Научный журнал

ISSN 2304-4497

ВЕСТНИК

СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Развиваемся в настоящем,
гордимся прошлым,
создаем будущее!

16+

№ 1, 2024

ISSN 2304-4497
eISSN 2307-1710

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК
Сибирского государственного индустриального университета

№ 1 (47), 2024

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN
of the Siberian State Industrial University

No. 1 (47), 2024

Published since June 2012
It is published 4 times a year

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.
Адрес редакции:
Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 433 М, тел. 8-3843-74-86-28
http: www.sibsiu.ru
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru
Адрес издателя:
Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 336 Г, тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru
Адрес типографии:
Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 280 Г, тел. 8-3843-46-44-02
Подписные индексы:
Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Founder
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State Industrial University»

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)
Certificate of registration:
PI No. FS77-77872 dated 03.03.2020
Editorial office address:
42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University
office 433 M, tel. 8-3843-74-86-28
http: www.sibsiu.ru
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Publisher's address:
42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University
office 336 G, tel. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Printing house address:
42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University
office 280 G, tel. 8-3843-46-44-02

Subscription indexes:
United catalog «Press of Russia» – 41270

Подписано в печать
25.03.2024 г.
Выход в свет
25.03.2024 г.
Формат бумаги 60×88 1/8.
Бумага писчая.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,5.
Уч.-изд. л. 5,9.
Тираж 300 экз.
Заказ № 48.
Цена свободная

Signed to the press
25.03.2024
Coming out
25.03.2024
The paper size is 60×88 1/8.
Writing paper.
Offset printing.
Usl. pech. l. 5,5.
Uch.-ed. l. 5,9.
The circulation is 300 copies.
Order no. 48.
The price is free

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Серебрякова А.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В. Поведение металлов и сплавов под влиянием магнитного поля ………………9

Сарычев В.Д., Невский С.А., Грановский А.Ю., Бащенко Л.П., Шамсутдинова Д.В. Модель конвективного теплопереноса в высокоэнтропийных сплавах при электронно-пучковой обработке …………………19

Чапайкин А.С., Громов В.Е., Чжан П., Иванов Ю.Ф., Крюков Р.Е., Шляров В.В., Семин А.П. Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей сталью в среде азота ………35

Чумаевский А.В., Осипович К.С., Семенчук В.М., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Особенности получения и организации структуры крупногабаритных функционально-градиентных биметаллических элементов на основе нержавеющей стали и меди методом электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии……......…47

Черемнов А.М., Гурьянов Д.А., Чумаевский А.В., Кобзев А.Е., Рубцов В.Е. Закономерности образования дефектов и неоднородностей структуры при фрикционной перемешивающей обработке изделий из титанового сплава, полученных методом электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии…….58

Абатурова А.А., Загуляев Д.В., Серебрякова А.А. Динамика деформационного поведения сплава АК10М2Н при электронно-пучковой обработке………………69

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Запольская Е.М. Исследование влияния темпа выдачи слябов и заготовок на неравномерность теплового состояния и угар металла при нагреве в методических печах ………………………………….81

Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Курочкин Н.М. Энергоэффективная одновалковка дробилка, предназначенная для подготовки сырья к металлургическому переделу……...86

Улаханов Н.С., Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П., Милонов А.С., Воробьев М.С.,

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

Serebryakova A.A., Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Behavior of metals and alloys under the influence of a magnetic field.........................9

Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Bashchenko L.P., Shamsutdinova D.V. Model of convective heat transfer in high-entropy alloys during electron beam processing..19

Chapaikin A.S., Gromov V.E., Zhang P., Ivanov Yu.F., Kryukov R.E., Shlyarov V.V., Semin A.P. Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen environment ……..…….35

Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Semenchuk V.M., Tarasov S.Y., Kolubaev E.A. Peculiarities of obtaining and organising the structure of large-size functional-gradient bimetallic elements based on stainless steel and copper by wire-feed electron beam additive manufacturing …….……47

Cheremnov A.M., Gurianov D.A., Chumaevskii A.V., Kobzev A.E., Rubtsov V.E. Regularities of defects and structural inhomogeneities formation during friction stir processing of titanium alloy products obtained by wire-feed electron beam additive manufacturing ………………..……..58

