

УДК 621.98.044, 621.98.074  
DOI:10.30987/2223-4608-2021-11-12-19

**А.В. Королев**, д.т.н., **А.В. Панфилова**, аспирант, **Б.М. Изнаиров**, к.т.н.,  
**О.П. Решетникова**, к.т.н., **В.А. Павлова**, к.т.н.  
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)  
E-mail: science7@bk.ru; olgareshetnikova1@yandex.ru

## Механизм лезвийной очистки металлического проката от окалины\*

*Описан новый способ очистки металлической поверхности от окалины с помощью специального вращающегося лезвийного инструмента, позволяющий более качественно, надежно и эффективно решать задачу повышения степени очистки поверхности от окалины. Смоделирован процесс очистки поверхности плоского проката, используемого для изготовления полых шариков, от окалины путем механического воздействия режущего инструмента на различные слои окалины. Определена сила, необходимая для сдвига окалины и граничные условия соотношения силы прижима инструмента к заготовке, силы трения в опоре инструмента и силы воздействия окалины на инструмент, при которых возможно удаление окалины с поверхности проката.*

**Ключевые слова:** окалина; прокат; полый шарик; способ очистки; инструмент; механизм воздействия; пограничные условия.

**A.V. Korolev**, Dr.Sc.Tech., **A.V. Panfilova**, Postgraduate, **B.M. Iznairov**, Can.Sc.Tech.,  
**O.P. Reshetnikova**, Can.Sc.Tech., **V.A. Pavlova**, Can.Sc.Tech.  
(Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., 77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054)

## The mechanism of edge cutting machining of rolled iron from oxide scale

*A new purifying method of metal surface cleaning from oxide scale using a special rotating edge tool is described, which allows to solve the problem of increasing the extent of surface purification from oxide scale more efficiently, reliably and effectively. The process of the surface cleaning of flat-rolled products used for the manufacture of hollow sheres from oxide scale by mechanical action of a cutting tool on various layers of oxide scale is simulated. The force required to shift an oxide scale and the boundary conditions of the ratio hold-down pressure of the tool to the workpiece, the friction force in the tool support and the impact force of the scale on the tool, at which it is possible to remove the scale from the rolled surface, are determined.*

**Keywords:** oxide scale; rolled products; hollow sheres; purifying method; tool; mechanical action; boundary conditions.

### Введение

В настоящее время полые шарики в большинстве случаев изготавливаются из тонколистового проката, формируемого в полусферы. Чрезвычайно важно, чтобы в результате пластического формообразования полусфер и их сборки в форме шара, во внутреннюю полость полого шара не попали участки проката, содержащие окислы, т.к. это может привести к интенсивному внутреннему окислению металла и снижению механической прочности конструкции шара. С целью предотвращения это-

го негативного процесса предлагается в качестве первой операции технологического процесса изготовления полых шариков использовать способ интенсивной очистки поверхности тонколистового проката от окалины, имеющей место в состоянии его поставки.

Очистка поверхности проката от окалины является весьма трудоемким и не всегда эффективным процессом. На крупных металлургических комбинатах для удаления окалины с листового проката применяют достаточно трудоемкие методы [1 – 3]. Поэтому предлагается способ очистки листового проката от окалины, основанный на ранее предложенных способах [4, 5], который можно реализовать в условиях серийного производства полых шариков [6].

\* Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-2395.2020.8.

### Способ очистки поверхности проката от окалины

За объект исследования примем способ очистки поверхности от окалины, схема которого представлена на рис. 1.

