УДК 621.771.294

ВЛИЯНИЕ СХЕМ ШТАМПОВКИ КОЛЕСНЫХ ЗАГОТОВОК НА СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФОРМОВОЧНОГО ПРЕССА И ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ДЕФОРМАЦИИ

Снитко С.А., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением» (snitko_sa@mail.ru)
Яковченко А.В., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (mond1991@mail.ru)
Сотников А.Л., д.т.н., профессор кафедры «Механическое оборудование заводов
черной металлургии» (0713019870@mail.ru)

Донецкий национальный технический университет
(83001, Украина, Донецк ул. Артема, 58)

Аннотация. Обеспечение стабильности размеров штампованно-катаных железнодорожных колес, рациональных силовых режимов работы прессов и высокой стойкости деталей инструмента деформации металла, а также уменьшения массы исходных заготовок являются актуальными научно-техническими задачами. Указанная стойкость во многом определяет затраты, связанные с выбором марки стали для штампов, технологии их изготовления и технологической смазки. В настоящей работе на основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен анализ влияния схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса и износ инструмента деформации применительно к современным прессопрокатным линиям. Показано, что схемы штамповки, которые предусматривают регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями подаваемой в штампы заготовки, характеризуются рациональным силовым режимом формовочного пресса. Величина средней силы в этом случае составляет 63 – 70 % от величины средней силы при штамповке из заготовки, осажженной гладкими плитами. Исключение преждевременного заполнения ступицы способствует уменьшению средней (по верхнему и нижнему штампам) величины износа формовочных штампов на 20 – 24 %. Установлено, что в процессе обжатия металла в области диска, чем раньше образуется подпор течению металла со стороны формовочного кольца, тем меньше величина проскальзывания деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в зонах их наиболее интенсивного износа (перехода от диска к ободу) и, как следствие, меньше величина износа. Также определено, что схема деформирования металла в формовочных штампах, обеспечивающая заполнение гребня при осевом обжатии металла в зоне обода, снижает проскальзывание металла относительно поверхности формовочных штампов в местах перехода от диска к ободу. Дополнительное снижение величины износа в этом случае составляет 27 – 33 %. Стабильность размеров штампованно-катаных железнодорожных колес возможна на основе схем штамповки, обеспечивающих регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями заготовки и ее самоцентрировки в формовочных штампах. Это позволит уменьшить массу исходных заготовок на 7 – 10 кг.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, схема штамповки, колесная заготовка, силовой режим, формовочный пресс, штампы, износ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-385-392

Проблемы модернизации прессопрокатного оборудования [1 – 3], совершенствования применяемой технологии в части реализации рациональных силовых режимов работы и высокой стойкости деталей [4, 5], а также повышения качества исходных заготовок и снижения расходного коэффициента [6 – 10] являются актуальными научно-техническими задачами металлургической отрасли.

При освоении новой прессопрокатной линии ОАО «Евраз Нижнетагильский металлургический комбинат» (НТМК), специалистами комбината было установлено, что, несмотря на высокое качество исходной заготовки, высокую степень автоматизации и компьютеризации технологического процесса, разработанная фирмой SMS – EUMUCO технология штамповки колесных заготовок не позволила получить стабильные размеры черновых колес при использовании исходных заготовок из непрерывнолитого металла собственного производства [10].

Разработка и внедрение на заготовочном прессе силой 50 МН (R5000) технологии осадки заготовок в верхнем плавающем технологическом кольце позволили стабилизировать их наружный диаметр, повысить точность размеров колесных заготовок на формовочном прессе и снизить брак на прокате [10].

Вместе с тем, эта технология не позволяет выполнять разгонку заготовок. Указанная операция является крайне необходимой при производстве многих типоразмеров колес и, в первую очередь, при штамповке заготовок колес диаметром 957 мм с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011, доля которых в годовом объеме производства обычно велика.

