

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 621.791.052.620.18

© Самотугін С.С.¹, Гагарин В.А.², Мазур В.А.³

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Предложена методика расчета конструктивных параметров плазмотрона косвенного действия для поверхностной модификации деталей сложной формы. Проведен анализ параметров плазменного упрочнения, имеющих влияние на результат обработки.

Ключевые слова: плазмотрон, плазменная струя, сопло, межэлектродная вставка.

Самотугін С.С., Гагарин В.О. Мазур В.О. Оптимізація конструкції плазмотрону для поверхневої модифікації сталевих виробів. Запропоновано методику розрахунку конструктивних параметрів плазмотрону непрямої дії для поверхневої модифікації деталей складної форми. Проведено аналіз параметрів плазмового зміцнення, що мають вплив на результат обробки.

Ключові слова: плазмотрон, плазмовий струмінь, сопло, міжелектродна вставка.

S.S. Samotugin, V.O. Naharin, V.A. Mazur. Optimization of plasmotron construction for surface modification of steel products. A technique for calculating the design parameters of an indirect action plasmotron for surface modification of complex shape parts has been proposed. The plasma modification process parameters characteristics, their mutual influence, the possibility of regulation have been given. The qualitative parameters of the plasmotron are influenced, first of all, by the parameters due to which the plasmotron is formed – arc current, the kind of the plasma-forming gas and its flow rate, the speed of the plasmotron movement and the parts. The diameter of the plasmotron channel and the nozzle apertures provide compression and stabilization of the plasma arc. The length of the channel and the distance to the surface being treated provide the maximum thermal efficiency and plasma temperature. The outer dimensions of the plasmotron are obtained from its design, proceeding from the necessity to be sufficiently cooled. It is necessary to take into account not only the requirements imposed on the hardened workpiece surface, but also on the mutual influence of these parameters. When changing the hardening parameters, it is important to save the service life of the plasmotron. This is possible with the correct choice of the cooling mode. A calculation of the liquid flow rate through the cavity of the plasmotron that is necessary to fulfil the given conditions and secure the proper heat exchange has been made. Tests of plasmatrons of various designs. confirmed the data of the calculations.

Keywords: plasmotron, plasma stream, nozzle, interelectrode insertion.

Постановка проблемы. Многие детали различных механизмов работают в условиях трения, и потому увеличение износостойкости является важной научно-технической задачей. Интенсивный износ приводит к поломкам, необходимости проведения преждевременных ремонтных работ, а для таких машин как металлорежущие станки ведет к потере заданной точности обработки [1-3].

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gagarin_v_a@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, v.a.mazurini@gmail.com

Использование в промышленности большинства методов восстановления и упрочнения поверхностей неэффективно в связи с высокой стоимостью, трудоемкостью и опасностью возникновения неблагоприятного напряженного состояния в поверхностном слое. Весьма перспективно использование методов поверхностной обработки высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН). Из методов ВКИН наиболее экономичным и производительным является плазменная обработка.

Процесс плазменного поверхностного упрочнения достаточно хорошо изучен и эффективно используется при поверхностной модификации для упрочнения деталей и инструмента как мелкого размера (сверла, резцы), так и крупногабаритных (валки прокатных станов) цилиндрической и плоской формы [4]. Расширение номенклатуры изделий, эксплуатационные свойства которых возможно повысить при помощи плазменной модификации, ограничено формой и размерами этих деталей. Это обусловлено необходимостью обеспечения малой дистанции обработки – расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности должно выдерживаться в пределах 5 ± 1 мм. Габариты плазмотронов высокой мощности в сочетании с плоской торцевой поверхностью сопловой части делают практически невозможным выполнение указанных условий при упрочнении сложных поверхностей. Таким образом, возможность обработки деталей сложной формы либо достижения заданных свойств поверхностного слоя связана с необходимостью оптимизации конструктивных параметров плазмотрона [5].

Анализ последних исследований и публикаций. Известны конструкции плазмотронов для плазменной резки, наплавки, напыления. Такие плазмотроны имеют различные габариты и форму в зависимости от мощности и назначения. Наименьшие размеры имеют плазмотроны для микроплазменной обработки. Они наиболее подходят для обработки изделий сложной формы. Однако размер упрочненной зоны при использовании такого плазмотрона не превышает 1 мм и не может быть использован для обработки крупногабаритных изделий, особенно при необходимости получения упрочненного слоя большей толщины [4-7].

В ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» разработан и успешно применяется плазмотрон косвенного действия с секционированной межэлектродной вставкой [5]. Разработанный плазмотрон способен работать при тепловой мощности до 40 кВт и удельной тепловой мощности $(1-1,5) \cdot 10^5$ Вт/см². Достижимая глубина упрочненной зоны – до 3-4 мм, ширина – до 10-15 мм. Данный плазмотрон может работать со стандартным оборудованием для плазменной сварки и резки (Киев-4, АПР-403, УПС-804 и др.).

Цель статьи – анализ параметров упрочнения и конструкции плазмотрона косвенного действия с учетом взаимного их влияния с целью достижения заданных требований к поверхности при обработке крупногабаритных стальных деталей.

Изложение основного материала. Основными регулируемыми параметрами процесса плазменного поверхностного упрочнения являются максимальная температура нагрева T и скорость охлаждения W поверхностного слоя. Параметры T и W при разработке технологии плазменного упрочнения не являются параметрами прямого регулирования, а являются комплексными параметрами, на величину которых влияет большое число факторов – мощность плазменной струи (сила тока I , напряжение U); скорость обработки v (скорость перемещения плазмотрона); давление P_g и расход Q_g плазмообразующего газа; давление P_e и расход воды Q_e , охлаждающей плазмотрон; дистанция обработки h ; форма и размеры обрабатываемого инструмента или детали; теплофизические и механические характеристики обрабатываемого материала (γ ; λ ; α ; E ; HV ; σ_m); конструктивные параметры плазмотрона.

Параметры плазменной обработки являются переменными, благодаря чему можно значительно варьировать характеристики технологического процесса, которые включают в себя характеристики подводимого к плазмотрону тока, плазмообразующего газа, водяного охлаждения, а именно:

– сила тока I определяет эффективную тепловую мощность плазменной струи q :

$$q = 0,24 \cdot \eta_{nn} \cdot I \cdot U, \quad (1)$$

где η_{nn} – КПД плазменного нагрева, $\eta_{nn} = \eta_n \cdot \eta_c$; η_n – КПД плазмотрона; η_c – КПД плазменной струи (с учетом потерь на излучение и отражение); U – напряжение на дуге (связь величин тока и напряжения определяется вольт-амперной характеристикой (ВАХ) плазмотрона и источника питания).

- скорость перемещения плазмотрона V выбирается для каждого материала индивидуально из-за различий теплофизических свойств обрабатываемых материалов;
- расход плазмообразующего газа должен обеспечивать стабильное плазмообразование, а также стабилизацию дуги в канале плазмотрона;
- от марки плазмообразующего газа зависит температура плазмы. Инертные газы обеспечивают защиту внутреннего канала плазмотрона от окисления, а обрабатываемую поверхность – от окисления и выгорания легирующих элементов.

Увеличение силы тока и расхода плазмообразующего газа ведет к увеличению твердости и глубины упрочненного слоя. Это объясняется тем, что тепловая мощность плазменной струи изменяется пропорционально току, а при увеличении расхода газа происходит дополнительное обжатие струи, вызывающее рост температуры плазмы.

Конструктивные параметры плазмотрона косвенного действия являются постоянными. Использование других конструктивных параметров необходимо производить после тщательных расчетов в случае невозможности добиться оптимальных параметров настройкой оборудования. Влияние параметров плазмотрона рассмотрим на примере разработанного в ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» плазмотрона косвенного действия с секционированной межэлектродной вставкой [6].

Диаметр канала плазмотрона d_k (рисунок). При неизменной величине силы тока электрической дуги и расхода газа изменение диаметра канала приводит к росту потерь теплоты, а изменение длины входного и начального участков – к увеличению длины установившегося участка дуги. Также повышается стабильность горения дуги, поэтому, несмотря на некоторое увеличение потерь теплоты, достигается повышение мощности плазменной струи. Если дуга горит в узком канале плазмотрона, то каждая порция газа становится частью дуги и на выходе из канала имеет температуру, равную средней температуре дуги. При увеличении диаметра канала дуга изолируется потоком газа от внутренних стенок плазмотрона, тем самым выполняя функции стабилизации дуги и защиты канала плазмотрона.