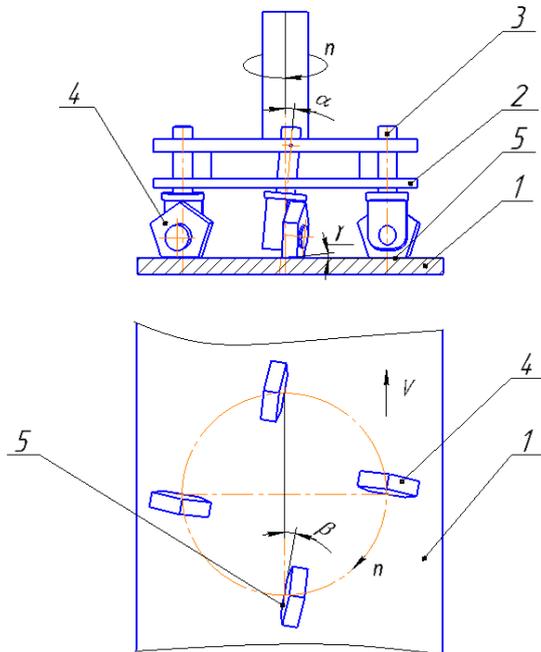


Рис. 1. Схема способа очистки плоской поверхности проката от окалины

Очистка плоской поверхности изделия 1 осуществляется вращающимся инструментом, состоящим из диска 2, в котором с помощью штифтов закреплены державки 3, с установленным на конце твердыми пластинами 4 (см. рис. 1).

Твердые пластины представляют собой твердосплавные пятигранные пластины по ГОСТ 19064-80. Режущие кромки 5 твердых пластин 4 расположены вдоль обрабатываемой поверхности изделия 1, а их передние поверхности вместе с державками 3 наклонены к осевой плоскости вращения диска в направлении его вращения под углом  $\alpha$ , равным  $5...15^\circ$ . Кроме того, режущие кромки 5 твердых пластин 4 наклонены к осевой плоскости диска 2 под углом  $\beta$ , равным  $10...20^\circ$ . Для того чтобы режущие кромки 5 твердых пластин 4 находились в контакте с обрабатываемой поверхностью, на пластине выполнена задняя поверхность так, чтобы она находилась под углом  $\gamma$ , равным  $3...6^\circ$ , к обрабатываемой поверхности.

При вращении инструмента режущие кромки 5 твердых пластин 4 скользят по обрабатываемой поверхности. Встречая на пути

препятствие в виде окалины, режущая пластина ударяет по ней и осуществляет ее хрупкое разрушение. Так как твердая пластина наклонена в направлении вращения на угол  $\alpha = 10...20^\circ$ , то составляющая сила удара, направленная по нормали к передней поверхности твердой пластины, прижимает пластину к обрабатываемой поверхности и уравновешивается в значительной степени силой реакции этой поверхности.

При угле наклона  $\alpha$  твердой пластины менее  $5^\circ$  указанный выше эффект проявляется слабо, а при угле наклона  $\alpha$  более  $20^\circ$  пластина слишком сильно прижимается к обрабатываемой поверхности, вызывая значительную силу трения и снижая силу сдвига. Слишком малый угол  $\gamma < 3^\circ$  между задней поверхностью твердой пластины 4 и обрабатываемой поверхностью снижает плотность контакта режущей кромки 5 твердой пластины 4 с обрабатываемой поверхностью. А слишком большой угол  $\gamma > 10^\circ$  может привести к врезанию пластины 4 в обрабатываемую поверхность при взаимодействии с окалиной и вызвать ее повреждение.

За счет наклона режущей кромки 5 твердой пластины 4 на угол  $\beta = 10...20^\circ$  относительно осевой плоскости диска при ее взаимодействии с окалиной появляется составляющая силы удара, направленная в сторону обработанной поверхности, свободной от окалины. Это в значительной степени облегчает сдвиг окалины относительно обрабатываемой поверхности. При угле наклона  $\beta < 10^\circ$  этот эффект проявляется слабо. При  $\beta > 20^\circ$  эффективность очистки поверхности от окалины снижается из-за того, что в контакт с окалиной слишком активно вступает боковая поверхность твердой пластины с отрицательным передним углом.

Таким образом, повышается жесткость удара твердых пластин о поверхность окалины и обеспечивается возможность сдвига окалины в сторону обработанной поверхности, и тем самым решается задача повышения степени очистки поверхности от окалины.

Способ имеет еще одну особенность, которая связана с тем, что обычно прокат имеет значительные погрешности изготовления по толщине и по форме поверхности. Для того чтобы инструмент при очистке окалины при встрече с неровностями этой поверхности не срезал их, а свободно скользил по этим неровностям, он имеет податливость вдоль своей оси. Это обеспечивается тем, что инструмент упруго прижимается к обрабатываемой по-

верхности, например, с помощью пружины (на эскизе не показана). При встрече с неровностями инструмент огибает ее, сжимая пружину.