При штамповке на формовочном прессе силой 90 МН (R9000) колесных заготовок для колес диаметром 957 мм из осажженной на прессе R5000 заготовки без разгонки («плюшки») имеет место односторонняя схема течения металла из зоны диска в зону обода при повышенной силе штамповки. Причиной является на-

личие избыточного объема металла в центральной части заготовки, который преждевременно заполняет формовочные штампы в зоне ступицы.

В работах [11, 12] предложены новые способы штамповки колесных заготовок, которые позволяют выполнять на прессе R5000 регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями заготовки, обеспечивают их самоцентрировку на формовочном прессе R9000 и получение стабильных размеров колесных заготовок.

Наряду с получением требуемых параметров по геометрии, макро- и микроструктуре, а также механических свойств изделий [10 – 19], одним из важных критериев оценки эффективности применяемых схем деформирования является их влияние на силовой режим прессопрокатного оборудования и стойкость деформирующего инструмента.

В колесопрокатном производстве повышение указанной стойкости является актуальной задачей, так как именно она во многом определяет затраты, связанные с выбором марки стали для штампов, технологии их изготовления и технологической смазки [16, 17].

Целью настоящей работы являлось изучение влияния схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса R9000 и износ инструмента деформации.

Анализ формоизменения металла, силовых и температурных параметров, а также износа штампов при формовке колесных заготовок на прессе R 9000 выполняли на основе результатов конечно-элементного моделирования процесса штамповки в системе DEFORM-3D. При этом решали объемную задачу для сектора, имеющего угол 90°. Штампы моделировали как недеформируемые объекты. Они были разбиты сеткой и для них, так же как и для заготовки, решали задачу теплопередачи. В качестве материала для штампов использовали имеющуюся в библиотеке DFORM-3D штамповую сталь AISI-H-13 с соответствующими механическими и теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры. Твердость материала штампов приняли независимой от температуры, равной 41HRC.

Для колесной заготовки применяли пластическую модель материала, кривые течения рассчитали для колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791-2011) [20]. Используемые при моделировании теплофизические свойства колесной стали взяли из базы данных DEFORM-3D для высокоуглеродистой стали.

Начальную температуру штампов приняли равной 20 °С. Заготовка перед штамповкой имела неравномерное температурное поле в диапазоне 1100 – 1260 °С, полученное путем конечно-элементного моделирования транспортировки заготовки от нагревательной печи к прессу R5000 (с учетом гидросбива окалины с торцевых поверхностей заготовки), ее деформирования на прессе R5000 и транспортировки к прессу R9000. Используемые при моделировании значения скоростей ра-

бочего хода траверс пресса были равны: 0,03 м/с – для пресса R5000; 0,01 м/с – для пресса R9000.

При сравнительной оценке различных схем штамповки колесных заготовок учитывали только абразивный износ. Для расчета величины износа W использовали модель Арчарда [18, 19]:

$$W = \int_0^t K \frac{p^a \vartheta^b}{H^c} dt, \quad (1)$$

где ϑ , p – скорость проскальзывания металла относительно инструмента и давление на контактной поверхности соответственно; K , a , b , c – эмпирические коэффициенты; H – твердость материала штампов; t – время протекания процесса.

Значения эмпирических коэффициентов использовали следующие: $K = 2 \cdot 10^{-6}$, $a = b = 1$, $c = 2$.

Напряжение контактного трения определили как долю от величины напряжения течения металла на сдвиг:

$$\tau_{тр} = mk, \quad (2)$$

где $\tau_{тр}$ – напряжение трения; m – фактор сил трения; k – напряжение течения металла заготовки на сдвиг.

Значение фактора сил трения соответствовало условиям горячего деформирования металла со смазкой ($m = 0,3$).

