

- technical university: collection of scientific works. – 2006. – Issue 16. – PP. 123-127. (Rus.)
16. New approaches to investigation of formation of barrel shape at upsetting / V.V. Kukhar [et al.] Improvement of the processes and facilities of plastic working at mechanical engineering and metallurgy: collection of scientific works. – Kramatorsk, 2005. – PP. 241-246. (Rus.)
  17. Kukhar V.V. Modelling of temperature field of a non-uniformly heated along its length forging at its cooking inside the die / V.V. Kukhar, O.A. Lavrentik, V.A. Burko, M.V. Krestnikov // Reporter of the Priazovskyi state technical university: collection of scientific works. – 2007. – Issue 17. – PP. 125-129. (Rus.)
  18. Kukhar V.V. Mathematical model of thermal process in a die and inside non-uniformly heated forging / V.V. Kukhar, V.A. Burko // Theses of the International scientific and technical conference «Machines and plastic deformation of metals», dedicated to 100<sup>th</sup> anniversary of S.Z. Youdovich. – Zaporozhie: Zaporozhie National Technical University, November 20-23, 2007. – PP. 37-38. (Rus.)
  19. Theory of plastic working of metals / I.Y. Tarnovskiy [et al.] Edited by I.Y. Tarnovskiy. – Moscow: Metallurgizdat, 1963. – 672 p. (Rus.)

Рецензент: А.А. Іщенко  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 01.12.2014

УДК 621.983:669.16.221

© Анищенко А.С.\*

#### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ НОСКОВ ВОЗДУШНЫХ ДОМЕННЫХ ФУРМ

*Спроектирована конструкция воздушной доменной фурмы с защитным чугунным покрытием и носком, отштампованным из листовой заготовки, разработана технология листовой штамповки носка, предложена формула для расчета высоты носка.*

**Ключевые слова:** доменная фурма, носок, защитное покрытие, листовая штамповка.

**Анищенко О.С. Розробка конструкції та технології штампування носків повітряних доменних фурм.** Спроективана конструкція повітряної доменної фурми із захисним чавунним покриттям та носиком, що відштампований з листової заготовки, розроблена технологія листового штампування носика, запропонована формула для розрахунку висоти носика.

**Ключові слова:** доменна фурма, носик, захисне покриття, листове штампування.

**O.S. Anishenko. Development of design and process of stamping of air blast-furnace lances's noses.** A design of air blast tuyere with protective iron coating was created. The front portion of the tuyere is made by stamping from copper slab with the thickness 15 mm. The author developed the technology of tuyere's front. The technology enables to stamp the front part of the tuyere without blank holder to use the single-action hydraulic press force 2 MN. Stamped on the parts produced in the form of low surface waves. This surface improves the connection of cast iron with a copper piece. The front part of the tuyere with a larger height (length) is formed by stamping blanks from a solid copper. Increasing the height (length) of the front of the tuyere allows to move portions of its connection with conical bodies in areas with lower temperature heating. It increases the resistance welds in the compounds, and hence resistance tuyeres. Protection layer of cast

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, as4@ya.ru

*iron surface stamping parts allows to reduce the thickness of the items in 2,5-7,5 times in comparison with the standard design of the tuyere. For applying a protective coating tuyere is dipped into the molten iron in an electric furnace. Iron appears only on the front side of the tuyere. Layer provides a strong connection with iron in the front portion of the tuyere. The author compared the experimental efforts with the efforts of stamping calculated by several formulas, and offered the most accurate formula. It also established equation for determining the height (length) of the front portion of the tuyere. For reliable welding tuyere front part by a conical casing is proposed to use a welding wire on the basis of nickel with additions of copper, iron, cobalt, and titanium, and to perform welding in a medium consisting of a mixture of argon and helium. Resistance of air blast tuyeres with a protective iron coating during operation exceeds the standard resistance of tuyeres on average 2,5 times.*

**Keywords:** blast tuyere, protective coating, sheet stamping.

**Постановка проблеми.** Интенсификация производства чугуна во многом зависит от стойкости воздушных доменных фурм (ВДФ), на замену которых приходится до 40% простоев доменных печей [1, 2]. Срок службы фурм на заводах СНГ составляет от нескольких часов до 260 суток.