При моделировании процесса очистки поверхности проката от окалины примем следующие допущения:

- 1) инструмент имеет значительную податливость вдоль своей оси, но в других направлениях имеет абсолютную жесткость;
- 2) режущая поверхность инструмента имеет твердость, намного превышающую твердость окалины, и поэтому ее износ во внимание не принимается;
- 3) передняя поверхность инструмента плоская, но имеет радиус округления режущей кромки;
- 4) плоскость передней поверхности инструмента совпадает с направлением оси инструмента.

**Моделирование процесса очистки поверхности плоского проката от окалины**

На рис. 2 показан момент скалывания окалины. Режущая кромка инструмента, представляющего собой режущую пластину из твердого сплава, наклонена к вертикальной оси *oy*, перпендикулярной плоскости очищаемой от окалины поверхности заготовки, под углом  $\alpha$ . Вдоль оси инструмента действует сила прижима его к обрабатываемой поверхности  $P_o$  и горизонтальная сила, направленная вдоль оси *ox* равная  $P_x$ .

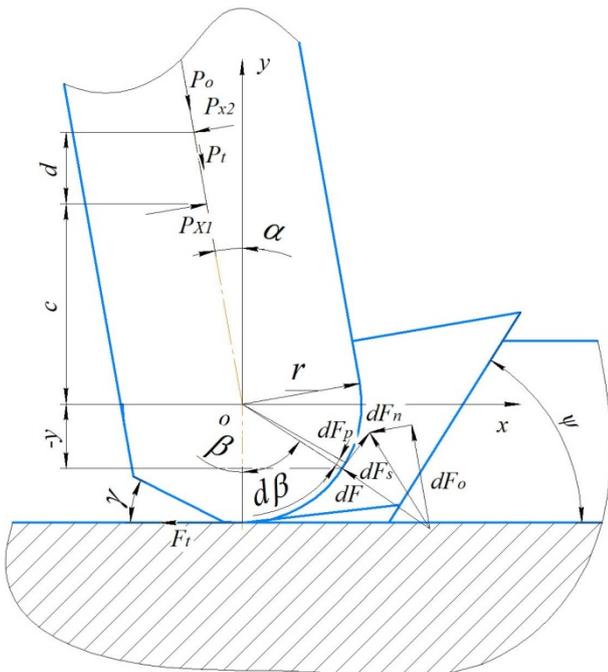


Рис. 2. Схема удаления окалины

Осевая сила имеет величину, при которой инструмент прижимается к поверхности заготовки так, что не вызывает ее пластическую деформацию и при перемещении свободно скользит по этой поверхности.

Режущая кромка инструмента имеет радиус округления  $r$  с центром, совпадающим с началом декартовой системы координат  $xoy$ . Радиус округления  $r$  всегда образуется на режущей кромке инструмента, так как абсолютно острую кромку получить невозможно. Но радиус округления режущей кромке необходим, чтобы не повреждать основную поверхность изделия, чтобы инструмент свободно скользил по этой поверхности. Это обеспечивается, если инструмент при нагружении силой  $P_o$  вызывает упругую деформацию поверхности. На основе закономерностей теории упругости можно определить радиус закругления режущей кромки, при которой контакт инструмента с поверхностью заготовки будет упругим:

$$r \geq \frac{P_o \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot \sigma_{и}^2 \cdot \eta \cdot b}, \tag{1}$$

где  $P_o$  – сила взаимодействия инструмента и окалины, направленная вдоль оси инструмента, Н;  $\alpha$  – угол наклона режущего инструмента, рад;  $\sigma_{и}$  – предел упругости материала изделия, МПа;  $b$  – длина режущей кромки инструмента, мм;  $\eta$  – коэффициент упругости материалов инструмента и заготовки, 1/МПа, равный:

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \tag{2}$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – соответственно модули упругости материалов заготовки и инструмента, МПа;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – соответственно коэффициенты Пуассона материалов заготовки и инструмента.