Выполнен анализ трех схем штамповки колесной заготовки (рис. 1 – 3) для колес диаметром 957 мм с плоскоконическим диском по ГОСТ 10791-2011:

А – схема штамповки колесной заготовки из «плюшки» [10] (используемая на прессопрокатной линии ОАО «Евраз НТМК»);

Б – схема штамповки колесной заготовки [11] из заготовки с предварительно сформованными частями обода и ступицы с нижней стороны заготовки, которая предусматривает ее самоцентрировку в формовочных штампах (см. рис. 2, а);

В – схема штамповки колесной заготовки [12], предусматривающая ее самоцентрировку в формовочном кольце (см. рис. 3, а).

Результаты моделирования показали, что при штамповке колесных заготовок по всем трем схемам температура штампов в последний момент штамповки достигает 400 °С.

Анализ результатов также показал, что при штамповке колесной заготовки из «плюшки» штампы в зоне ступицы заполняются задолго до окончания процесса формовки (см. рис. 1, б). В результате этого имеет место недоштамповка колесной заготовки на 2,3 мм (см. рис. 1, в) в связи с тем, что необходимая для продолжения деформирования металла сила даже при работе пресса в режиме выдержки под нагрузкой (см. рис. 1, г) превышает допустимую величину (90 МН). Кроме этого, доштамповка колесной заготовки в режиме выдержки, максимально развиваемой прессом силы в течение

Рис. 1. Штамповка колесной заготовки по схеме А:
а – первый момент штамповки; б – промежуточный момент штамповки (зазор между штампами 6,5 мм); в – последний момент штамповки (зазор между штампами 2,3 мм); г – штамповка в режиме выдержки под нагрузкой 90 МН (зазор между штампами 1,5 мм)

Fig. 1. Stamping of a wheel billet according to the scheme А:
а – the first moment of stamping; б – transitional moment of stamping (gap between dies is 6.5 mm); в – the last moment of stamping (a gap between dies is 2.3 mm); г – stamping in the dwell mode under the load of 90 MN (the gap between the dies is 1.5 mm)

2 – 5 с, приводит к увеличению длительности контакта деформируемого металла с инструментом и, следовательно, к его дополнительному разогреву.

При штамповке колесных заготовок по схемам Б и В силовой режим работы прессы является рациональным (величина средней силы для условий формовки в этом случае составляет 63 – 70 % от величины соответствующей средней силы при штамповке из «плюшки») и характеризуется постепенным нарастанием необходимой для реализации процесса формовки силы (см. рис. 2, б; 2, в). Ее максимальная величина нужна лишь в последний, кратковременный момент

штамповки (см. рис. 2, в; 3, в). При этом работа прессы R9000 в режиме выдержки под нагрузкой, как при штамповке по схеме А (см. рис. 1, г), не требуется.

Анализ результатов моделирования процесса износа инструмента деформации (рис. 4 – 6) позволил установить следующее. Исключение преждевременного заполнения ступицы (схема Б) и, соответственно, одностороннего течения металла на заключительной стадии штамповки способствует уменьшению средней (по верхнему и нижнему штампам) величины износа формовочных штампов на 20 – 24 %.

Как показали расчеты, наиболее существенным фактором, определяющим износ штампов, является величина проскальзывания деформируемого металла относительно поверхностей инструмента деформации (рис. 7, 8). Величины же контактных давлений по трем рассмотренным схемам получены близкими.

Установлено, что в процессе обжатия металла в области диска, чем раньше образуется подпор течению металла со стороны формовочного кольца (см. рис. 3, а), тем меньше величина проскальзывания деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в зонах их наиболее интенсивного износа (пе-

Рис. 2. Штамповка колесной заготовки по схеме Б:
а – первый момент штамповки; б – промежуточный момент штамповки (зазор между штампами 6,5 мм); в – последний момент штамповки (зазор между штампами отсутствует)

Fig. 2. Stamping of a wheel billet according to the scheme Б:
а – the first moment of stamping; б – transitional moment of stamping (gap between dies is 6.5 mm); в – the last moment of stamping (a gap between dies is absent)

Рис. 3. Штамповка колесной заготовки по схеме В:
а – первый момент штамповки; б – промежуточный момент штамповки (зазор между штампами 6,5 мм); в – последний момент штамповки (зазор между штампами отсутствует)

Fig. 3. Stamping of a wheel billet according to the scheme B:
а – the first moment of stamping; б – transitional moment of stamping (gap between dies is 6.5 mm); в – the last moment of stamping (a gap between dies is absent)

переход от диска к ободу) (см. рис. 7, 8) и, как следствие, меньше величина износа.

