

## ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Н.К. Толочко,

профессор каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор

К.Л. Сергеев,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

*Выполнено экспериментальное моделирование фильтрования водомасляной эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости через ферроабразивный порошок в условиях магнитно-абразивной обработки. Определены зависимости изменения объемной концентрации масляной фазы и среднего размера масляных капель в результате фильтрования, а также длительность фильтрования от дисперсности эмульсии. Рассмотрен возможный механизм фильтрационного действия порошка.*

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость, ферроабразивный порошок, фильтрация, дисперсность.

*The experimental modeling of water-oil cutting emulsion filtration through ferro-abrasive powder in conditions of magnetic-abrasive processing has been carried out. The dependences between the change in the volume concentration of the oil phase and the average size of oil droplets as a result of filtration, as well as the filtration duration depending on the emulsion dispersion were determined. The possible mechanism of the powder filtration effect is considered.*

**Key words:** magnetic-abrasive processing, cutting emulsion, ferro-abrasive powder, filtration, dispersion.

### Введение

Магнитно-абразивная обработка (МАО) является одной из эффективных технологий финишной обработки поверхностей металлических деталей сложной формы. Ее сущность состоит в том, что ферроабразивный порошок (ФАП), уплотненный и прижатый к поверхности детали магнитным полем, оказывает абразивное воздействие на поверхность детали, которая совершает комбинированное вращательное и возвратно-поступательное осциллирующее движение относительно абразивных частиц, благодаря чему обеспечивается съем металла и сглаживание микронеровностей на обрабатываемой поверхности. Для усиления воздействия ФАП на поверхность детали используется водомасляная эмульсионная смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), которая подается в зону обработки через слой ФАП. К наиболее распространенным типам СОЖ, применяемым в МАО, относятся водомасляные эмульсии.

В работе [1] авторами экспериментально установлена существенная зависимость эффективности МАО от дисперсности масляной фазы водомасляной эмульсионной СОЖ. В частности, было показано, что уменьшение среднего размера масляных капель эмульсии в результате ультразвукового диспергирования в два раза (от 6 до 3 мкм) приводило к увеличению скорости удельного массового съема металла в 1,3 раза и уменьшению шероховатости поверхности в 1,6 раза. Ранее подобное влияние дисперсности СОЖ на эффективность МАО, в частности, на съем метал-

ла, наблюдалось в работах [2, 3]. Авторы данных работ связывали это с фильтрацией СОЖ при ее прохождении через слой ФАП, полагая, что частицы вязких компонентов, т.е. масляные капли, в случае водомасляной эмульсионной СОЖ, будучи по размерам гораздо меньше пор в порошке, легко проходят сквозь поры, в то время как крупные в них задерживаются, т.е. закупоривают их. Как следствие, с уменьшением размеров частиц вязких компонентов фильтрующее действие ФАП ослабляется, что способствует улучшению функциональных свойств СОЖ.

С целью изучения закономерностей фильтрационных процессов МАО в зависимости от дисперсности водомасляной эмульсионной СОЖ было выполнено экспериментальное моделирование этих процессов, предварительные результаты которого, представленные в работе [4], позволили сделать заключение о том, что механизм фильтрования СОЖ через ФАП в процессе МАО, связанный с закупориванием пор в порошке масляными каплями, практически не оказывает влияния на конечный результат фильтрования – уменьшение объемной концентрации масляной фазы.

В данной работе представлены расширенные результаты экспериментального моделирования процесса фильтрования водомасляной эмульсионной СОЖ через ФАП в процессе МАО, в том числе зависимости изменения объемной концентрации масляной фазы и среднего размера масляных капель в результате фильтрования, а также длительности фильтрования от дисперсности эмульсии. В ходе обсуждения этих результатов предложен механизм процесса

фильтрации, согласно которому задерживание масляной фазы СОЖ порошком связано не с закупориванием пор порошка масляными каплями, как считалось ранее, а с осаждением масляных капель на частицах порошка. В рамках предложенного механизма процесса фильтрации выполнен оценочный расчет параметров этого процесса.