Abaturova A.A., Zagulyaev D.V., Serebryakova A.A. Dynamics of the deformation behavior of the AK10M2N alloy during electron beam processing………...………………69

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Zapol'skaya E.M. Investigation of the effect of the rate of issuance of slabs and blanks on the unevenness of the thermal state and metal carbon monoxide during heating in methodical furnaces …...81

Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Kurochkin N.M. Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen medium ……………86

Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiin U.L., Semenov A.P., Milonov A.S., Vorob'ev M.S., Moskvin

Москвин П.В., Шин В.И. Электронно-пучковая обработка диффузионных бороалитированных слоев на поверхности стали 5ХНМ 92
Мурко В.И., Спиридонова И.В., Селиванов И.Д. Оптимизация закладочной смеси для Таштагольского рудника.....................103
Трибунский А.В. Исследование влияния кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям............111
Су Ч., Чэн С., Хао Х. Микроструктура и механические свойства проволоки дугового аддитивного производства сплава Al – 5Si**....**120
Морозов И.С., Уманский А.А., Протопопов Е.В., Симачев А.С. Совершенствование технологии выплавки и внепечной обработки специализированных конвертерных сталей для производства мелющих шаров...127
Абабков Н.В. Исследование структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали...135
Кувшинникова Н.И., Пермяков А.А., Темлянцев М.В. Физико-химические процессы в железорудном концентрате, профилактиро-ванным известью......142

P.V., Shin V.I. Electron beam processing of diffusion boroaluminizing layers on the surface of steel 5KHNM 92
Murko V.I., Spiridonova I.V., Selivanov I.D. Optimization of the filling mixture for the Tashtagol mine 103
Tribunskiy A.V. Study of the influence of crystallographic texture on 3005 aluminum alloy sheets bending abilities 111
Su C., Chen X., Hao H. Microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufacturing Al-5Si alloy 120
Morozov I.S., Umanskii A.A., Protopopov E.V., Simachev A.S. Improving the technology of smelting and out-of-furnace processing of specialized converter steels for the production of grinding balls 127
Ababkov N.V. Study of the structural-phase state and internal stresses in zones of localized deformation of samples made of heat-resistant steel 135
Kuvshinnikova N.I., Permyakov A.A., Temlyantsev M.V. Physico-chemical processes in iron ore concentrate, prevented by lime 142

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Набиева Н.М. Исследование условий внедрения инноваций в энергетическом секторе Узбекистана 150
Астанова С.У., Хамзаева А.М. Проблемы занятости, безработицы и развития рынка труда в Кыргызской Республике..................163
Тишевский А.А., Черникова О.П. Экономическое обоснование строительства ремонтного цеха на автотранспортном предприятии **..**.171

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

Nabieva N.M. Study of conditions for the introduction of innovations in the energy sector of Uzbekistan 150
Astanova S.U., Khamzaeva A.M. Problems of employment, unemployment and labor market development of the Kyrgyz Republic 163
Tishevskii A.A. Economic justification for construction of a maintenance department at an automobile operating company ...171

К сведению авторов...........................178
For the information of the authors.........180

Оригинальная статья

УДК 621.92

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-86-91

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ОДНОВАЛКОВКА ДРОБИЛКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННАЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПЕРЕДЕЛУ

© 2024 г. А. Г. Никитин, Ю. А. Епифанцев, Н. М. Курочкин

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

Аннотация. В металлургической промышленности примерно 40 % энергии, затрачиваемой на подготовку сырья для дальнейшего передела, приходится на процессы дробления, которые осуществляются на дробильных машинах. Эти процессы необходимы для получения кусков сырья необходимой фракции для проведении металлургических процессов. Одним из основных показателей процесса дробления является эффективность дробления, которая определяется массой дробленого материала, получаемой при расходовании единицы электроэнергии. Очевидно, что снижение энергопотребления при дроблении является актуальной проблемой, решение которой повышает показатель энергоэффективности работы дробилок. Минимальный расход энергии, необходимый для разрушения хрупкого материала, будет в том случае, если в дробимом куске генерируются только касательные напряжения. Предел прочности при их действии в два раза меньше, чем при возникновении в куске нормальных напряжений при прочих равных условиях (одинаковом размере и материале). С целью уменьшения расхода энергии, требуемой для разрушения хрупкого материала, следует обеспечить в дробимом куске генерацию исключительно касательных напряжений. В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована одновалковая дробилка, конструкция рабочих органов которой способна генерировать в исходном разрушаемом куске сдвиговые деформации, при которых возникают только касательные напряжения. Это происходит за счет того, что в процессе работы дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу. Проведенный силовой анализ работы одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, показал, что выполняется условие создания в разрушаемом куске плоского напряженного состояния (возникают только касательные напряжения). За счет этого происходит уменьшение расход энергии на дробление примерно в два раза по сравнению с щековыми дробилками, которые работают на сжатие.