Как видно из рис. 7, 8, для схем штамповки Б и В характерно наличие зон повышенного проскальзывания деформируемого металла по верхнему инструменту деформации в области сопряжения поверхности катания обода и гребня формируемой колесной заготовки и расположенной под ней плоской части нижнего инструмента деформации.

Вместе с тем, указанные зоны наблюдаются непродолжительное время на заключительном этапе процесса штамповки (этапе формирования гребня) и не оказывают существенного влияния на суммарную величину износа, а также не приводят к образованию в них повышенного износа (см. рис. 5, а; 6, а).

Также установлено, что схема деформирования металла в формовочных штампах, обеспечивающая заполнение гребня при осевом обжатии металла в зоне обода (схема В, см. рис. 3, б), снижает проскальзывание деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в местах перехода от диска к ободу (см. рис. 7, 8) и, в конечном итоге, способствует уменьшению величины износа штампов (см. рис. 6).

Дополнительное снижение величины износа при штамповке по схеме В составило 27 – 33 %.

Таким образом, на основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен анализ влияния схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного пресса и износ инструмента деформации применительно к современным прессо-прокатным линиям.

Показано, что использование схем штамповки, которые предусматривают регламентированное распределение металла между ее центральной и периферийной частями, характеризуется рациональным силовым режимом. Во-первых, величина средней силы в этом случае составляет 63 – 70 % от величины средней силы при штамповке из «плюшки». Во-вторых, в этом случае имеет место постепенное нарастание необходимой для реализации процесса формовки силы, причем ее максимальная величина необходима лишь в последний, кратковременный момент штамповки. При этом работа формовочного пресса в режиме выдержки под нагрузкой не требуется.

Исключение преждевременного заполнения ступицы и, соответственно, одностороннего течения металла на заключительной стадии штамповки способст-

Рис. 4. Результаты моделирования износа штампов при штамповке колесной заготовки по схеме А:
а – верхний штамп; б – нижний штамп

Fig. 4. Results of modeling the dies wear during stamping the wheel billet according to scheme A:
а – upper die; б – lower die

Рис. 5. Результаты моделирования износа штампов при штамповке колесной заготовки по схеме Б:
а – верхний штамп; б – нижний штамп

Fig. 5. Results of modeling the dies wear during stamping the wheel billet according to scheme B:
а – upper die; б – lower die

Рис. 6. Результаты моделирования износа штампов при штамповке колесной заготовки по схеме В:
а – верхний штамп; б – нижний штамп

Fig. 6. Results of modeling the dies wear during stamping the wheel billet according to scheme B:
а – upper die; б – lower die

вует уменьшению средней (по верхнему и нижнему штампам) величины износа формовочных штампов на 20 – 24 %. Установлено, что в процессе обжатия металла в области диска, чем раньше образуется подпор течению металла со стороны формовочного кольца, тем меньше величина проскальзывания деформируемого металла относительно поверхности формовочных штампов в зонах их наиболее интенсивного износа (перехода от диска к ободу) и, как следствие, меньше величина износа.

Также установлено, что схема деформирования металла в формовочных штампах, обеспечивающая заполнение гребня при осевом обжатии металла в зоне обода, снижает проскальзывание металла относительно поверхности формовочных штампов в местах перехода от диска к ободу и, в конечном итоге, способствует уменьшению величины износа штампов. Дополнительное снижение величины износа в этом случае составляет 27 – 33 %.