### Основная часть

#### Закономерности фильтрационных процессов

Эксперименты по фильтрованию СОЖ через ФАП проводили по методике, описанной в работе [4]. Исходная СОЖ представляла собой водную эмульсию с объемной концентрацией масляной фазы  $C_{V0} = 5\%$ , приготовленную на основе концентрата, содержащего отходы масложирового производства. В экспериментах использовали образцы СОЖ с начальными средними размерами масляных капель  $d_{k(0)}$ , равными 4,9 мкм (в исходном состоянии) и 1,5 мкм (после максимального ультразвукового диспергирования), которые фильтровали через слои образцов ФАП Ж15КТ со средними размерами частиц  $d_{\text{ч}}$ , равными 110 мкм (фракция 1), 90 мкм (фракция 2) и 55 мкм (фракция 3). ФАП засыпали на высоту  $H = 30$  мм в вертикально установленную стеклянную трубку внутренним диаметром  $D = 8$  мм, нижнее отверстие которой было перекрыто тканевой сеткой, удерживавшей частицы ФАП. В трубку заливали порцию СОЖ объемом  $V_{\text{ж}} = 2$  мл, которая проходила через ФАП и стекала в емкость, расположенную под трубкой.

В ходе исследования выполнено две серии экспериментов. В первой серии трубка находилась в неподвижном положении, во второй – ей сообщались вибрации частотой 50 Гц и амплитудой 100 мкм с помощью электромагнитного вибратора. Эксперименты по фильтрованию СОЖ через ФАП, находящийся в подвижном состоянии благодаря действию вибраций, представляли особый интерес, поскольку именно такое состояние, называемое виброоживленным, приобретает порошок в процессе МАО в результате взаимодействия его частиц с микронеровно-

стями поверхности движущейся детали [4].

В экспериментах измеряли время  $t$  прохождения СОЖ через ФАП с помощью секундомера. После завершения фильтрации определяли в пробах отфильтрованной СОЖ объемную концентрацию масляной фазы  $C_V$  с помощью аналитических весов AR-2140 и средние размеры масляных капель  $d_k$  с помощью компьютерного микроскопа с разрешающей способностью не менее 0,5 мкм и программного комплекса обработки и анализа изображений «AutoScanStudio».

Результаты экспериментов показаны на рисунках 1-3.

Объемная концентрация масляной фазы  $C_V$  после прохождения СОЖ через слой как неподвижного, так и подвижного ФАП, уменьшается (рис. 1). Это означает, что масляная фаза частично задерживается слоем ФАП, осаждающаяся на частицах порошка, т.е. ФАП оказывает фильтрующее действие на эмульсию. Эффект фильтрации, т.е. отношение  $C_{V0}/C_V$  тем больше, чем меньше  $d_{k(0)}$  и  $d_{\text{ч}}$ . Для подвижного порошка это отношение меньше, чем для неподвижного.

Средний размер масляных капель  $d_k$  после прохождения СОЖ через слой как неподвижного, так и подвижного ФАП, уменьшается по сравнению с их начальным средним размером  $d_{k(0)}$  (рис. 2). Степень уменьшения  $d_k$ , т.е. отношение  $d_{k(0)}/d_k$  тем меньше, чем меньше  $d_{k(0)}$  и больше  $d_{\text{ч}}$ . Для подвижного порошка это отношение больше, чем для неподвижного.

Продолжительное время  $t$  прохождения СОЖ через слой как неподвижного, так и подвижного ФАП, тем больше, чем меньше  $d_{k(0)}$  и  $d_{\text{ч}}$  (рис. 3). Причем для подвижного порошка  $t$  меньше, чем для неподвижного.

#### Механизм фильтрационных процессов

Как отмечалось выше, в работах [2, 3] было сделано заключение о том, что механизм фильтрации СОЖ через слой ФАП, с которым связывается влияние дисперсности СОЖ на эффективность МАО, состоит исключительно в закупоривании пор порошка крупными масляными каплями эмульсии. Однако