В зависимости от радиуса округления режущей кромки инструмента  $r$  и нагрузки на инструмент  $P_o$  между поверхностями инструмента и заготовки возникает полоска контакта, полуширина которой равна:

$$a = 1,128 \cdot \sqrt{\frac{P_o \cdot \cos \alpha \cdot \eta \cdot r}{b}}. \tag{3}$$

На поверхности заготовки имеется слой окалины, общая толщина которой равна:

$$h = h_1 + h_2 + h_3, \tag{4}$$

где  $h_1$  – первый слой окалины – вюстит;  $h_2$  – второй слой окалины – магнетит;  $h_3$  – третий слой окалины – гематит.

На рис. 2 эти слои окалины не показаны, но имеются в виду, так как они имеют различные

механические свойства. Вюстит (FeO) – наиболее мягкий и рыхлый слой окалины с небольшой абразивной способностью. При твердости металла по Виккерсу 140 HV твердость вюстита составляет 270...350 HV. Поэтому он легко удаляется механическим методом. Магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) – более твердый и более хрупкий слой окалины и обладает значительной абразивной способностью. Твердость магнетита составляет 420...500 HV. Гематит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – наиболее прочный слой окалины и обладает высокой абразивной способностью. Твердость гематита составляет 1030 HV и более.

Под действием на инструмент силы  $P_x$  окалина разрушается. Отличительным свойством окалины является ее высокая хрупкость. Поэтому, как и всякий хрупкий материал, он разрушается от механического воздействия по плоскостям сдвига. Сначала разрушению подвергаются мелкие микронеровности окалины, в результате чего создается плотный контакт окалины с инструментом. Затем при достижении горизонтальной силы величины  $P_x$  окалина скалывается вдоль плоскости скалывания, расположенной под углом  $\psi$  к вертикальной оси  $ou$ .

Сила сдвига окалины равна:

$$F_{cd} = S_i [\tau_i] = [\tau_i] \cdot b \cdot \frac{h_i}{\sin \psi}, \quad (5)$$

Из сравнения равенств (6) и (8) имеем:

$$\sigma = \frac{k_i}{\sin \psi} \cdot [\sigma_i]. \quad (9)$$

Определим условия, при которых инструмент будет удалять окалину. Для этого необходимо, чтобы сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности  $P_o$  и сила трения  $P_t$ , возникающая в процессе обработки в державке инструмента, превышала силу, действующую на инструмент со стороны окалины. Найдем соотношение этих сил.

Из рис. 2 следует, что элементарная сила воздействия инструмента на поверхность окалины на произвольном элементарном участке поверхности контакта в момент ее скалывания равна:

$$dF = \sigma \cdot b \cdot r \cdot d\beta. \quad (10)$$

где  $S_i$  – площадь сдвига  $i$ -го слоя окалины, мм<sup>2</sup>;  $[\tau_i]$  – допускаемое напряжение сдвига  $i$ -го слоя окалины, ПМа;  $\psi$  – угол сдвига, рад.

В общем случае напряжение сдвига связано со сжимающими напряжениями зависимостью:

$$[\tau_i] = k_i \cdot [\sigma_i],$$

где  $k_i$  – коэффициент.

Тогда составляющая силы сдвига, направленная вдоль направления движения режущей части инструмента, равна:

$$F_{cd} = k_i \cdot [\sigma_i] \cdot b \cdot \frac{h_i}{\sin \psi}. \quad (6)$$

Эта сила уравнивается силой, действующей на кромке инструмента. Как следует из рис. 2, элементарная сила, действующая на кромке инструмента, равна:

$$dF_g = \sigma \cdot b \cdot r \cdot \sin \beta \cdot d\beta, \quad (7)$$

где  $\beta$  – текущий угол передней поверхности режущей кромки инструмента, рад;  $r$  – радиус округления режущей кромки пластины, мм;  $\sigma$  – напряжение сжатия на кромке инструмента, МПа.