Обеспечение стабильности размеров черновых штампованно-катаных железнодорожных колес на современных прессопрокатных линиях, в составе которых перед колесопрокатным станом установлено не три (как в условиях АО «Выксунский металлургический

завод» и ПАО «Интерпайп Нижнеднепровский трубопрокатный завод»), а только два пресса, возможно на основе схем штамповки колесных заготовок, представленных на рис. 2, 3. Указанные схемы обеспечивают выполнение операций разгонки заготовок, устранение их асимметрии, а также самоцентрировки колесных заготовок на прессе R9000. Возможность получения осесимметричных колесных заготовок и черновых колес, как показали результаты моделирования, позволяет уменьшить массу исходной заготовки (соответствующую номинальным размерам) с 483 до 475 кг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Bogatov A.A., Puzyrev S.S. Modernization of railroad wheel manufacturing technology at Evraz Ntmk // Metallurgist. 2017. 60 (9 – 10). P. 1080 – 1086.
2. Gorbatyuk S.M., Pavlov S.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experience in application of screw rolling mill for deforming the billets of refractory metals // Metallurg. 1998. (5). P. 32 – 35.
3. Gorbatyuk S.M., Pavlov V.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experimental use of rotary rolling mills to deform compacts of refractory metals // Metallurgist. 1998. 42 (5 – 6). P. 178 – 183.
4. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls // Metallurgist. 2012. 56 (3 – 4). P. 279 – 283.

Рис. 7. Результаты моделирования скорости проскальзывания металла относительно верхнего инструмента деформации при штамповке колесной заготовки:

а – по схеме А; б – по схеме Б; в – по схеме В

Fig. 7. Results of modeling the metal slippage speed relative to the upper deformation tool during stamping of the wheel billet:
а – according to scheme А; б – according to scheme Б; в – according to scheme В

Рис. 8. Результаты моделирования скорости проскальзывания металла относительно нижнего инструмента деформации при штамповке колесной заготовки:

а – по схеме А; б – по схеме Б; в – по схеме В

Fig. 8. The results of modeling the metal slippage speed relative to the lower deformation tool during stamping of the wheel billet:
а – according to scheme А; б – according to scheme Б; в – according to scheme В

5. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories // Metallurgist. 2008. 52 (7 – 8). P. 420 – 423.
6. Vdovin K.N., Tochilkin Viktor V., Tochilkin Vasilii V. Technologies for controlling flows of steel and the development of refractory structures for the tundish of a four-strand continuous caster // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57. No. 1. P. 6 – 8.
7. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Petrenko Y.P., Bogatov A.A. Production of high-quality railroad wheels // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. Issue 3. P. 268 – 272.
8. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Shestak V.D. etc. Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. Issue 12. P. 1098 – 1100.
9. Yakovchenko A.V., Perkov B.A., Korzh D.V. etc. The ways for lowering in metal consumption upon production of seamless rolled wheels // Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost. 2002. Issue 4. P. 42 – 44.
10. Кушнарєв А.В. Разработка научных основ и внедрение современной технологии производства железнодорожных колес с высокими эксплуатационными характеристиками // Иннова-

ционные технологии в металлургии и машиностроении: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: Унив. Тип. «Альфа Принт», 2012. С. 626 – 637.

11. Снитко С. А., Яковченко А. В. Механизм исправления асимметрии при штамповке колесных заготовок // Обработка материалов давлением: Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. № 4(33). С. 95 – 99.
12. Снитко С.А. Технологические схемы и механизмы, обеспечивающие повышение точности и стабильности размеров штампованных колесных заготовок // Сталь. 2013. № 10. С. 72 – 80.
13. Solomonov K.N. Application of CAD/CAM systems for computer simulation of metal forming processes // Materials Science Forum. 2012. Vol. 704 – 705. P. 434 – 439.
14. Larin S.N., Platonov V.I., Solomonov K.N. Approach to assessment of microdamages accumulated during the constrained molding of shells made of the material subject to energy theory of creep and damage // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 679 – 684.
15. Данченко В.Н., Дья Х., Шрамко А.В. и др. Исследование напряженного состояния формовочных штампов и условий контактного трения с помощью компьютерного моделирования

при штамповке заготовок железнодорожных колес // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2012. № 46(952). С. 28 – 32.

16. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Богатов А.А. и др. Стойкость штампового инструмента при изготовлении железнодорожных колес // Производство проката. 2015. № 5. С. 46 – 48.
17. Бобырь С.В., Демина Е.Г., Беседнов С.В. и др. Влияние химического состава и типа поверхностных дефектов на стойкость штампов прессы 10 000 тонн из низколегированных сталей // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 1. С. 65 – 69.

18. Дья Х., Сыгут М. Теоретический анализ износа калибров в процессе прокатки круглых прутков // Вестник МГТУ им. Г.Н. Носова. 2013. № 3. С. 41 – 47.
19. Рычков С.С., Кинзин Д.И. Моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы // Калибровочное бюро. 2013. Вып. 1. С. 29 – 42.
20. Snitko S., Duzhuzhi A. Features finite-element modeling of the deformation exact mass // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2012. Vol. 9. No. 9. P. 1505 – 1510.

Поступила 18 декабря 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 5, pp. 385–392.

INFLUENCE OF WHEEL BILLET STAMPING SCHEMES ON POWER MODES OF FORMING PRESS OPERATION AND ON WEAR OF THE DEFORMATION TOOL

S.A. Snitko, A.V. Yakovchenko, A.L. Sotnikov

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Abstract. Ensuring the stability of the dimensions of the stamped-rolled railway wheels, the rational power modes of the press operation and durability of the metal deformation tool parts, as well as reduction of the initial billets mass, are actual scientific and technical tasks. This durability largely determines the costs associated with the choice of steel grade for dies, technology of their manufacture and process lubrication. In the present work, based on the results of finite element modeling, the analysis of the influence of stamping schemes of wheel billets on the power modes of operation of a forming press and on wear of the deformation tool was made in relation to modern press rolling lines. It is shown that the stamping schemes, which provide for the regulated distribution of metal between the central and peripheral parts of the billet delivered to the stamps, are characterized by a rational power mode of the forming press. The average force in this case is 63 – 70 % of the average force when stamping out of the billets, sagged by smooth slabs. Elimination of premature filling of the hub contributes to a decrease in the average (by the upper and lower stamps) of the wear of molding dies by 20 – 24 %. It was established that in the process of metal reduction in the disk zone, as the earlier formation of the resistance to flow of metal from the side of the molding ring is formed, the smaller slip of the deformable metal relative to the surface of the molding dies is in the zones of their most intense wear (the transition from the disk to the rim) and, as a consequence, less wear amount appears. It has also been found that the metal deformation scheme in molding dies ensuring filling of the flange during axial metal reduction in the rim zone, decrease the metal slippage relatively to the surface of the molding dies at the zones of transition from the disc to the rim. The additional decrease of wear in this case is 27 – 33 %. Ensuring the dimensions stability of the stamped-rolled railway wheels is possible on the basis of stamping schemes, providing a regulated distribution of metal between the central and peripheral parts of the billet and its self-centering in molding dies. This will reduce the weight of the initial billet by 7 – 10 kg.

Keywords: railway wheel, stamping scheme, wheel billet, power mode, forming press, dies, wear.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-385-392