Причинами выхода ВДФ из строя являются износ, трещины и прогар. На долю трещин (и разрывов) приходится порядка 30% случаев повреждения фурм. Вероятность трещинообразования возрастает с увеличением температуры дутья и диаметра фурм. Другой причиной появления трещин, помимо чрезмерной тепловой нагрузки, является наличие раковин, литейных складок, сильная разнотолщинность элементов фурмы, особенно носка. Основная масса поврежденных типа трещин и разрывов фурм приходится на сварные соединения.

Абразивному износу, т.е. механическому истиранию поверхности ВДФ циркулирующими перед ней материалами подвержена, в основном, верхняя часть носка фурмы. При абразивном износе длина носка может уменьшаться на 40-70 мм за 4 месяца, одновременно увеличивается выходное сечение фурмы, особенно при вдувании порошков и пыли. В связи с этим, переднюю часть носка ВДФ выполняют утолщенной, что не только увеличивает время ее износа, но и способствует эффекту «растекания тепла» при точечном контакте носка фурмы с каплями жидких продуктов плавки.

Основные причины прогара ВДФ – контакт поверхности фурмы с жидким чугуном. Среднестатистический процент прогаров составляет 58-63%, причем преобладают случаи прогара носка снизу. Эффективным способом борьбы с прогарами считается утолщение носка. Однако увеличение толщины носка приводит к ухудшению отвода тепла от его поверхности потоком охлаждающей воды, циркулирующей под давлением (как правило, не выше 0,6 МПа) в полости между наружным, внутренним кожухами и носком.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время на большинстве заводов стандартная конструкция фурмы состоит из медной части (носок и оба конуса) и стального фланца [1, 2]. Внутренний медный конус такой фурмы при ее эксплуатации разогревается до 84-89°C со стороны горячего дутья и до 67-80°C на поверхности контакта с охлаждающей водой, обеспечивая интенсивный отвод тепла от горячего дутья охлаждающей воде. Что касается конструкций фурм со стальными внутренними конусами, то сложилось мнение об их недолговечности, так как, испытывая ударные нагрузки при постановке фурмы в печь и термические (при постановке печи на «тягу»), стальные конуса «текут» в местах сварки с медной частью и (иногда) с фланцем. Кроме того, высокая температура дутья вызывает преждевременную коррозию и износ стального конуса.

Наружный и внутренний кожухи получают гибкой листового металла, а носок, имеющий толщину в 3-5 раз превышающую толщину кожухов, либо отливают, либо штампуют из слитков или проката. Наличие сварного шва увеличивает вероятность образования трещин при эксплуатации ВДФ, а большая толщина носка при низких скоростях циркуляции охлаждающей воды приводит к оплавлению и прожигу его наружной поверхности даже при точечном контакте с жидким чугуном.

На заводах дальнего зарубежья нашли применение центробежнолитые медные фурмы, не имеющие сварных швов на рабочих поверхностях. Толщина стенок кожухов и носка в этих

фурмах составляет 18-20 мм, а срок службы достигает 1 года и более. Однако в отечественной практике такие фурмы пока не используются в связи с увеличенным расходом меди, сложностью технологии литья и отсутствием возможности обеспечить давление охлаждающей воды в пределах 1,0-1,2 МПа.

Металлургические предприятия СНГ в настоящее время все шире применяют ВДФ со специальными покрытиями, обеспечивающими защиту носка или всей фурмы от высоких температур и абразивного воздействия шихты (рис. 1). Наличие жаростойкого покрытия на поверхности ВДФ обуславливает необходимость изменения конструкции фурмы. В частности, отпадает необходимость в большой толщине носка, поскольку чем носок тоньше, тем лучше его теплообмен с охлаждающей водой. Кроме того, экономится медь и снижается стоимость фурмы.