Ключевые слова: дробилка, энергоэффективность, силовой анализ, хрупкий материал, напряжение, деформация, сдвиг

Для цитирования: Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Курочкин Н.М. Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей сталью в среде азота. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):86–91. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-86-91*

Original article

ENERGY-EFFICIENT SINGLE-ROLL CRUSHER DESIGNED FOR THE PREPARATION OF RAW MATERIALS FOR METALLURGICAL PROCESSING

© 2024 A. G. Nikitin, Yu. A. Epifantsev, N. M. Kurochkin

Siberian State Industrial University (Russia, 654007, Kemerovo region – Kuzbass, Novokuznetsk, Kirova str., 42)

Abstract. In the metallurgical industry, approximately 40 % of the energy spent on preparing raw materials for further processing is accounted for by crushing processes that are carried out on crushing machines. These processes are necessary to obtain pieces of raw materials of the required fraction for metallurgical processes. One of the main indicators of the crushing process is the crushing efficiency, which is determined by the mass of crushed material obtained by consuming a unit of electricity. Obviously, reducing energy consumption during crushing is an urgent problem, the solution of which increases the energy efficiency of the crushers. The minimum energy consumption required to destroy a brittle material will be if only tangential stresses are generated in the crushed piece. The tensile strength under their action is two times less than when normal stresses occur in a piece, all other things being equal (the same size and material). In order to reduce the energy consumption required for the destruction of brittle material, it is necessary to ensure the generation of exclusively tangential stresses in the crushed piece. A single-roll crusher has been designed at the Siberian State Industrial University, the design of the working bodies of which is capable of generating shear deformations in the initial destructible piece, in which only tangential stresses occur. This is due to the fact that during the operation of the crusher, the destruction of the processed material occurs due to forces acting on the crushed piece in the same plane towards each other. The conducted force analysis of the operation of a single-roll crusher operating on a shear showed that the condition for creating a flat stress state in the destroyed piece is fulfilled (only tangential stresses occur). Due to this, the energy consumption for crushing is reduced by about two times compared to jaw crushers that operate on compression.

Keywords: crusher, force analysis, energy efficiency, brittle material, stress, deformation, shear

For citation: Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Kurochkin N.M. Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen medium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):86–91. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-86-91*

Введение

В металлургической промышленности примерно 40 % энергии, затрачиваемой на подготовку сырья для дальнейшего передела, приходится на процессы дробления, при этом потребность в переработанном сырье увеличивается ежегодно на 7 % [1; 2]. Эти процессы направлены на получения кусков сырья необходимой фракции для металлургических процессов. Куски сырья заданной фракции получают на дробилках различных конструкций (щековых [3 – 6], валковых [7 – 10] и конусных [11 – 13]), которые работают на сжатие. В них разрушение кусков происходит под действием нормальных напряжений. Такой способ дробления является наиболее энергоемким [14 – 16].

Очевидно, что снижение энергопотребления при дроблении является актуальной проблемой, решение которой повышает показатель энергоэффективности работы дробилок [12; 13].

Минимальный расход энергии, необходимой для разрушения хрупкого материала, будет в том случае, если в дробимом куске генерируются только касательные напряжения, так как предел прочности при их действии в два раза меньше, чем при возникновении в куске нормальных напряжений при прочих равных условиях (одинаковом размере и материале) [14]. С целью уменьшения расхода энергии, требуемой для разрушения хрупкого материала, следует обеспечить в дробимом куске генерацию исключительно касательных напряжений.