Интегрируя равенство (7) вдоль режущей кромки инструмента, определим силу сдвига:

$$dF_g = \sigma \cdot b \cdot r \cdot \int_{\beta_o}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sin \beta \cdot d\beta + \sigma \cdot b \cdot (h - r \cdot \sin \alpha) = \sigma \cdot b \cdot h. \quad (8)$$

На переднюю поверхность инструмента также будет действовать сила трения окалины:

$$dF_p = f_o \cdot dF = \sigma \cdot b \cdot r \cdot \operatorname{tg} \lambda \cdot d\beta, \quad (11)$$

где  $\lambda$  – угол трения окалины о переднюю поверхность инструмента.

С учетом (10) и (11) результирующая сила воздействия окалины на переднюю поверхность инструмента равна:

$$dF_s = \sigma \cdot b \cdot r \cdot \frac{d\beta}{\cos \lambda}. \quad (12)$$

Разложим результирующую силу  $dF_s$  на две составляющие. В направлении оси инструмента, расположенной под углом  $\alpha$  к вертикальной оси  $ou$ , составляющая сила будет равна:

$$dF_o = dF_s \cdot \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta = \sigma \cdot b \cdot r \cdot \cos(\beta - \lambda - \alpha) \frac{d\beta}{\cos \lambda}. \quad (13)$$

Составляющая сила в направлении, перпендикулярном оси инструмента, равна:

$$dF_n = \sigma \cdot b \cdot r \cdot \sin(\beta - \lambda - \alpha) \frac{d\beta}{\cos \lambda}. \quad (14)$$

Осевая сила  $dF_o$  будет способствовать отрыву инструмента от обрабатываемой поверхности, препятствуя ее очистке от окалины. Нормальная сила  $dF_n$  будет вызывать силу трения  $F_t$ , возникающую в опорах державки инструмента и способствовать очистке поверхности от окалины.

Сила трения в опорах инструмента, вызванная элементарной нормальной силой, действующей на инструмент, равна:

$$P_t = f_o \cdot (P_{x1} + P_{x2}), \quad (15)$$

где  $f_o$  – коэффициент трения скольжения в опорах державки инструмента;  $P_{x1}$  и  $P_{x2}$  – нормальные силы, действующие в опорных точках державки инструмента, Н (см. рис. 2).

Так как:

$$dP_{x1} = dF_n \cdot \frac{d + (c - y)}{d};$$

$$dP_{x2} = dF_n \cdot \frac{c - y}{d},$$

где  $F_t$  – сила трения инструмента по обрабатываемой поверхности, Н;  $(c - y)$  – расстояние от точки приложения нормальной силы  $F_n$  до ближайшей опоры державки инструмента, мм;  $d$  – расстояние между опорами, мм;  $y$  – расстояние точки приложения силы  $dF$  до оси абсцисс  $ox$ , равное  $y = r \cdot \cos \beta$ , тогда:

$$dP_t = f \cdot dF_n \cdot \frac{d + 2(c - y)}{d} = f \cdot \sigma \cdot b \cdot r \cdot \frac{d + 2(c + r \cdot \cos \beta)}{d \cdot \cos \lambda} \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta. \quad (16)$$

Совокупность всех элементарных сил, действующих вдоль оси инструмента, противодействует силе прижима инструмента  $P_o$ . Значение этой силы во многом зависит от соотношения толщины окалины  $h$  и ее отдельных слоев и радиуса округления режущей кромки инструмента  $r$ .

Рассмотрим три крайних случая: радиус округления режущей кромки инструмента меньше или равен толщине первого слоя ока-

лины; радиус округления меньше толщины второго слоя окалины, но больше толщины первого слоя; радиус округления меньше толщины всего слоя окалины, но больше толщины первых двух слоев.