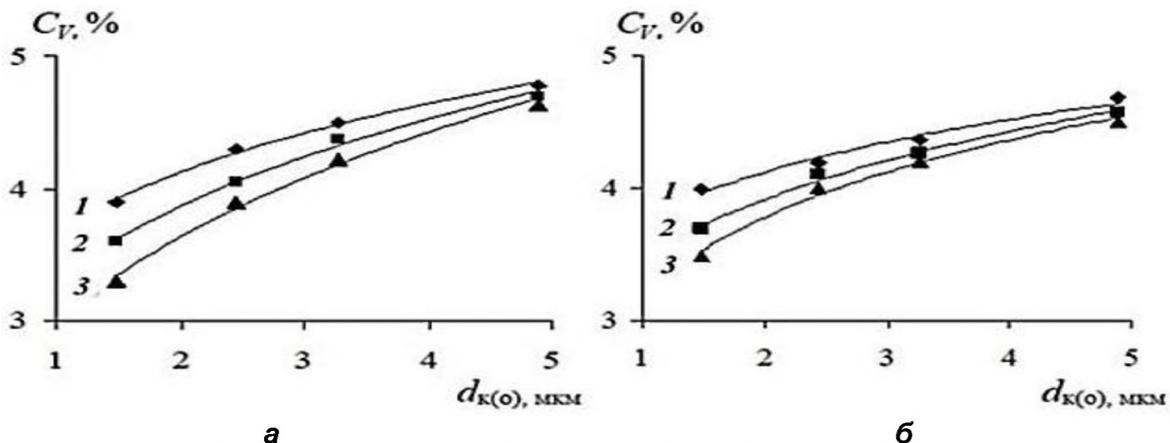


Рисунок 1. Зависимость  $C_V$  ( $d_{k(0)}$ ) для разных фракций ФАП (1, 2 и 3)  
Состояние ФАП: неподвижное (а) и подвижное (б)

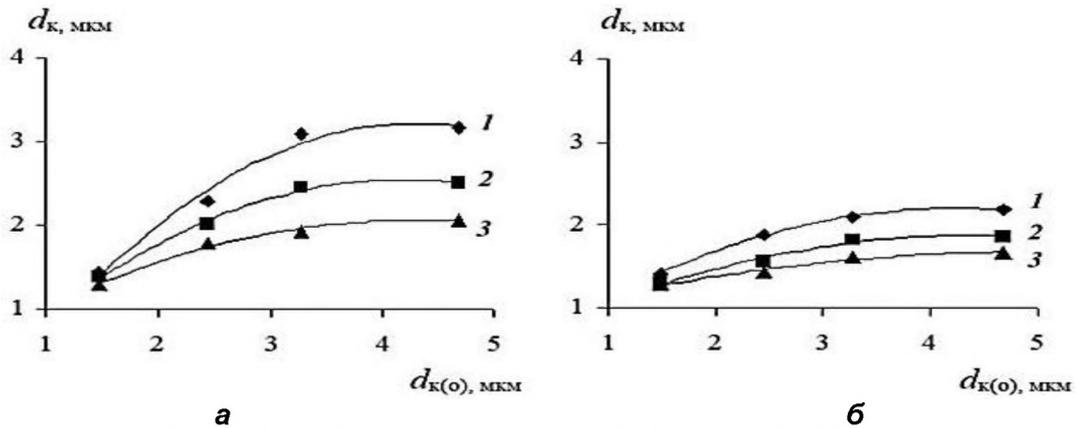


Рисунок 2. Зависимость  $d_k(d_{k(o)})$  для разных фракций ФАП (1, 2 и 3)  
Состояние ФАП: неподвижное (а) и подвижное (б)

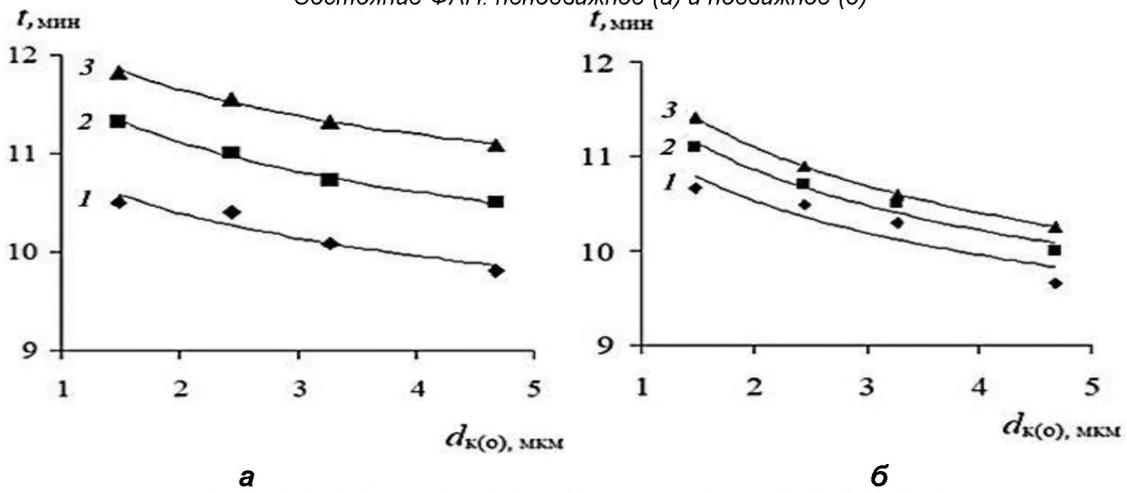


Рисунок 3. Зависимость  $t(d_{k(o)})$  для разных фракций ФАП (1, 2 и 3)  
Состояние ФАП: неподвижное (а) и подвижное (б)