Объект исследования

В процессе работы любой машины, в том числе и дробильной, возникают силы, действующие на объект обработки с целью выполнения технологической операции, расчет величины которых необходим для определения мощности привода машины. Силовой анализ рабочего процесса является неотъемлемым этапом проектирования машины.

В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована одновалковая дробилка, конструкция рабочих органов которой способна генерировать в исходном разрушаемом куске сдвиговые деформации, при которых возникают только касательные напряжения. Это происходит за счет того, что в процессе работы дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу. Такой способ разрушения хрупких материалов обеспечивает снижение потребления энергии примерно в два раза по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

В связи с тем, что конструкция одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, имеет существенные отличия от известных схем дробильных машин, необходимо провести анализ ее работы и процесса дробления хрупких материалов.

Конструкция одновалковой дробилки, в которой происходит процесс генерации в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформаций, при которых возникают только касательные напряжения, должна удовлетворять следующим условиям: на валке установлены упоры одинаковой высоты, при этом их высота равна величине требуемой фракции готового продукта; зазор между валком и нижней кромкой выходного отверстия течки соответствует высоте упора; размер выходного отверстия течки соответствует величине загружаемого дробимого куска.

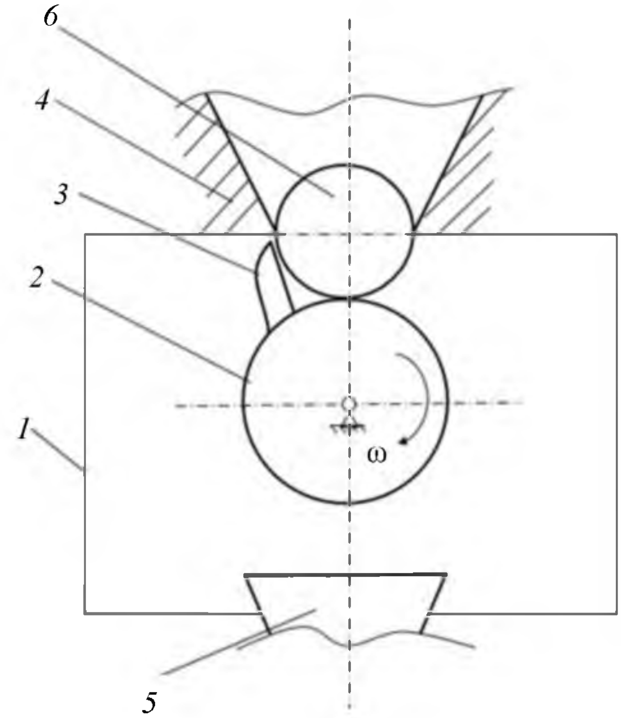

Рис. 1. Схема одновалковой дробилки,
работающей на сдвиг:
1 – корпус дробилки; *2* – приводной валок; *3* – ребро;
4 – течка; *5* – разгрузочная воронка; *6* – дробимый кусок
Fig. 1. Diagram of a single–roll crusher operating on a shear:
1 – crusher body; *2* – drive roll; *3* – rib; *4* – flow;
5 – discharge funnel; *6* – crushed piece

Дробилка (рис. 1) состоит из корпуса *1*, в котором установлен в радиальных подшипниках приводной валок *2*. Валок приводится во вращение электродвигателем через муфту и клиноременную передачу, передающую вращение валку. Валок оснащен упорами *3*, закрепленными на его поверхностях, при этом рабочая поверхность упоров совпадает с радиальной линией валка. Высота упоров должна быть одинаковой и равна зазору между наружной поверхностью валка и нижней кромкой выходного отверстия течки, чтобы обеспечить генерацию в исходном разрушаемом куске сдвиговую деформацию. В верхней части корпуса имеется течка *4* для подачи материала, при этом ось течки совпадает с вертикальной осью валка. Нижняя кромка течки не должна касаться верхней части упора, установленного на валке. В нижней части корпуса расположена разгрузочная воронка *5*.

Дробление происходит следующим образом. Куски дробимого материала *6* через течку один за другим подаются в зону дробления, образованную внешней поверхностью валка, рабочей поверхностью упора и нижней кромкой выходного отверстия течки.

