

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФЕРРОМАГНИТНУЮ ЧАСТИЦУ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТОТЕРМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Н. В. Воронин<sup>1</sup>, Ю. В. Родионов<sup>1</sup>, Д. В. Никитин<sup>1</sup>, И. С. Филатов<sup>2</sup>

*Кафедра «Механика и инженерная графика» (1),  
rodionow.u.w@rambler.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ»;  
ТОГБПОУ «Приборостроительный колледж» (2), г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** магнитное поле; поверхностное армирование; расчет сил; теплообмен; ферромагнитные частицы.

**Аннотация:** Рассмотрены силы, действующие на ферромагнитную частицу со стороны магнитного и теплового полей, а также силы, противодействующие ее внедрению со стороны поверхностного слоя полимера. Проведен расчет сил, действующих на ферромагнитную частицу в процессе ее внедрения в поверхностный слой полимера на примере никеля и полипропилена. Рассчитан баланс сил, необходимый для внедрения частицы ферромагнетика в расплавленную поверхность термопластичного полимера и устойчивой фиксации в ней. Показана универсальность применяемого подхода для расчета параметров модифицирования поверхности изделий из термопластов с различными свойствами ферромагнитными частицами разной дисперсности и характеристик.

---

### Введение

Все большее применение в узлах и деталях машин и аппаратов химической промышленности и сельскохозяйственных машин находят изделия из термопластичных полимеров [1 – 3]. Они высокотехнологичны, дешевы в производстве и переработке, но обладают низкой поверхностной твердостью и износостойкостью, что ограничивает сферу их использования.

Существенно повысить износостойкость и поверхностную твердость полимерных деталей представляется возможным, внедрив в поверхностный слой термопластов металлические частицы. Надежная фиксация внедряемых частиц возможна в случае использования ультрадисперсных ферромагнетиков, воздействуя на них магнитным полем высокой интенсивности в направлении их внедрения в поверхностный слой термопласта.

Для правильного расчета параметров воздействия магнитного поля различной напряженности на частицы, имеющие различные размеры и физические свойства, необходимо досконально знать силы, действующие на них как со стороны магнитного поля, так и со стороны расплавленного поверхностного слоя полимера. При этом важно учитывать изменение напряженности магнитного поля при модифицировании полимерных изделий различной толщины, воздействие теплового потока на процесс внедрения частицы, удельную теплоемкость и теплопроводность полимера и внедряемой частицы, а также противодействующие внедре-

нию частицы поверхностные силы, такие, как сила поверхностного натяжения, Архимедова сила, сила вязкого трения и сила сопротивления среды.

Учитывая все составляющие процесса армирования поверхности термопласта, необходимо вывести соотношение сил, гарантированно обеспечивающих проникновение частицы в модифицируемую поверхность термопласта и надежное удержание в ней [1 – 3].

Цель статьи – определение и расчет сил, действующих на ферромагнитную частицу при внедрении ее в поверхностный слой полимера. Рассмотрены как силы, способствующие проникновению частицы в поверхность (сила тяжести  $F_{тяж}$ , сила давления воздушного потока  $F_{дав}$ , магнитная сила захвата  $F_{магн}$ ), так и противодействующие ее проникновению силы (сила вязкого трения  $F_{в. тр}$ , сила Архимеда  $F_A$ , сила поверхностного натяжения  $F_{п. н}$ , сила сопротивления среды  $F_{сопр}$ ) со стороны поверхностного слоя термопласта и показано соотношение сил для гарантированного прохода частиц ферромагнетика на необходимую глубину и устойчивую фиксацию данных частиц в поверхностном слое.

### Методика исследования

Задача расчета состоит в описании действующих на частицы ферромагнитного материала сил и демонстрации принципиальной возможности внедрения ультрадисперсных ферромагнитных частиц в поверхностный слой изделий из термопластичных полимеров при одновременном действии теплового и магнитного полей. Главным критерием внедрения частицы является значительное преобладание сил, воздействующих на частицу извне, над силами сопротивления внедрению со стороны поверхностного слоя полимера.

Нагрев поверхности и формирование расплавленного поверхностного слоя осуществляются в течение короткого периода времени (порядка нескольких секунд). Вследствие малых размеров частицы и ее высокой (по отношению к полимеру) теплопроводности формирование расплавленного слоя происходит в большей степени за счет нагрева самой частицы. Сам поверхностный слой, в который внедряются частицы, представляет собой высоковязкую ньютоновскую несжимаемую жидкость (так как течения жидкости как такового в данном случае нет). Вращение частицы в поверхностном слое практически отсутствует, так как его компенсируют сила вязкого трения и сила сопротивления среды. В данном случае, вне зависимости от формы частицы, под действием магнитного поля частица примет такое положение, чтобы коэффициент сопротивления среды был минимальным [4 – 8].

