – 50.
20. Перетяtko В.Н. Шаровая заготовка // Заготовительное производство в машиностроении. 2012. № 3. С. 17 – 19.

Поступила 5 июня 2017 г.

## MATHEMATICAL MODELING OF BALLS ROLLING

*M.V. Filippova, M.V. Temlyantsev, V.N. Peretyat'ko, E.E. Prudkii*

Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

**Abstract.** The paper presents the results of simulation of rolling of balls precise in mass with diameters of 93 and 125 mm in screw calibers in QForm-3D and DEFORM-3D, the stages and initial data of creating a virtual model of ball-rolling mill are described. The stress state of the metal in characteristic points along the rolling axis was analyzed: stress intensity, stress tensor components, average normal stress. The results of mass measurements of balls rolled on new and worn rolls are presented. The quality check of the inner layers of metal was carried out and the hardness of the rolled balls was measured along the vertical and horizontal axes of ball symmetry. Investigation of metal deformation in simulation of ball rolling has shown that heated billet in form of hot-rolled steel rod is well gripped by rolls, rolling process is stable without slipping. Billet metal fills the gauges completely. There are no gaps observed between metal and gauges walls. Breaker cores connecting molded balls are completely separated in the mill rolls. In this case, core is cut by the rolls flange and is pressed into the ball body. Separated ball continues to roll in gauge finishing section, core remains are smoothed, and completely formed ball with a smooth surface appears from the rolls. It was established that in stress-strain state modeling all components of stress tensor have negative value, that is, all components of stress tensor during balls rolling are compressive. Statistical processing of data on weighing rolled balls with a diameter of 93 mm and 125 mm shows that deviation of mass from the nominal does not exceed 1 %. Measurements of hardness along the balls diametric section shows absence of hardness failures in the inner layers of rolled metal, which indicates a good quality of core zone.

**Keywords:** mathematical simulation, computer simulation, ball, ball rolling mill, cross rolling, ball quality, stress-strain state, statistical processing, ball hardness, average normal stress.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-7-516-521

## REFERENCES

1. Tselikov A.I., Barbarich M.V., Vasil'chikov M.V. etc. *Spetsial'nye prokatnye stany* [Special rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 336 p. (In Russ.).
2. Granovskii S.P. *Novye protsessy i stany dlya prokatki izdelii v vintovykh kalibrakh* [New processes and mills for products rolling in screw calibers]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 116 p. (In Russ.).
3. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills. *Metallurgist*. 2001, vol. 45, no. 9-10, pp. 363–367.
4. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Roller grooving in ball-rolling mills. Part 1. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 4, pp. 168–170.
5. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of rolls of a ball-rolling mill. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 6, pp. 16–20. (In Russ.).
6. Romanenko V.P., Sizov D.V. The computer modeling of the helical rolling of large workpieces on a two-high mill. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 11, pp. 13–16. (In Russ.).
7. Chumachenko E.N., Aksenov S.A., Logashina I.V. Mathematical modeling and energy conservation for rolling in passes. *Metallurgist*. 2010, no. 8, pp. 498–503.
8. Filippova M.V., Smetanin S.V., Peretyat'ko V.N. Computer simulation of large-diameter balls rolling. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 9, pp. 75–78. (In Russ.).
9. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the Deform 3D software package. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 3, pp. 188–193.
10. Liu F., Shan D., Lü Y. Experimental study and numerical simulation of isothermal closed die forging for aluminum alloy rotor. *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*. 2005, vol. 15, no. 2, pp. 136–141.
11. Kapustova M., Kravarik L., Bliznak J. Computer simulation of precision die forging. *Machine design*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 143–146.
12. Gohil D., Maisuria M. Computer Simulation Technique for the Closed Die Forging Process: A Modular Approach. *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on system science and simulation in engineering*. 2008, pp. 61–66.
13. Ulik A., Kravarik L., Bernadic L. Research of metal flow in closed die in precision forging. *Slovak university of technology in Bratislava*. 2009, no. 27, pp. 113–118.
14. Slagter W., Florie C., Venis A. Advances in three-dimensional forging process modeling. *Proceedings of the 15th National Conference on Manufacturing Research*. 1999, pp. 73–78.
15. Skripalenko M.M. Computer modeling and experimental studies of pinning of ingots in a twin-roll mill of screw rolling. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2016, no. 12, pp. 22–26. (In Russ.).
16. Ershov A.A., Loginov Y.N., Demakov S.L. Assessing the consequences of the softening of metal during hot-working by using the software package QForm V8. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 7, pp. 659–663.
17. Maksimov V.M., Khlybov O.S. Simulation of the firmware processes in the screw rolling mill using QForm. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2016, no. 12, pp. 17–21. (In Russ.).
18. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsiya, razrushenie* [Stresses, deformation, destruction]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 229 p. (In Russ.).
19. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of rolls for ball rolling. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2012, vol. 30, pp. 44–50. (In Russ.).
20. Peretyat'ko V.N. Ball blank. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii*. 2012, no. 3, pp. 17–19. (In Russ.).

## Information about the authors:

*M.V. Filippova*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science". OJSC "EVRAZ ZSMK" (flippova\_mv@mail.ru)

*M.V. Temlyantsev*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology", Vice-Rector for Research and Innovations (uchebn\_otdel@sibsiu.ru)

*V.N. Peretyat'ko*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science". OJSC "EVRAZ ZSMK" (kafkshp@sibsiu.ru)

*E.E. Prudkii*, Postgraduate of the Chair "Metal Forming and Metal Science". OJSC "EVRAZ ZSMK" (kafkshp@sibsiu.ru)

Received July 6, 2017