При вращении валка упоры, расположенные на поверхностях валка, периодически образуют зазор между нижней кромкой выходного отверстия течки и внешней поверхностью валка, размер которого больше размера куска, в который проваливается кусок и опирается на кромку течки, находящейся со стороны, противоположной направлению вращения валка. Во время вращения валка упор рабочей поверхностью прижимает кусок к нижней кромке течки. За счет возникновения в нем касательных напряжений развивается деформация сдвига и кусок разрушается. В результате разрушения исходного куска образуется фрагмент заданной фракции.

Один из фрагментов, который находится в кармане, двигающимся в сторону вращения валка, проваливается в разгрузочную воронку. Оставшийся после разрушения куска в течке фрагмент падает вниз в карман, образованный поверхностью валка и расстоянием между двумя соседними упорами, а затем перемещается, опираясь на рабочую поверхность следующего упора, в сторону разгрузочной воронки.

Если оставшийся в течке фрагмент больше установленного зазора, то происходит вторичное разрушение куска и так до тех пор, пока последний фрагмент не станет меньше зазора и переместится в разгрузочную воронку. После чего подается следующий исходный кусок.

В зависимости от заданного гранулометрического состава исходного продукта и требуемого размера фракции конечного устанавливается необходимый зазор между валком, на котором крепятся сменные упоры соответствующей высоты, и нижней кромкой выходного отверстия течки, а также меняется течка соответствующего размера.

Целью силового анализа является определение закона распределения сил, действующих на дробимые куски, в процессе дробления и связанного с этим вида напряженного состояния, возникающего в кусках, которое определяет характер их разрушения.

Так как форма куска не влияет на величину и направление сил, действующих на кусок со стороны рабочего инструмента, а также на процесс дробления [20], то изучение силового анализа следует проводить на куске, имеющем правильную форму (кубическую или сферическую). В дальнейшем принимается сферическая форма.

При попадании куска в зону дробления он находится в контакте одной стороной с нижней кромкой течки, находящейся со стороны, противоположной направлению вращения валка в точке B, а другой – с вершиной упора в точке A (рис. 2).

При вращении валка кусок зажимается между вершиной рабочей поверхности упора и нижней кромкой течки, при этом возникают силы, действующие на кусок. Одна из них со стороны вершины ребра P_A направлена по касательной к траектории движения точки A, другая – со сто-

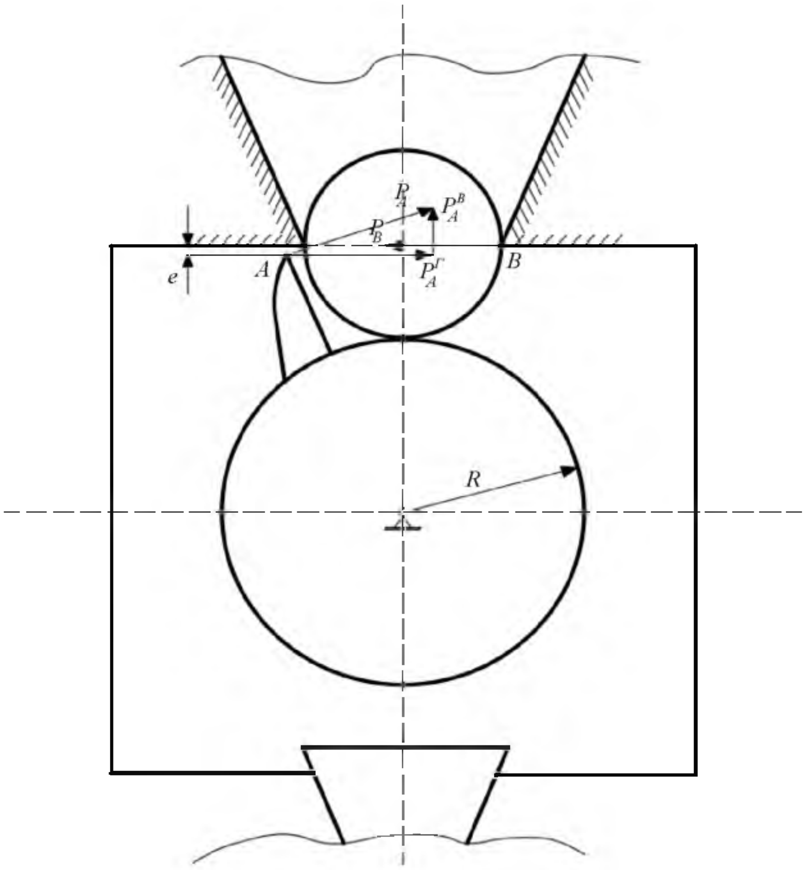

Рис. 2. Схема сил, действующих на кусок дробимого материала
Fig. 2. Diagram of forces acting on a piece of crushed material