Слой состоит из внедренных ферромагнитных частиц и полимерной матрицы в расплавляемую в процессе армирования приповерхностную область. При этом площадь, занимаемая внедренными частицами ферромагнетика, составляет от 50 % и выше, что сообщает поверхностному слою высокую износостойкость и поверхностную твердость по сравнению с исходным полимером. Объемные характеристики армированной детали (температуростойкость, ударная вязкость, пределы прочности/текучести и т.д.) не изменятся. Расстояние между внедренными частицами не менее половины диаметра внедряемой частицы.

Начальными, промежуточными и конечными условиями (рис. 1) в данном случае являются два момента соответственно:

- 1) Ферромагнитные частицы на поверхности полимера уже захвачены магнитным полем, но передача тепла от нагретого воздушного потока к поверхностному слою полимера и частице отсутствует (то есть не начато формирование необходимого расплавленного/размягченного поверхностного слоя);

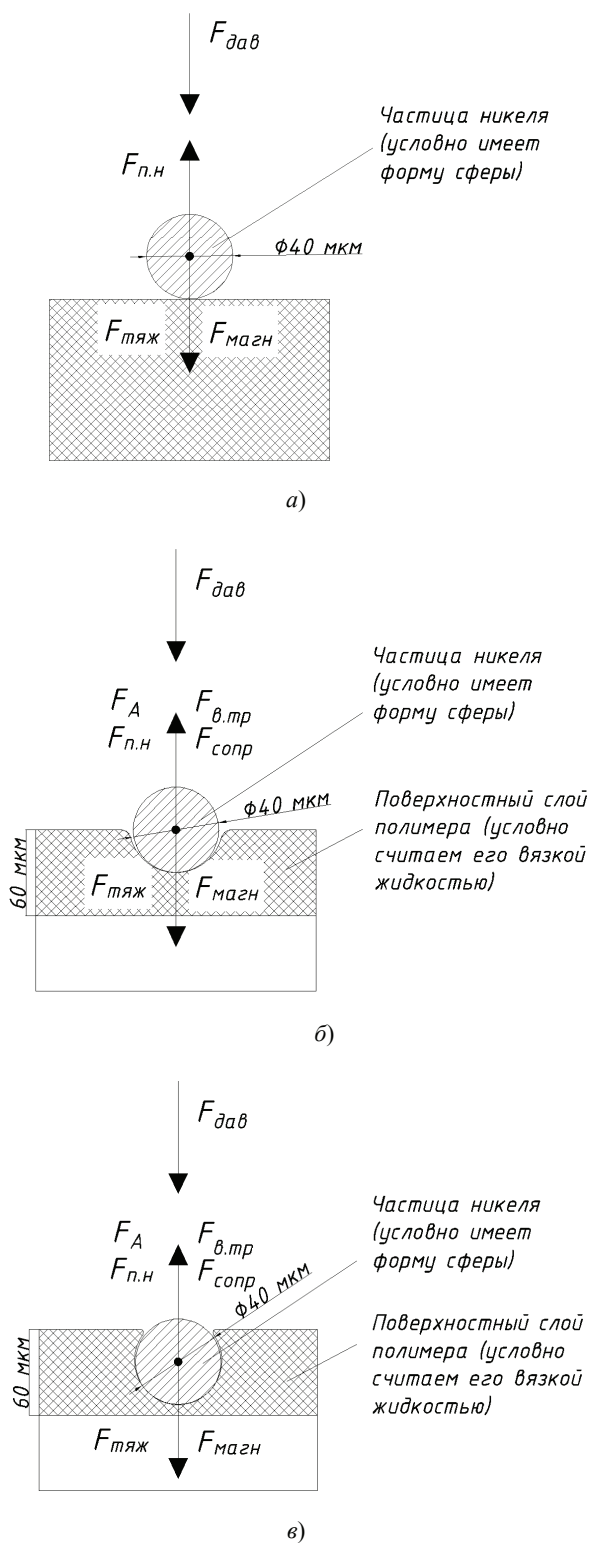


Рис. 1. Схема расположения ферромагнитной частицы на поверхности полимера в начальной (а), промежуточной (б) и конечной (в) стадиях процесса ее внедрения

2) Передача тепла от нагретого воздушного потока к поверхностному слою полимера и частице присутствует, частица прошла необходимое расстояние и закрепились в поверхностном слое полимера (не менее 75 % от диаметра частицы для надежного ее удержания на поверхности);

Дополнительными условиями являются допущения о формировании нагретой ферромагнитной частицей локального объема расплавленного полимера и движение данной частицы в нем с одновременным распространением жидкофазного состояния по более глубоким слоям термопласта. Поверхностный слой полимера находится в жидком состоянии и имеет следующие характеристики: показатель текучести расплава (ПТР) – 0,29...0,35 г/мин, индекс расплава – 0,02...0,5 г/мин, средняя динамическая вязкость –  $2 \cdot 10^4$  Па·с [4 – 8].