REFERENCES

1. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Bogatov A.A., Puzyrev S.S. Modernization of railroad wheel manufacturing technology at Evraz Ntmk. *Metallurgist*. 2017, 60 (9-10), pp. 1080–1086.
2. Gorbatyuk S.M., Pavlov S.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experience in application of screw rolling mill for deforming the billets of refractory metals. *Metallurg*. 1998 (5), pp. 32–35. (In Russ.).
3. Gorbatyuk S.M., Pavlov V.M., Shapoval A.N., Gorbatyuk M.S. Experimental use of rotary rolling mills to deform compacts of refractory metals. *Metallurgist*. 1998, 42 (5-6), pp. 178–183.
4. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls. *Metallurgist*. 2012, 56 (3-4), pp. 279–283.
5. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. *Metallurgist*. 2008, 52 (7-8), pp. 420–423.
6. Vdovin K.N., Tochilkin Viktor V., Tochilkin Vasilii V. Technologies for controlling flows of steel and the development of refractory structures for the tundish of a four-strand continuous caster. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016, vol. 57, no. 1, pp. 6–8.
7. Kushnarev A.V., Kirichkov A. A., Petrenko Y.P., Bogatov A. A. Production of high-quality railroad wheels. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40. Issue 3, pp. 268–272.
8. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Shestak V.D. etc. Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, Issue 12, pp. 1098–1100.
9. Yakovchenko A.V., Perkov B.A., Korzh D.V., Roslik A.V., Lugovoj A.V., Ivleva N.I. The ways for lowering in metal consumption upon production of seamless rolled wheels. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*. 2002, no. 4, pp. 42–44. (In Russ.).
10. Kushnarev A.V. Development of scientific foundations and introduction of modern production technology of railway wheels with high performance characteristics. In: *Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii: Sb. nauch. trudov* [Innovative technologies in metallurgy and machine building: Coll. of sci. papers]. Ekaterinburg: Al'fa Print, 2012, pp. 626–637. (In Russ.).
11. Snitko S.A., Yakovchenko A.V. Mechanism of asymmetry correcting at wheel billets stamping of. In: *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr.* [Materials forming: Collection of sci. papers]. Kramatorsk: DGMA, 2012, no. 4(33), pp. 95–99. (In Russ.).
12. Snitko S.A. Technological schemes and mechanisms, providing an increase the precision and stability of the dimensions of stamped wheel billets. *Stal'*. 2013, no. 10, pp. 72–80. (In Russ.).
13. Solomonov K.N. Application of CAD/CAM systems for computer simulation of metal forming processes. *Materials Science Forum*. 2012, vol. 704-705, pp. 434–439.
14. Larin S.N., Platonov V.I., Solomonov K.N. Approach to assessment of microdamages accumulated during the constrained molding of shells made of the material subject to energy theory of creep and damage. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 679–684.
15. Danchenko V.N., Dyja H., Shramko A.V., Ashkelyanets A.V., Chukhleb V.L. Investigation of the stressed state of molding dies and contact friction conditions using computer simulations at stamping of railway wheel billets. *Visnik NTU "KhPI". Seriya: Novi rishennya v suchasnikh tekhnologiyakh*. 2012, no. 46(952), pp. 28–32. (In Russ.).

16. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Bogatov A.A., Telyashov N.V., Teplov V.Yu. Durability of die tools at production of railway wheels. *Proizvodstvo prokata*. 2015, no. 5, pp. 46–48. (In Russ.).
17. Bobyr' S.V., Demina E.G., Besednov S.V., Strizhko O.D. Effect of chemical composition and type of surface defects on the durability of dies of press 10,000 tons of low-alloyed steels. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2014, no. 1, pp. 65–69. (In Russ.).
18. Dyja H., Sygut M. Theoretical analysis of grooves wear in rounds rolling. *Vestnik MGTU im. G.N. Nosova*. 2013, no. 3, pp. 41–47. (In Russ.).
19. Rychkov S.S., Kinzin D.I. Modeling of rolls wear by the finite elements method at rolling in grooves of simple shape. *Kalibrovochnoe byuro*. 2013, Issue 1, pp. 29–42. (In Russ.).
20. Snitko Sergey, Duzhurzhi Alexander. Features finite-element modeling of the deformation exact mass. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2012, vol. 9, no. 9, pp. 1505–1510.

Information about the authors:

S.A. Snitko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming” (snitko_sa@mail.ru)

A.V. Yakovchenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (mond1991@mail.ru)

A.L. Sotnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants” (0713019870@mail.ru)

Received December 18, 2017