Известны исследования технологии обкатки роликом предварительно отштампованной заготовки для получения монолитной детали «наружный кожух+носок» [3]. Недостатком технологии является возникающее в зонах наружного кожуха утонение, из-за чего необходим запас толщины в исходной заготовке, что нерационально по условиям теплообмена между носком и охлаждающей водой. Кроме того, технология предусматривает наличие деформирующего оборудования для обкатки и предварительной штамповки. В условиях мелкосерийного производства ВДФ это может быть экономическим необоснованным.



Рис. 1 – Внешний вид партии ВДФ с чугунным защитным покрытием носков

**Цель статьи** – разработка новой конструкции ВДФ с защитным покрытием и технологии листовой штамповки носка этой фурмы для обеспечения экономии меди и устранения прогаров.

**Изложение основного материала.** Предварительные исследования эффективности защитных покрытий ВДФ, проведенные в УкрГосНИИКМ «Прометей» и МП «Азовмашпром» Г.С. Лупандиным и автором, показали, что исходя из критерия «цена/качество» наиболее подходящим материалом для защиты медных частей ВДФ является чугун, наносимый окунанием на поверхность фурм [4]. Испытания этих фурм на МК «Азовсталь» в некоторых случаях показали 4-кратное повышение стойкости ВДФ в сравнении с фурмами без защитного покрытия.

Учитывая это, базовым вариантом для совершенствования была выбрана конструкция ВДФ с керамическим защитным покрытием части носка, представленная на рис. 2 слева. Литой носок этой фурмы имел толщину от 40 до 115 мм. Новая конструкция фурмы (рис.2. справа) предусматривала использование чугунного защитного покрытия вместо керамического, а также замену массивного литого носка на более тонкий листовой носок в виде конусного стакана размерами  $\varnothing 290 \times 145 \times 15$  мм. В отштампованном носке затем вырезали осевое отверстие  $\varnothing 140$  мм, по контуру которого носок приваривали к внутреннему кожуху. Длина последнего в этом случае увеличивалась на 155 мм, т.е. на толщину литого носка в зонах внутреннего диаметра фурмы.

Освоение технологии ВДФ новой конструкции предполагалось в условиях малого предприятия, имеющего ограниченные технические и финансовые возможности. В частности, де-

формирующим оборудованием для штамповки носков мог быть только гидродомкрат усилием 2 МН, обычно используемый для определения механических свойств бетона. Домкрат был оборудован экспериментальным штампом, который не обеспечивал прижим фланца заготовки, а также точное центрирование пуансона и матрицы. В качестве материала штампа использовалась сталь 09Г2С-12, поскольку предполагалось изготовление фурм мелкими партиями по 10-50 штук в месяц, поэтому вопрос о стойкости штампов не стоял.

С целью улучшения качества соединения носков с кожухами вместо электродов из меди использовали сварочную проволоку диаметром 3-4 мм из сплава МНЖКТ 5-1-0,2-0,2, а сварку проводили в среде, состоящей из смеси аргона и гелия марки А. Сварной шов получался более прочным, хотя при этом ухудшалась его теплопроводность и, следовательно, отвод тепла от носка в кожухи теплопередачей. Учитывая небольшую толщину кожухов, этот фактор не являлся решающим при эксплуатации фурм, поскольку максимум отвода тепла приходился на циркулирующую в фурме охлаждающую воду.