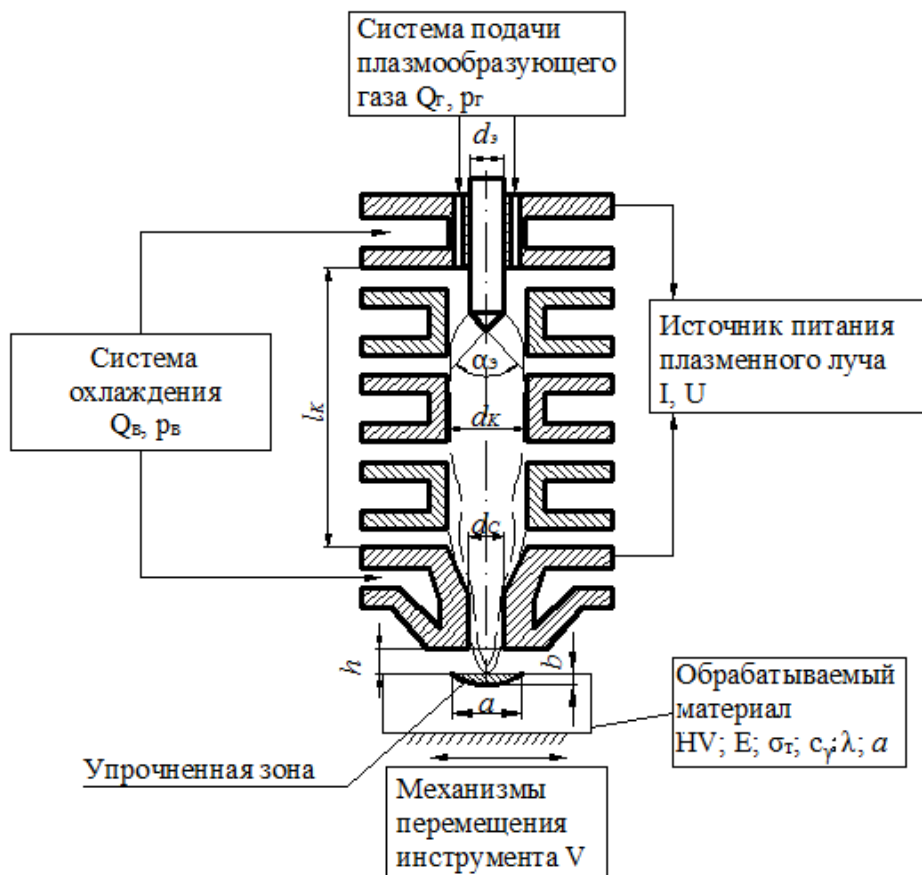


Рисунок – Схема процесса плазменной обработки как объекта регулирования

Межэлектродное расстояние L_k влияет на степень преобразования энергии электрического тока в энергию плазменной струи. С увеличением длины канала (межэлектродного промежутка) увеличивается энтальпия аргоновой плазменной струи. Однако при удлинении дуги свыше определенного предела возрастают потери теплоты, а энерговыделение в дуге практически не изменяется. В связи с этим мощность плазменной струи с увеличением длины дуги непрерывно снижается.

Диаметр сопла d_c плазматрона косвенного действия выполняется меньше диаметра канала плазматрона. За счет этого возможно повышение концентрации тепловой энергии в пятне нагрева плазменной струи. Но вместе с тем, с уменьшением d_c снижается эрозионная стойкость анода и увеличиваются потери теплоты, так как требуется более интенсивное водяное охлаждение сопла. Затрудняется также возбуждение плазменной струи. Диаметр канала плазматрона в направлении течения газа сужается, что повышает энтальпию газа. Внутренний канал сопла имеет коническую и цилиндрическую части с выходным диаметром 6 мм, который позволяет получить высокую плотность теплового потока, оптимальную для поверхностного упрочнения с высокой скоростью нагрева и охлаждения. Повышенные температуры, ведущие к эрозии и даже оплавлению сопла, ограничивают возможности дальнейшего уменьшения диаметра сопла.