роны нижней кромки P_B направлена от точки B по линии, соединяющей нижние кромки течки. Так как проекция силы P_A в вертикальной плоскости $P_A^{\text{в}}$ значительно меньше горизонтальной составляющей $P_A^{\text{г}}$, то ей можно пренебречь. Из-за малого расстояния e, являющегося плечом пары сил P_B и горизонтальной составляющей $P_A^{\text{г}}$, создаваемый ими момент пренебрежимо мал, поэтому не оказывает влияния на схему силового воздействия на кусок.

Разрушение куска хрупкого материала происходит в результате действия в дробимом куске касательных напряжений, которые вызывают деформацию чистого сдвига. В этом случае сила, необходимая для осуществления дробления, определяется по следующей формуле:

$$P = \tau A,$$

где τ – предел прочности касательных напряжений, возникающих в дробимом куске при его разрушении; $A = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения дробимого куска; r – радиус дробимого куска.

В одновалковой дробилке, работающей на сдвиг, в куске дробимого хрупкого материала действуют только касательные напряжения, под действием которых происходит разрушение куска, что обеспечивает снижение потребления энергии примерно в два раза по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

Выводы

Разработана конструкция энергоэффективной одновалковой дробилки, предназначенной для разрушения хрупких материалов при подготовке сырья к металлургическому переделу. В рассматриваемой дробилке, работающей на сдвиг, происходит процесс генерации в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформаций, при этом возникают только касательные напряжения. Проведенный силовой анализ работы одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, показал, что выполняется условие создания в разрушаемом куске плоского напряженного состояния (возникают только касательные напряжения). За счет этого происходит уменьшается расход энергии на дробление примерно в два раза по сравнению с шековыми дробилками, которые работают на сжатие.

БИБЛИГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полторацкий Л.М., Барнаев И.А. *Конкурентность черной металлургии в условиях кризисных явлений*. Новокузнецк: Полиграфист. 2009:129.

2. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting. 2008:330.
3. Legendre D. *Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor: Doctor of Technology Thesis Thermal and Flow. Engineering Laboratory. Faculty of Science and Engineering*. Abo Akademi University. Turku. Finland. 2019:78.
4. Mwangi P.N., Muvengei O.M., Mbuya T.O. Review of Discrete Element Modelling in Optimisation of Energy Consumption of a Single-Toggle Jaw Crusher. In: *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*. 2018:251–259.
5. Pat. 105682804 US. *Jawcrushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders*. Publ. 15.06.2016.
6. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Лактионов С.А., Витушкин А.В. Анализ факторов, влияющих на силу дробления хрупких материалов. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2013;56(2):30–32. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-30-32;* EDN: QCTWPZ.
7. Gupta A., Yan D.S. *Roll Crushers (Chapter 6),* Mineral Processing Design and Operation (An Introduction). 2006:142–160.
8. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017;103–104:60–66. *http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009*
9. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing modes to increase the efficiency of one – roll crusher operation. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2017;84:012033. *http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012033*
10. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(4):303–307. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307;* EDN: DHVFXT.
11. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018;127:15–21. *http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.008*
12. Atta K.T., Euz´ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model. *IFAC-PapersOnLine*. 2019:52(14):1–6. *http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154*
13. Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В. Силовой анализ процесса дробления в конусной дробильной машине. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(12):980–986. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-980-986;* EDN: YUONPF.
14. Масленников В.А. Дробилки, разрушающие материал сжатием. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996;10–11:124–138.
15. Лагунова Ю.А. Дробимость хрупких материалов при разрушении их сжатием. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996;10–11:121–124.
16. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Сравнительный анализ энергозатрат дробилок, работающих на сжатие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;4:56–57.
17. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. *Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации*. Москва: Машиностроение. 1990:320.
18. Целиков А.И. *Машины и агрегаты металлургических заводов*. Т.1. Москва: Машиностроение. 1987:440.
19. Goulet J. *Resistance des materiaux*. Bordas Paris. 1976:192 p.
20. Родин Р.А. О работе, расходуемой на дробление горных пород. *Известия вузов. Горный журнал*. 1987;6:84–89.