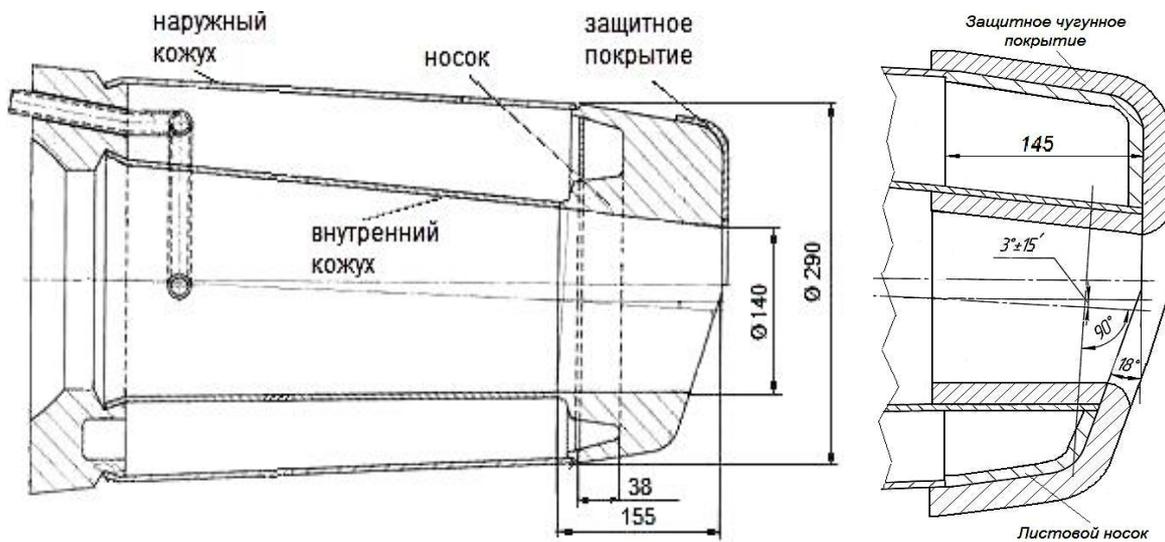


Рис. 2 – Воздушная доменная фурма с защитным покрытием: слева – базовый вариант; справа – новый вариант с листовым носком и чугунным покрытием

Исследования листовой штамповки носка проводили на заготовках из раскисленной меди ГПРНХ М1р толщиной  $S_0 = 15$  мм. Почти двухкратное превышение толщины заготовки над толщиной кожухов фурмы (8 мм) было вызвано необходимостью борьбы с образованием гофров при вытяжке носка без прижима заготовки. В нашем случае соотношение толщины заготовки и ее диаметра  $D$  составляло  $S_0/D = 0,034$  (рекомендуемая справочная величина для вытяжки заготовок без прижима -  $S_0/D < 0,03$  [5]). Листовая медь использовалась от четырех поставщиков, поэтому имела различные значения временного сопротивления  $\sigma_s$ .

Носки штамповали в кольцевые вытяжные матрицы [5] с варьируемыми радиусами перетяжной кромки  $R$ . Центр заготовки отстоял от центральной оси матрицы на различное расстояние  $l$ . Необходимость этого была связана с тем, что половина донной поверхности носка была расположена под углом  $18^\circ$  к вертикали (рис.2, нижняя часть носка).

Предварительные расчеты усилий вытяжки проводили по формулам Романовского, Шофмана, Томленова и Любченко. Наибольшее приближение расчетных данных к экспериментально определенным усилиям вытяжки показала формула Любченко [5]:

$$P = a \cdot k \cdot (D - b \cdot k \cdot d) \cdot S_0 \cdot \sigma_s,$$

где  $P$  – усилие вытяжки, кГ;

$d$  – диаметр матрицы, равный внешнему диаметру носка, мм;

$a, k, b$  – коэффициенты, для нашего случая  $a = 1,98; k = 0,707; b = 0,77$ .

Расчетное усилие вытяжки составило 157 т, экспериментальные значения усилия находились в пределах 126-144 т.

Были проведены четыре серии опытных штамповок носков фурм, данные о которых приведены в таблице. Отштампованные в таких условиях носки имели различную высоту вертикальных стенок, тогда как для фурмы нужен был носок с высотой  $h = 145$  мм.