Если  $r \cdot (1 + \sin \alpha) \leq h_1$ , то, интегрируя равенства (13) и (16), найдем осевую силу воздействия окалины на инструмент и силу трения в опорах инструмента:

$$F_o = \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \int_{\beta_o}^{\frac{\pi + \alpha}{2}} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \frac{h_1 - r(1 + \sin \alpha) \cdot \operatorname{tg} \lambda}{r \cdot \cos \alpha} \right) + (\sigma_2 \cdot h_2 + \sigma_3 \cdot h_3) \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha}; \quad (17)$$

$$P_t = f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \int_{\beta_o}^{\frac{\pi + \alpha}{2}} (d + 2(c + r \cdot \cos \beta)) \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + f \cdot \frac{b}{d \cos \alpha} \cdot \left( \sigma_1 \cdot r \cdot (d + 2(c + r) - h_1 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_2 \cdot h_2 \cdot (d + 2(c + r) - h_2 - h_1) + \sigma_3 \cdot h_3 \cdot (d + 2(c + r) - h - h_1 - h_2) \right), \quad (18)$$

где  $\beta_o$  – угол начала контакта инструмента с окалиной, рад.

Так как инструмент и заготовка имеют узкую полоску контакта шириной  $2a$  (3), то под площадью контакта окалина отсутствует. Поэтому инструмент вступает в контакт с окалиной под углом, равным:

$$\beta_o = \arcsin \frac{a}{r} = \arcsin \left( 1,128 \sqrt{\frac{P_o \cdot \cos \alpha \cdot \eta}{b \cdot r}} \right). \quad (19)$$

Интегрируя равенства (17) и (18), получим:

$$F_o = \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \sigma_1 \cdot \left( \cos \lambda - \sin(\beta_o - \lambda - \alpha) + \frac{h_1 - r(1 + \sin \alpha) \cdot \operatorname{tg} \lambda}{r \cdot \cos \alpha} \right) + (\sigma_2 \cdot h_2 + \sigma_3 \cdot h_3) \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha}; \quad (20)$$

$$P_t = f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left( (d + 2c)(\cos(\beta_o - \lambda - \alpha) - \sin \lambda) + \cos(\lambda + \alpha)(\cos \alpha^2 - \sin \beta_o^2) - \sin(\lambda + \alpha) \left( \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_o - \sin(\alpha + \beta_o) \cos(\alpha + \beta_o) \right) \right) +$$

$$+ f \frac{b}{d \cos \alpha} \left( \sigma_1 \cdot r \cdot (d + 2(c + r) - h_1 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_2 \cdot h_2 \cdot (d + 2(c + r) - h_2 - h_1) + \sigma_3 \cdot h_3 \cdot (d + 2(c + r) - h - h_1 - h_2) \right) \quad (21)$$

Интегрируя равенства (13) и (16) при  $h_1 < r(1 + \sin \alpha) \leq (h_1 + h_2)$  найдем:

$$F_o = \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \left( \sigma_1 \cdot \int_{\beta_o}^{\beta_1} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \sigma_2 \cdot \int_{\beta_1}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta \right) +$$

$$+ \sigma_2 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h_1 + h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_3 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} h_3 =$$

$$= \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot (\sigma_1 \cdot (\sin(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \sin(\beta_o - \lambda - \alpha)) + \sigma_2 (\cos \lambda - \sin(\beta_1 - \lambda - \alpha))) +$$

$$+ \sigma_2 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h_1 + h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_3 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} h_3;$$

$$P_t = f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \int_{\beta_o}^{\beta_1} (d + 2(c + r \cdot \cos \beta)) \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta +$$

$$+ f \frac{\sigma_{2 \cdot b \cdot r}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \int_{\beta_1}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} (d + 2(c + r \cdot \cos \beta)) \cdot \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta +$$

$$+ f \frac{b}{d \cos \alpha} \left( \sigma_2 (h_1 + h_2 - r(1 - \sin \alpha)) \cdot (d + 2(c + r) - h_1 - h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_3 \cdot h_3 \cdot (d + 2(c + r) - h - h_1 - h_2) \right), \quad (23)$$