представленные экспериментальные результаты не дают оснований считать его основным и тем более единственным механизмом фильтрования СОЖ через ФАП в процессе MAO.

Во-первых, вероятность возникновения явлений закупоривания пор каплями весьма мала, поскольку  $d_{k(o)}$  гораздо меньше среднего размера межчастичных пор (диаметра поровых каналов)  $d_{п}$  в порошке, соизмеримого со средним размером частиц порошка:  $d_{k(o)} \ll d_{п}$  ( $d_{п} \approx d_{ч}$ ). Как следствие, капли в основном беспрепятственно проходят сквозь поры (поровые каналы).

Во-вторых, явления закупоривания пор каплями, даже если они случаются, носят кратковременный характер, поскольку порошок в процессе MAO находится в виброоживленном состоянии. При этом частицы порошка совершают непрерывное движение и, соответственно, размеры пор (диаметры поровых каналов) непрерывно изменяются, то уменьшаясь, то увеличиваясь, и если в данный момент узкий вход или перешеек какого-либо канала заблокирован каплей, то спустя некоторое время он может расширяться настолько, что блокировка прекратится. Иначе говоря, в процессе MAO явления закупоривания пор каплями непрерывно сменяются явлениями раскупоривания,

причем и те, и другие происходят хаотично, как во времени, так и по объему порошка. При этом закупоривания не вызывают прекращения движения капель через слой порошка в принципе, а лишь создают кратковременные остановки в их движении.

Таким образом, механизм фильтрования СОЖ через ФАП в процессе MAO, связанный с закупориванием пор каплями, практически не оказывает влияния на конечный результат фильтрования – уменьшение объемной концентрации масляной фазы. В связи с этим, в работе [4] было сделано предположение, что фильтрование СОЖ через ФАП обусловлено не механическим задержанием масляных капель в порах порошка, а их осаждением на частицах порошка. Фактически ФАП выступает в роли коалесцирующего фильтра с контактной зернистой загрузкой, в котором коалесценция происходит благодаря явлениям адгезии и смачивания при контакте масляной фазы с поверхностью частиц порошка. При этом капли могут захватываться частицами в общем случае в результате гравитационного осаждения, эффектов «зацепления», броуновской диффузии или гидродинамического столкновения.

В рамках предложенного механизма фильтрования рассмотрены возможные причины эксперимен-

тально установленных особенностей фильтрования СОЖ через ФАП в зависимости от  $d_{к(о)}$  и  $d_ч$  [4].

Повышение отношения  $C_{V0}/C_V$  с уменьшением  $d_{к(о)}$  связано с ростом численной концентрации масляных капель эмульсии по мере ее диспергирования, а его повышение связано с уменьшением  $d_ч$  с ростом численной концентрации частиц ФАП, поскольку и то, и другое ведет к росту числа контактов капель с частицами, с последующим осаждением их на частицах (рис. 1).

Уменьшение  $d_к$  по сравнению с  $d_{к(о)}$  с уменьшением  $d_{к(о)}$  означает, что порошок задерживает преимущественно более крупные капли. Действительно, чем крупнее капли по сравнению с частицами, т.е. чем больше отношение  $d_{к(о)}/d_к$ , тем эффективней они взаимодействуют с частицами и лучше осаждаются на их поверхности. Как следствие, отношение  $d_{к(о)}/d_к$  становится меньше в тех случаях, когда  $d_{к(о)}$  уменьшается и  $d_к$  увеличивается (рис. 2).

Увеличение значения времени  $t$  с уменьшением  $d_{к(о)}$  обусловлено повышением вязкости эмульсии по мере ее диспергирования, происходящим вследствие увеличения численной концентрации масляных капель и, соответственно, уменьшения расстояния между ними, что вызывает усиление их гидродинамического взаимодействия. В свою очередь, увеличение  $t$  с уменьшением  $d_к$  обусловлено возрастанием роли пристеночных течений, замедляющих общее движение эмульсии по каналам (рис. 3).