Параметры, указанные в таблице, не дают возможности в общем случае прогнозировать высоту носка, так как каждый раз листовую медь закупают в различных местах, поэтому она характеризуется различным значением временного сопротивления  $\sigma_{\epsilon}$ . Для гибкости производства фурм возникла необходимость в расчете высоты  $h$  носка в зависимости от основных параметров вытяжки:  $\sigma_{\epsilon}$ ,  $D$ ,  $d$ ,  $R$  и  $l$ . Эта высота может оказаться, к примеру, меньше 145 мм, тогда на такую же величину увеличивается длина наружного кожуха фурмы, т.е. дефекты штамповки устраняются на последующих операциях изготовления фурмы.

Таблица

Технологические параметры листовой штамповки носков ВДФ

№/п	Диаметр заготовки $D$ , мм	Временное сопротивление меди $\sigma_{\epsilon}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Коаксиальность заготовки и матрицы $l$ , мм	Радиус рабочей кромки матрицы $R$ , мм	Высота отштампованного носка $h$ , мм
1.	440	17,3	10	50	145
2.	460	23,6	0	60	104
3.	440	26,6	20	50	93
4.	450	23,6	5	60	143

Определим высоту носка фурмы  $h$  как функцию  $h = f(D, d, l, R, \sigma_{\epsilon})$ . Выберем формулу с безразмерными параметрами, которые мало отличаются по величине между собой и близки к единице (в этом случае вычисления по искомой формуле будет проще и точнее). Превратим параметры  $D, d, l, R$  в безразмерные следующим образом:

$$\frac{d-h}{d}; \frac{d-D}{d}; \frac{d-l}{d}; \frac{d-R}{d}.$$

В этом случае искомую формулу можно будет использовать для вычисления высоты носка другого диаметра  $d$ , т.е для других конструкций ВДФ.

Временное сопротивление меди  $\sigma_{\epsilon}$  превратим в безразмерную величину  $\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}^{cp}}$  путем его деления на среднее из трех (см. таблицу) значений:  $\sigma_{\epsilon}^{cp} = 23,6$  Н/мм<sup>2</sup>.

Для более чувствительного влияния на функцию  $\frac{d-h}{d}$  ее аргументов выбираем квадратичный вид искомой формулы:

$$\frac{d-h}{d} = a\left(\frac{d-D}{d}\right)^2 + b\left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}^{cp}}\right)^2 + c\left(\frac{d-l}{d}\right)^2 + k\left(\frac{d-R}{d}\right)^2 \quad (1)$$

Используя экспериментальные данные таблицы, определим по методу Крамера параметры  $a, b, c, k$  уравнения (1):

$$a = 3,70; \quad b = -0,27; \quad c = -0,29; \quad k = -0,11.$$

Таким образом, формула (1) принимает вид:

$$\frac{d-h}{d} = 3,70\left(\frac{d-D}{d}\right)^2 - 0,27\left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}^{cp}}\right)^2 - 0,29\left(\frac{d-l}{d}\right)^2 - 0,11\left(\frac{d-R}{d}\right)^2 \quad (2)$$

Вычисления по формуле (2) в диапазоне параметров таблицы показывают, что функция и ее аргументы изменяются в пределах:

$$\frac{d-h}{d} = 0,50-0,68; \quad \frac{d-D}{d} = 0,99-1,27; \quad \frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}^{cp}} = 0,16-0,34;$$

$$\frac{d-l}{d} = 0,25-0,28; \quad \frac{d-R}{d} = 0,07-0,08.$$

А это значит, что изменения  $R$  почти не влияют на высоту  $h$  носка.

Если задать постоянные значения  $l$ ,  $d$  и  $R$  (для нашего случая  $l = 10$  мм,  $d = 290$  мм,  $R = 50$  мм) и преобразовать формулу (2) к следующему виду:

$$h = -0,012(290 - D)^2 + 0,14\sigma_{\epsilon}^2 + 388,62, \quad (3)$$

то можно увидеть (рис. 3):

- более прочная медь способствует росту высоты носка при штамповке; специалисты объясняют это тем, что в более прочной меди меньше высота «волн» на гофрах, следовательно, эти гофры частично можно деформировать сквозь матрицу;

- при равенстве диаметров заготовки и матрицы, т.е. при  $D = d = 290$  мм мнимая высота носка будет якобы наиболее высокая, однако наличие мнимого максимума  $h$  при  $D = d$  означает, что формулой (3) можно пользоваться только в пределах параметров, которые предоставлены в таблице.