Угол заточки электрода α_2 влияет на стабильность горения плазменной струи. Образование в процессе работы на торце электрода площадки оплавления может приводить к смещению пятна дуги, что ведет к колебаниям всего столба дуги и, соответственно, потерям тепловой мощности.

Расстояние от выходного отверстия сопла плазматрона до упрочняемой поверхности h должно оставаться постоянным для максимального использования тепловой энергии плазменной струи. Это ограничивает применение плазменной поверхностной обработки для деталей сложной формы. Возможно расширение номенклатуры обрабатываемых деталей за счет изменения формы плазматрона [7].

На качественные характеристики процесса плазменной модификации влияют, прежде всего, параметры, благодаря которым формируется плазменная струя с необходимыми параметрами обработки. Наружные размеры определяются конструктивно с учетом необходимости охлаждения. На рисунке изображена схема процесса плазменной обработки плазматроном косвенного действия с подводимыми и конструктивными параметрами, влияющими на процесс плазменной поверхностной модификации.

Обработка деталей сложной формы может быть произведена плазматроном, нижняя часть которого (наружная поверхность сопла) имеет форму конуса. Детали такого плазматрона менее подвергаются нагреву как горячим газом, отходящим из зоны упрочнения, так и от нагретой поверхности детали. Кроме того, такая форма позволяет облегчить контроль над процессом упрочнения [8, 9].

При выборе параметров упрочнения и геометрических параметров плазматрона необходимо учитывать не только требования, предъявляемые к упрочняемой поверхности детали (рисунки), но и взаимное воздействие данных параметров (таблица). Так при увеличении силы тока повышается тепловая мощность плазменной струи, и детали плазматрона будут подвержены более высоким тепловым нагрузкам. Стойкость плазматрона в таком случае можно сохранить, увеличив расход охлаждающей жидкости.

Наружный диаметр плазматрона обусловлен необходимостью охлаждения и его уменьшение возможно только при соответствующих изменениях системы охлаждения. Проблема расчета системы охлаждения стоит и при замене сопла плоской формы коническим, так как уменьшается объем полости и ухудшается возможность подвода жидкости.

Расчет системы охлаждения выполняется, исходя из условия отсутствия кризиса кипения на наружной поверхности водоохлаждаемой обоймы радиуса r_1 при прохождении через катод количества теплоты Q_k :

$$q_w = \frac{Q_k}{2\pi r_1^2} \quad (2)$$

При силе тока 500 А, коэффициенте надежности $K_{оxl} = 10$, количестве теплоты, проходящей через катод $Q_k = 1600$ Вт, критическая плотность теплового потока катода составит $q_{кр} = 1,02 \cdot 10^7$ Вт/м². По этим исходным данным определяется расход охлаждающей воды и ее температура насыщения в единицу времени.

Таблица

Входные параметры технологической системы плазменного упрочнения

Наименование группы параметров	Параметр	Влияние на параметр
Параметры плазменной обработки	Сила тока, I Напряжение, U	Расход охлаждающей воды
	Давление охлаждающей воды Расход охлаждающей воды	Стойкость плазмотрона
	Давление газа Расход газа Марка газа	Стабильность дуги
	Диаметр канала плазмотрона Межэлектродное расстояние Диаметр сопла Высота отверстия сопла	Температура плазменной струи Размер упрочненной зоны
Движение детали или плазмотрона	Скорость перемещения плазмотрона Параметры градиентной обработки	Твердость Размер упрочненной зоны
Обрабатываемый материал	Марка материала Размеры и форма Теплопроводность Температуропроводность Удельная теплоемкость	Твердость Скорость перемещения плазмотрона Ток обработки

Требуемый расход охлаждающей жидкости в полости охлаждения определяет число Рейнольдса и характер режима теплообмена (пузырькового или конвективного) для выбранных условий, поскольку критерий Рейнольдса прямо пропорционален скорости потока жидкости и гидравлическому диаметру зазора в полости охлаждения

$$Re_{жс} = \frac{V_г \cdot d_z}{\nu}, \quad (3)$$

где $d_z = 2\delta_г$ – гидравлический диаметр; $\delta_г$ – величина зазора; ν – вязкость воды.

Величина зазора $\delta_г$ определяется из уравнения:

$$\delta_г \geq \frac{G_г}{2\pi r_{тр} \rho V_г}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воды; $r_{тр}$ – радиус трубы.