Особенности фильтрования СОЖ при различных состояниях ФАП – неподвижном и подвижном объясняются следующим образом.

Меньшее отношение  $C_{V0}/C_V$  для подвижного порошка может быть обусловлено меньшим значением  $t$ , благодаря чему меньшее число капель успевает вступить в контакт с частицами порошка и осесть на них.

Большее отношение  $d_{к(о)}/d_к$  для подвижного порошка может быть связано с тем, что частицы порошка, находясь в движении, чаще контактируют с мелкими каплями, задерживая их на себе.

Меньшее значение  $t$  для подвижного порошка, т.е. более быстрое прохождение эмульсии через подвижный порошок связано с тем, что в порошке в силу движения частиц практически все поровые каналы оказываются проницаемыми для эмульсии, которая протекает по ним в целом беспрепятственно, за исключением остановок, связанных с кратковременной блокировкой каналов масляными каплями. В противоположность этому, в неподвижном порошке часть каналов оказывается заблокированной на весь период фильтрования, так что общее число каналов, проницаемых для эмульсии, сокращается, что ведет к замедлению прохождения эмульсии через порошок.

Ниже приведены оценочные расчеты количества масляной фазы СОЖ, оседающей на частицах ФАП, выполненные с учетом результатов экспериментального моделирования процесса фильтрования в рамках предложенного механизма его реализации.

Основным фактором, определяющим сущность механизма фильтрования СОЖ слоем ФАП в процессе

МАО, является пребывание этого слоя в виброоживленном состоянии. Частицы виброоживленного порошка находятся в постоянном контакте с вибрирующей площадкой [5]. В случае МАО такой площадкой, вызывающей вибрации ФАП, является покрывная микронеровностями поверхность движущейся детали, к которой ФАП прижимается магнитным полем. В виброоживленном порошке силы сцепления и, следовательно, сила трения между частицами уменьшаются, частицы сближаются между собой, т.е. порошок уплотняется [6]. Если интенсивность вибраций превышает некоторое критическое значение, то порошок переходит в состояние виброкипения, при котором частицы порошка отрываются от вибрирующей площадки, а сам порошок разрыхляется. Очевидно, что в процессе МАО состояние виброкипения ФАП не допускается.

При выполнении расчетов предполагалось, что:

- 1) частицы порошка имеют сферическую форму;
- 2) частицы порошка с учетом уплотнения порошка в состоянии виброоживления, хотя и находятся в непрерывном хаотическом движении, то удаляясь друг от друга, то сближаясь друг с другом, в целом образуют в своем расположении среднюю по времени плотнейшую упаковку, для которой коэффициент упаковки  $K = 0,74$ ;
- 3) масляная фаза оседает на поверхности всех частиц равномерным слоем.

Методика расчетов состояла в следующем:

1. Расчет количества частиц  $N_ч$  (шт) в слое ФАП.

Объем реального слоя порошка:

$$V_{\Pi} = \pi R^2 H, \quad (1)$$

где  $R = \frac{D}{2}$  – внутренний радиус стеклянной

трубки.

Объем одной частицы:

$$V_ч = \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{d_ч}{2}\right)^3. \quad (2)$$

Объем модельного слоя порошка:

$$V_{\Pi} = \frac{N_ч V_ч}{K}. \quad (3)$$

Откуда

$$N_ч = \frac{KV_{\Pi}}{V_ч} = \frac{6KR^2 H}{d_ч^3}. \quad (4)$$

2. Расчет объема масляной фазы  $V_{M/ч}$ , отфильтрованной порошком, т.е. осевшей на всех частицах:

$$V_{M/ч} = (C_{V0} - C_V) V_{ж}. \quad (5)$$

3. Расчет толщины слоя  $h$  масляной фазы, осевшей на одной частице.

Площадь поверхности частицы:

$$S_ч = 4\pi \left(\frac{d_ч}{2}\right)^2. \quad (6)$$

Объем масляной фазы, осевшей на одной частице:

$$V_{M/ч(о)} = \frac{V_{M/ч}}{N_{ч}} \quad (7)$$

Откуда

$$h = \frac{V_{M/ч(о)}}{S_{ч}} = \frac{(C_{V0} - C_V)V_{ж}d_{ч}}{6\pi KR^2H} \quad (8)$$

Ниже приведены аналогичные оценочные расчеты количества масляной фазы СОЖ, оседающей на частицах ФАП, для случая, когда порция подаваемой СОЖ имеет объем  $V_{ж}^*$ , равный объему свободного пространства между частицами в слое порошка.