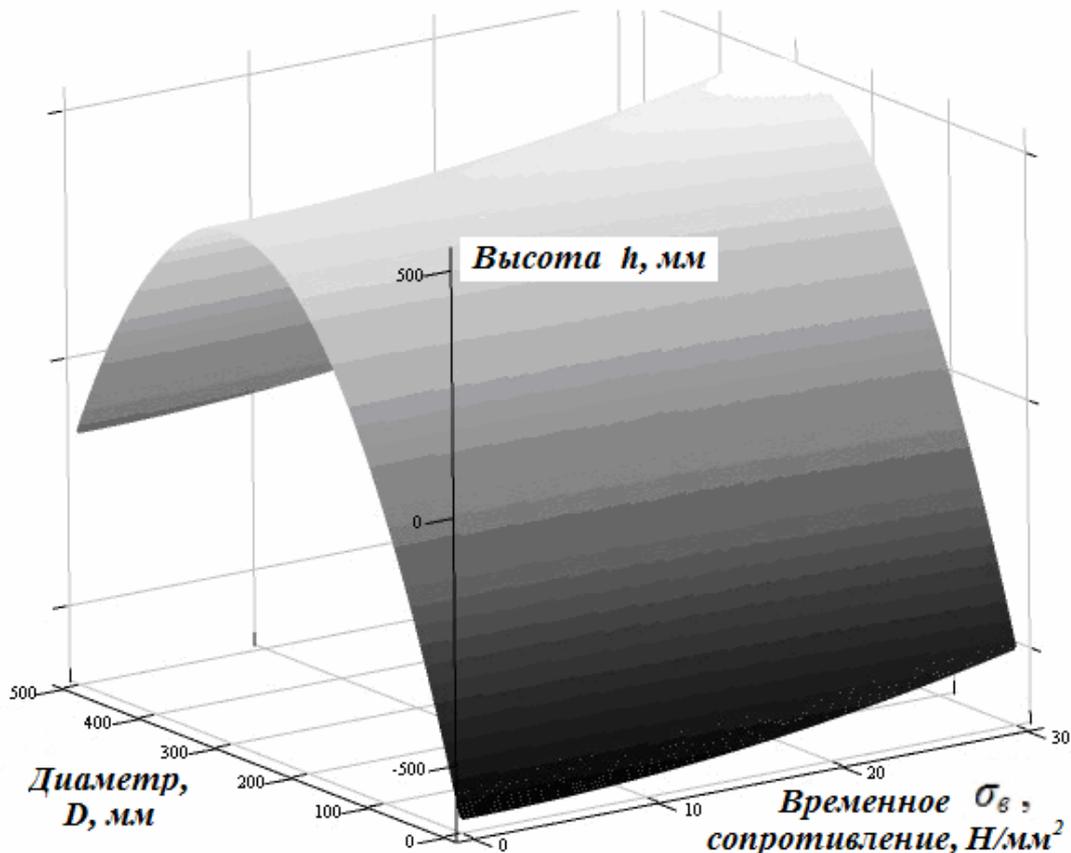


Рис. 3 – Зависимость высоты носка от диаметра и временного сопротивления заготовки

Эксплуатация ВДФ с защитным чугунным покрытием показала, что слой чугуна толщиной 10-12 мм надежно защищает носки фурм от истирания и прожигов (прогаров) при попадании отдельных брызг жидкого чугуна в доменной печи. Немаловажным преимуществом чугуна

над другими защитными покрытиями является отсутствие его обрастания гарниссажем. Это значительно упрощает работы по извлечению отслужившей свой срок фурмы из доменной печи, поскольку защитное покрытие попросту слетает с поверхности носка в доменную печь. К тому же отпадает необходимость отрыва фурмы от налипшего гарниссажа и увеличения размера отверстия в печи для извлечения фурмы покрытия с остатками гарниссажа на носке.