REFERENCES

1. Poltoratskii L.M., Barnaev I.A. *Competitiveness of ferrous metallurgy in the conditions of crisis phenomena*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2009:129. (In Russ.).
2. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting. 2008:330.
3. Legendre D. *Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor: Doctor of Technology Thesis Thermal and Flow. Engineering Laboratory. Faculty of Science and Engineering*. Abo Akademi University. Turku.Finland. 2019:78.
4. Mwangi, P.N., Muvengei O.M., Mbuya T.O. Review of Discrete Element Modelling in Optimisation of Energy Consumption of a Single-Toggle Jaw Crusher. In: *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*. 2018:251–259.
5. Pat. 105682804 US. *Jawcrushers. Sandvik intellectual property* / Lindstrom Anders. Publ. 15.06.2016.
6. Nikitin A.G., Yepifantzev Yu.A., Laktionov S.A., Vitushkin A.V. Analysis of factors affecting strength of fragile materials fragmentation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013;56(2):30–

32. (In Russ.) *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-30-32;* EDN: QCTWPZ.

7. Gupta A., Yan D.S. *Roll Crushers (Chapter 6),* Mineral Processing Design and Operation (An Introduction). 2006:142–160.
8. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017;103–104:60–66. *http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009*
9. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing modes to increase the efficiency of one – roll crusher operation. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2017;84:012033. *http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012033*
10. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in universal crushing machine with roll locker. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(4):303–307. (In Russ.) *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307;* EDN: DHVFXT.
11. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018;127:15–21. *http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.008*
12. Atta K.T., Euz′ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model. *IFAC-PapersOnLine*. 2019:52(14):1–6. *http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154*
13. Sakharov D.F., Vitushkin A.V. Power analysis of the crushing process in a cone crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(12):980–986. (In Russ.) *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-980-986;* EDN: YUONPF.
14. Maslennikov V.A. Crushers that destroy material by compression. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996;10–11:124–138. (In Russ.)
15. Lagunova Yu.A. Fragility of brittle materials when they are destroyed by compression. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 1996;10–11:121–124. (In Russ.)
16. Nikitin A.G., Sakharov D.F. Comparative analysis of energy consumption of crushers working on compression. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2011;4:56–57. (In Russ.)
17. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. *Design, calculation, features of operation*. Moscow: Mashinostroenie, 1990:320.
18. Tselikov A.I. *Machines and aggregates of metallurgical plants. Vol.1.* Moscow: Mashinostroenie. 1987:440. (In Russ.)
19. Goulet J. *Resistance des materiaux* / Bordas Paris. 1976:192 p.
20. Rodin R.A. About the work spent on crushing rocks. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1987;6:84–89. (In Russ.)

Сведения об авторах

Александр Григорьевич Никитин, *д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения,* Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-9198-6386
E-mail: nikitin1601@yandex.ru
SPIN-код: 9916-1572

Юрий Андреевич Епифанцев. *к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: epifantsev42@mail.ru
SPIN-код: 3994-4296

Никита Максимович Курочкин, *аспирант кафедры механики и машиностроения,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: k_nikitos@mail.ru

Information about the authors

Aleksandr G. Nikitin, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair Mechanics and Mechanical Engineeringt,* Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-9198-6386
E-mail: nikitin1601@yandex.ru
SPIN-код: 9916-1572

Yurii A. Epifuntsev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair Mechanics and Mechanical Engineeringt,* Siberian State Industrial University
E-mail: epifantsev42@mail.ru
SPIN-код: 3994-4296

Nikita M. Kurochkin, *Postgraduate o f the Chair o f Mechanics and Machine Engineering,* Siberian State Industrial University
E-mail: k _nikitos@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.10.2023
После доработки 24.10.2023
Принята к публикации 01.11.2023

Received 10.10.2023
Revised 24.10.2023
Accepted 01.11.2023