После чего определяются критерии Рейнольдса, Нуссельта и Прандтля по которым уточняется величина температуры поверхности стенки.

Расчет параметров охлаждения анода ведется по тепловому потоку, подводимому к аноду, который равен:

$$Q_a = (1 - \eta)N_{эл}, \quad (5)$$

где η – к.п.д. плазмотрона; $N_{эл}$ – мощность, подаваемая на дугу, Вт, $N_{эл} = U \cdot I$.

Плотность теплового потока на стенке анода рассчитывается в зависимости от длины анода l (мм), внутреннего диаметра анода d (м):

$$q = \frac{Q}{\pi \cdot l \cdot d}. \quad (6)$$

Стенки электрода, которые контактируют с охлаждающей водой, будут иметь температуру кипения воды $t_{вн}$ при давлении $P = 3,25 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, т. е. $t_w = 134^\circ\text{C}$.

Определяем температурный перепад, который допускается на стенке медного электрода:

$$\Delta t_{\max} = t_{нл}^{Cu} - t_w, \text{ где } t_{нл}^{Cu} = 1083^\circ\text{C} - \text{температура плавления меди.}$$

После определения температурного перепада Δt по известной температуре охлаждающей воды может быть найден расход воды в единицу времени, который необходим для охлаждения плазмотрона, а также плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности и расход охлаждающей воды. Дополнительно повысить теплоотдачу можно, увеличив площадь теплоотдачи, например, за счет увеличения количества внутренних ребер на сопле.

Данные расчетов подтверждаются стойкостными испытаниями. При изготовлении сопла конической формы были добавлены два ребра жесткости и увеличен расход жидкости при работе. Стойкость сопла и резиновых уплотнений при обработке плоских поверхностей и направляющих соответствует стойкости исходной модели плазматрона.

Выводы

Проведен анализ параметров плазменного упрочнения и их влияния на термическое воздействие при плазменной модификации. Приведены оптимальные параметры плазматрона косвенного действия для получения максимального КПД в процессе упрочнения.

Рассмотрено взаимное влияние параметров упрочнения и их расчет на примере системы охлаждения плазматрона, что позволяет сохранить ресурс и работоспособность плазматрона.

Список использованных источников:

1. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей / В.М. Власов. – М. : Машиностроение, 1987. – 314 с.
2. Гельберг Б.Т. Ремонт промышленного оборудования / Б.Т. Гельберг, Г.Д. Пекелис. – М. : Высшая школа, 1988. – 304 с.
3. Панин В.Е. Поверхностные слои как синергетический активатор пластического течения нагруженного твердого тела / В.Е. Панин // *Металловедение и термическая обработка материалов*. – 2005. – № 7. – С. 62-68.
4. Петров С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С.В. Петров, А.Г. Сааков. – Киев : ТОПАС, 2000. – 220 с.
5. Самотугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Самотугин, Л.К. Лещинский. – Донецк : Новый мир, 2002. – 338 с.
6. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. – 406 с.
7. Дзюба В.Л. Фізика, техніка та застосування низькотемпературної плазми : монографія / В.Л. Дзюба, К.А. Корсунов. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – 448 с.
8. Пат.108154 Україна, МПК В 23 К 10/00, В 23 К 10/02, В 05 В 7/22. Плазматрон для поверхневого зміцнення / С.С. Самотугін, В.О. Гагарін, В.О. Мазур. – № u201511910; заявл. 02.12.15; опубл. 11.07.16, Бюл. № 13. – 4 с.
9. Самотугин С.С. Принципы усовершенствования конструкции плазматрона для поверхностной упрочняющей обработки направляющих станков / С.С. Самотугин, В.А. Гагарин // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2013. – Вип. 26. – С. 168-174. – (Серія: Технічні науки).