Уменьшение толщины носка с 40-115 до 15 мм при наличии защитного покрытия не привело к увеличению прогаров. Фурмы новой конструкции вышли из строя из-за течей в сварном шве, соединяющем дно носка с внутренним кожухом. Этот шов был вынужденно приближен из глубины внутреннего кожуха к донной части носка, т.е. в зону более высоких температур. Кроме того, из-за особенностей нанесения защитного покрытия окунанием в жидкий чугун именно зоны этого шва имели наименьшую толщину покрытия.

Среднестатистическая стойкость фурм с листовым носком и слоем чугуна на его поверхности оказалась на уровне штатных фурм с литым носком и без защитного покрытия.

Производственные испытания фурм определили направления дальнейшего совершенствования их конструкции и технологии:

- конструкция фурм должна предусматривать расположение сварных швов между носком и кожухами как можно дальше от донной поверхности носков, толщину которых целесообразно уменьшить до толщины соединяемых с ним кожухов;
- технология носка должна предусматривать возможность прижима листовой заготовки при вытяжке либо ползуном пресса двойного действия, либо прижимными приспособлениями в штампе;
- после глубокой вытяжки носок должен быть отбортован по диаметру, равному диаметру внутреннего кожуха; высота вертикальной стенки носка и его отбортованного участка должна быть максимально возможной, а толщина носка в зонах сварки с кожухами – соответствовать толщине кожухов.

#### Выводы

1. Наличие защитного покрытия на поверхности носка ВДФ обуславливает возможность и целесообразность существенного снижения толщины носка для экономии меди и улучшения теплообмена между носком и охлаждающей водой.
2. Носок ВДФ может быть изготовлен штамповкой из листовой заготовки с толщиной листа, соизмеримой с толщиной кожухов фурмы. Возникающая при износе матрицы волнистость поверхности листового носка не является дефектом штамповки и способствует более надежному креплению защитного покрытия на поверхности носка.
3. Эффективна защита поверхности фурмы слоем чугуна, наносимым на предварительно армированную поверхность носка методом окунания фурмы в расплав чугуна. Стойкость ВДФ с чугунным защитным покрытием повышается в среднем в 2,5 раза.

#### Список использованных источников:

1. Лялюк В.П. Современные проблемы технологии доменной плавки / В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 1999. – 160 с.
2. Донсков Е.Г. Работа воздушных фурм доменных печей / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, В.В. Севернюк. – Днепропетровск : Пороги, 1997. – 120 с.
3. Ткаченко Э.А. Особенности локализации пластической деформации при формообразовании обкатыванием роликом корпуса доменной фурмы / Э.А. Ткаченко, В.С. Гришин, Е.П. Морозенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №7. – С.217-221.
4. Пат. 45466 Україна, МПК С 21 В 7/16. Дугтьова фурма з захисним покриттям та спосіб нанесення покриття на зовнішню поверхню фурми.
5. Любченко А.А. Конструирование штампов и горячая листовая штамповка / А.А. Любченко. – Л. : Машиностроение, 1974. – С. 117-122.

#### Bibliography:

1. Lyalyuk V.P. Modern technology problems blast furnace / V.P. Lyalyuk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 1999. – 160 p. (Rus.)
2. Donskov E.G. The work of air lances blast furnaces / E.G. Donskov, V.P. Lyalyuk,

- V.V. Severnyuk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 1997. – 120 p. (Rus.)
3. Tkachenko E.A. Features of plastic strain localization in forming running-roller body blast lance / E.A. Tkachenko, V.S. Grishin, E.P. Morozenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – №7. – P. 217-221. (Rus.)
  4. Pat. 45466 Ukraine, IPC C 21 B 7/16. Lance blast with a protective coating and a method for coating the outer surface of the tuyere. (Ukr.)
  5. Lyubchenko A.A. Creation of stamps and Hot Stamping / A.A. Lyubchenko. – Leningrad. : Mashinostroenie, 1974. – P. 117-122. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 29.09.2014