где  $\beta_1$  – угол расположения первого слоя окалина вюстита, рад:

$$\beta_1 = \arccos \frac{r - h_1}{r}. \quad (24)$$

Интегрируя (23), получим:

$$P_t = f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left( (d + 2c)(\cos(\beta_o - \lambda - \alpha) - \cos(\beta_1 - \lambda - \alpha)) + \left( \sin^2(\beta_1) - \sin^2(\beta_o) \right) \cos(\lambda + \alpha) - \sin(\lambda + \alpha) (\beta_1 - \beta_o + \cos(\beta_1 + \beta_o) \sin(\beta_1 - \beta_o)) \right) +$$

$$+ f \frac{\sigma_{2 \cdot b \cdot r}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left( (d + 2c)(\cos(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \sin \lambda) + \left( \cos^2 \alpha - \sin^2 \beta_1 \right) \cos(\lambda + \alpha) - \sin(\lambda + \alpha) \left( \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_1 - \cos(\alpha - \beta_1) \sin(\alpha + \beta_1) \right) \right) +$$

$$+ f \frac{b}{d \cos \alpha} \left( \sigma_2 (h_1 + h_2 - r(1 - \sin \alpha)) \cdot (d + 2(c + r) - h_1 - h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_3 \cdot h_3 \cdot (d + 2(c + r) - h - h_1 - h_2) \right)$$

При  $h_1 + h_2 < r(1 + \sin \alpha) \leq h$ :

$$F_o = \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \left( \begin{aligned} &\sigma_1 \cdot \int_{\beta_o}^{\beta_1} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \sigma_2 \cdot \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \\ &+ \sigma_3 \cdot \int_{\beta_2}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta \end{aligned} \right) + \sigma_3 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h - r(1 + \sin \alpha)); \quad (26)$$

$$P_i = f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \int_{\beta_o}^{\beta_1} (d + 2(c + r \cdot \cos \beta)) \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \\ + f \frac{\sigma_{2 \cdot b \cdot r}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \int_{\beta_1}^{\beta_2} (d + 2(c + r \cdot \cos \beta)) \cdot \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \\ + f \frac{\sigma_{3 \cdot b \cdot r}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \int_{\beta_2}^{\frac{\pi}{2}} (d + 2(c + r \cdot \cos \beta)) \cdot \sin(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \\ + f \frac{b \cdot \sigma_3}{d \cos \alpha} ((h - r(1 - \sin \alpha)) \cdot (d + 2(c + r) - h - r(1 + \sin \alpha))), \quad (27)$$

где  $\beta_2$  – угол расположения второго слоя окарины магнетита, рад:

$$\beta_2 = \arccos \frac{r - h_1 - h_2}{r}; \quad (28)$$

После интегрирования равенство (10) примет вид:

$$F_o = \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \left( \begin{aligned} &\sigma_1 \cdot (\sin(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \sin(\beta_o - \lambda - \alpha)) + \\ &+ \sigma_2 \cdot (\sin(\beta_2 - \lambda - \alpha) - \sin(\beta_1 - \lambda - \alpha)) + \\ &+ \sigma_3 \cdot (\cos \lambda) - \sin(\beta_2 - \lambda - \alpha) \end{aligned} \right) + \sigma_3 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h - r(1 + \sin \alpha)); \quad (29)$$

$$P_i = f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left( \begin{aligned} &(d + 2c)(\cos(\beta_o - \lambda - \alpha) - \cos(\beta_1 - \lambda - \alpha)) + \\ &+ r \left( \cos(\lambda + \alpha)(\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_o) - \right. \\ &\left. - \sin(\lambda + \alpha)(\beta_1 - \beta_o + \cos(\beta_1 + \beta_o)) \sin(\beta_1 - \beta_o) \right) \end{aligned} \right) + \\ + f \frac{\sigma_{2 \cdot b \cdot r}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left( \begin{aligned} &(d + 2c)(\cos(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \cos(\beta_2 - \lambda - \alpha)) + \\ &+ r \left( \cos(\lambda + \alpha)(\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1) - \right. \\ &\left. - \sin(\lambda + \alpha)(\beta_2 - \beta_1 + \cos(\beta_2 + \beta_1)) \sin(\beta_2 - \beta_1) \right) \end{aligned} \right) + \\ + f \frac{\sigma_{3 \cdot b \cdot r}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left( \begin{aligned} &(d + 2c)(\cos(\beta_2 - \lambda - \alpha) - \sin \lambda) + \\ &+ r \left( (\cos^2 \alpha - \sin^2 \beta_2) \cos(\lambda + \alpha) - \right. \\ &\left. - \sin(\lambda + \alpha) \left( \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_2 - \cos(\alpha - \beta_2) \sin(\alpha + \beta_2) \right) \right) \end{aligned} \right) + \quad (30) \\ + f \frac{b \cdot \sigma_3}{d \cos \alpha} ((h - r(1 - \sin \alpha)) \cdot (d + 2(c + r) - h - r(1 + \sin \alpha))) + \\ + P_o \cdot \cos \alpha \frac{d + 2(c + r)}{d}.$$