References:

1. Vlasov V.M. *Rabotosposobnost uprochnennikh trushchykhsia poverkhnostei* [Capacity of the work-hardened ground surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 314 p. (Rus.)
2. Gelberg B.T., Pekelis G.D. *Remont promsshennogo oborudovaniya* [Repair of industrial equipment]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1988. 304 p. (Rus.)
3. Panin V.E. *Poverkhnostnye sloy kak synerhetycheskiy aktyvator plastycheskogo techeniya nahruzhennogo tverdogo tela* [Superficial layers as synergetics activator of plastic flow of the loaded solid]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka materialov – Physical metallurgy and heat treatment of materials*, 2005, no.7, pp. 62-68. (Rus.)
4. Petrov S.V., Saakov A.G. *Plazma produktov sgoraniya v ynzheneryi poverkhnosty* [Plasma of foods of combustion is in engineering of surface]. Kyiv, TOPAS Publ., 2000. 220 p. (Rus.)
5. Samotugin S.S., Leshhinskij L.K. *Plazmennoe uprochnenie instrumentalnykh materialov* [Plasma hardening of tool materials]. Donetsk, Noviy mir Publ., 2002. 338 p. (Rus.)
6. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topoljanski P.A. *Plazmennyye tekhnologii. Rukovodstvo dlya inzhenerov* [Plasma technologies. Manual for Engineers]. SPb, Politechnical University Publ., 2008. 406 p. (Rus.)
7. Dzyuba V.L., Korsunov K.A. *Fizyka, tekhnika ta zastosuvannia nyzkotemperaturnoi plazmy* [Physicist, technician of that application of low temperature plasma]. Luhansk, SNU of Dal Publ., 2007. 448 p. (Rus.)

8. Samotugin S.S., Gagarin V.A., Mazur V.A. *Plazmotron dlia poverkhnevoho zmitsnennia* [Plasmatron for the superficial strengthening]. Patent of UA, no.108154, 2016. (Ukr.)
9. Samotugin S.S., Gagarin V.A. Printsipyi usovershenstvovaniya konstrukttsii plazmotrona dlya poverhnostnoy uprochnyayushey obrabotki napravlyayuschih stankov [The principles of improvement plasmatron design for the surfaces of strengthening treatment of machine tools guides]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences*, 2013, iss. 26, pp. 168-174. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.09.2017

УДК 621.838.225

© Коноваленко В.В.¹, Пополов Д.В.², Зайцев Г.Л.³,
Засельский И.В.⁴

К РАСЧЕТУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ВИНТОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН

В работе получена аналитическая зависимость, связывающая горизонтальную и вертикальную жесткости винтовой цилиндрической пружины с круглым и прямоугольным сечением витка, позволяющая определить рациональные параметры виброизолирующих опор вибрационных грохотов. На основании полученных зависимостей установлено, что получение равной горизонтальной и вертикальной жесткости в виброизолирующих опорах, состоящих из винтовых цилиндрических пружин, невозможно.

Ключевые слова: грохот, винтовая цилиндрическая пружина, жесткость.

Коноваленко В.В., Пополов Д.В., Зайцев Г.Л., Засельский И.В. До розрахунку горизонтальної жорсткості гвинтових циліндричних пружин. У роботі отримана аналітична залежність, що зв'язує горизонтальну та вертикальну жорсткості гвинтової циліндричної пружини з круглим і прямокутним перетином витка, яка дозволяє визначити раціональні параметри віброізолюючих опор вібраційних грохотів. На підставі отриманих залежностей встановлено, що отримання рівної горизонтальної і вертикальної жорсткості у віброізолюючих опорах, що складаються з гвинтових циліндричних пружин, неможливо.

Ключові слова: грохот, гвинтова циліндрична пружина, жорсткість.

V.V. Konovalenko, D.V. Popolov, G.L. Zaytsev, I.V. Zaselskiy. To the calculation of horizontal rigidity of coiled springs. The article reveals the problems of the design of elastic vibration isolating elements of vibrating screens. Particular attention is paid to ensuring the equality of horizontal and vertical rigidity. Based on the calculation methods study of the coiled cylindrical springs stiffness, it has been established that the formulas used to calculate the horizontal stiffness give incorrect results. Thus, the goal of sci-

¹ канд. техн. наук, доцент, Криворожский металлургический институт Национальной металлургической академии Украины, г. Кривой Рог

² канд. техн. наук, доцент, Криворожский металлургический институт Национальной металлургической академии Украины, г. Кривой Рог, dmitrykr@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Криворожский металлургический институт Национальной металлургической академии Украины, г. Кривой Рог, zajtsev_gennady@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, Криворожский металлургический институт Национальной металлургической академии Украины, г. Кривой Рог, zasicom82@gmail.com