Методика расчетов в этом случае состояла в следующем:

1. Расчет объема подаваемой порции СОЖ:

$$V_{ж}^* = (1 - K)V_{п} \quad (9)$$

2. Расчет объема масляной фазы  $V_{M/ч}^*$ , отфильтрованной порошком, т.е. осевшей на всех частицах:

$$V_{M/ч}^* = (C_{V0} - C_V)V_{ж}^* \quad (10)$$

3. Расчет толщины слоя  $h^*$  масляной фазы, осевшей на одной частице.

Объем масляной фазы, осевшей на одной частице:

$$V_{M/ч(о)}^* = \frac{V_{M/ч}^*}{N_{ч}} \quad (11)$$

Откуда

$$h^* = \frac{V_{M/ч(о)}^*}{S_{ч}} = \frac{(C_{V0} - C_V)(1 - K)V_{п}d_{ч}}{6\pi KR^2H} \quad (12)$$

В таблице 1 представлены численные значения параметров  $h$  и  $h^*$  для разных значений  $d_{к(о)}$  и  $d_{ч}$ , рассчитанные по описанным выше методикам.

**Таблица 1. Численные значения параметров  $h$  и  $h^*$**

$d_{к(о)}$ , МКМ	$d_{ч}$ , МКМ	$h$ , МКМ	$h^*$ , МКМ
4,9	110	0,092	0,018
	90	0,081	0,016
	55	0,053	0,010
1,5	110	0,339	0,066
	90	0,336	0,066
	55	0,232	0,045

Масляные пленки толщиной порядка 0,01-0,1 мкм, сравнимой с полученной в расчетах, довольно часто образуются в различных узлах трения. Например, между скользящим стальным шариком и плоским стальным диском при достаточных величинах контактного давления и скорости скольжения [7], в коренных подшипниках двигателя при начальном разгоне автомобиля [8] и т.д.

## Заключение

Установленные закономерности процесса фильтрации СОЖ через ФАП в процессе МАО и предложенный механизм этого процесса следует учитывать при рассмотрении возможных причин влияния дисперсности СОЖ на эффективность МАО. Это связано с тем, что фильтрация вызывает изменение дисперсности СОЖ, что, в свою очередь, влечет изменение величины практически всех рабочих действий СОЖ: смазывающего, охлаждающего, режущего, моющего [4].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Толочко, Н.К. Влияние дисперсности эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости на эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.К. Толочко, К.Л. Сергеев // Технология машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 31-35.
2. Сакулевич, Ф.Ю. Роль смазывающе-охлаждающих жидкостей при магнитно-абразивной обработке / Ф.Ю. Сакулевич, Н.Я. Скворчевский. – Минск: БелНИИНТИ, 1981. – 52 с.
3. Скворчевский, Н.Я. Научные основы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки созданием сверхсильных магнитных полей и новых технологических сред: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Н.Я. Скворчевский. – Минск, 1994. – 422 с.
4. Толочко, Н.К. Фильтрация эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости через ферроабразивный порошок в процессе магнитно-абразивной обработки / Н.К. Толочко, К.Л. Сергеев // Технология машиностроения. – 2016. – № 4. – С. 16-22.
5. Хайлов, В.С. Введение в технологию основного органического синтеза / В.С. Хайлов, Б.Б. Брандт. – Л.: Химия, 1969. – 560 с.
6. Рейхсфельд, В.О. Реакционная аппаратура и машины заводов основного органического синтеза и синтетического каучука / В.О. Рейхсфельд, В.С. Шейн, В.И. Ермаков. – Л.: Химия, 1975. – 392 с.
7. Dwyer-Joyce, R.S. Ultrasonic measurement for film thickness and solid contact in elastohydrodynamic lubrication / R.S. Dwyer-Joyce, T. Reddyhoff, J. Zhu // Journal of Tribology. – 2011. – V. 133. – № 3. – P. 031501.
8. Schilowitz, A. Oil Film Thickness in a Bearing of a Fired Engine – Part IV: Measurements in a Vehicle on the Road / A. Schilowitz, J. Waters // SAE Transactions. – 1986. – V. 95. – Section 6. – P. 837-844.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 11.05.2023