От соотношения силы прижима инструмента к заготовке  $P_o$ , силы трения в опоре инструмента  $P_t$  и от силы воздействия окалины на инструмент  $F_o$  зависит, произойдет ли удаление окалины с поверхности заготовки или нет. При  $P_o + P_t > F_o$  удаление окалины произойдет. При  $P_o + P_t < F_o$  окалина вытеснит инструмент и либо полностью останется на поверхности, либо произойдет частичное скалывание окалины, в результате чего уменьшится ее толщина.

### Выводы

1. Предложен перспективный способ удаления окалины с поверхности листового проката, используемого для изготовления полых шариков, который можно использовать в условиях любого, даже небольшого механообрабатывающего предприятия.
2. Новый способ обеспечивает надежное удаление окалины даже в случае, если она очень прочно закреплена на обрабатываемой поверхности.
3. Получены математические модели, позволяющие определить наиболее благоприятные условия для удаления окалины с проката.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теоретическое** исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжной окалиноломатель непрерывно-тривильного агрегата / Д.В. Суфьянов, Н.Н. Огарков и др. // Производство проката. – 2012. – №10. – С. 31-34.
2. **Определение** основных параметров устройств для гидравлического удаления окалины / В.И. Руденко, Г.С. Суков и др. // Metallurgical and mining industry, 2004, no. 4, p. 28-30.
3. **Исследование** возможности наиболее полного удаления окалины с поверхности катанки перед волочением / В.В. Парусов, А.Н. Савьюк и др. // Metallurg. – 2004. – №6. – С. 69-72.

4. **Заявка** 2014105408/02 Российская Федерация, МПК B08B 1/04 (2006.01). Способ очистки поверхности / Королев А.В., Королев А.А. (РФ); заявитель Королев А.В., Королев А.А.; заявл. 13.02.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.

5. **Исследование** влияния режимов обработки на эффективность очистки листового проката для полых шариков от окалины / А.В. Королев, А.В. Панфилова и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – №3. – С. 120-126.

6. **Определение** величины суммарной погрешности наладочного размера при бесцентровом шлифовании шариков / О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров и др. // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – №2 (116). – С. 14-19.

### REFERENCES

1. Sufyanov, D.V., Ogarkov, N.N., Murzaeva, E.A. et al. Theoretical study of the process of passing a hot-rolled strip through a bending-stretching scale breaker of a continuously etching unit", Production of Flates (Proizvodstvo prokata), 2012, no. 10, pp. 31-34.
2. Rudenko, V.I., Sukov, G.S. et al. Determination of the main parameters of devices for hydraulic oxide scale removal // Metallurgical and mining industry, 2004, no. 4, p. 28-30.
3. Parusov, V.V., Savyuk, A.N. et al. Investigation of the possibility of the most complete removal of oxide scale from the wire rod before drawing // Metallurg, 2004, no. 6, p. 69-72.
4. Korolev A.V., Korolev A.A. Method of surface cleaning [Sposob ochistki poverkhnosti], application 2014105408/02 Russian Federation, IPC B08B 1/04 (2006.01), appl. 13.02.2014; publ. 20.08.2015, bul. no. 23
5. Korolev, A.V., Panfilova A.V. et al. Investigation of the influence of processing modes on the efficiency of cleaning sheet metal for hollow spheres from oxide // Bulletin of the Voronezh State Technical University, 2020, Vol. 16, no. 3, p. 120-126.
6. Reshetnikova, O.P., Iznirov, B.M. et al. Determination of the value of the total error of the adjustment size during centerless grinding of balls // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no.2 (116), P. 14-19.

*Рецензент д.т.н.  
Николай Валерьевич Бекренев*