### Результаты и их обсуждение

Определим и рассчитаем силы, действующие на ферромагнитную частицу как извне, так и со стороны расплавленного поверхностного слоя полимера, считая его жидкой средой с толщиной 60 мкм (см. рис. 1).

Формула расчета магнитной силы захвата [9 – 12], действующей на ферро-частицу

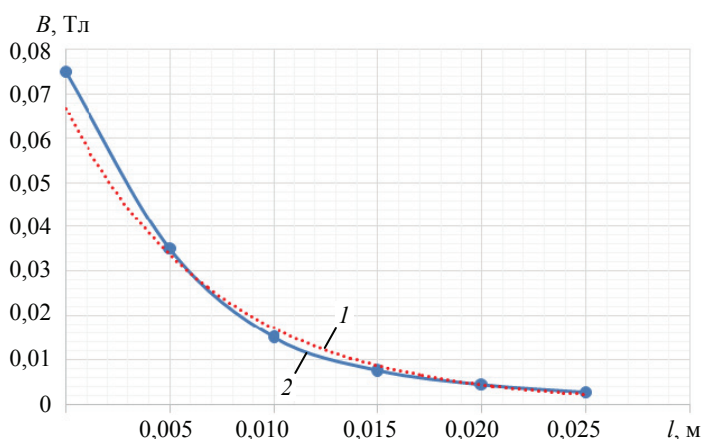
$$F_{\text{магн}} = \mu_0 V_{\text{ч}} \chi_{\text{уд}} H \text{grad} H = \frac{\chi_{\text{уд}} V_{\text{ч}} B \text{grad} B}{\mu_0}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $V_{\text{ч}}$  – объем частицы,  $\text{м}^3$ ;  $\chi_{\text{уд}}$  – удельная магнитная восприимчивость никеля,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $H$  – напряженность намагничивающего поля, А/м;  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $\text{grad}H / \text{grad}B$  – градиент напряженности поля / индукции поля.

Для упрощения расчета составляющих сил используем градиент индукции магнитного поля (рис. 2).

Самый важный в данном случае участок графика – от 0 до 0,5 см, на котором падение значения индукции магнитного поля считаем приближенно линейной зависимостью. В общем же виде экспоненциальная зависимость, полученная с помощью метода наименьших квадратов, имеет вид

$$y = 0,066e^{-136x}. \quad (2)$$



**Рис. 2. Зависимость величины магнитной индукции от расстояния до сердечника электромагнита:**

1, 2 – аппроксимированные и экспериментальные данные соответственно

Общее определение градиента гласит, что он численно (по модулю) равен скорости роста величины в указанном направлении. На данном участке скорость изменения индукции магнитного поля можно найти, используя следующее соотношение:

$$v_{\text{изм. } B} = \frac{B_0 - B_l}{l}, \quad (3)$$

где  $B_0, B_l$  – значения магнитной индукции на поверхности торца и на расстоянии  $l$ , м, от торца сердечника электромагнита, Тл.

Так как зависимость на указанном выше участке считаем приближенно линейной, то, согласно формуле (3) и взяв две крайние точки данного участка, скорость изменения магнитной индукции составит

$$v_{\text{изм. } B} = \frac{0,075 - 0,035}{0,005} = 8 \text{ Тл/м.}$$

Прежде чем рассчитать магнитную силу захвата, необходимо найти значения некоторых базовых параметров частицы, а именно объем, массу и удельную магнитную восприимчивость. Для этого допускаем, что частица никеля имеет форму сферы.

Объем частицы [9 – 12] найдем по формуле:

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр частицы, м;

$$V_{\text{ч}} = \frac{3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-5})^3}{6} \approx 3,35 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3.$$

С учетом того, что в экспериментах использовался порошок никеля, плотность которого составляет  $8900 \text{ кг/м}^3$ , массу частицы  $m_{\text{ч}}$  найдем по формуле

$$m_{\text{ч}} = \rho_{\text{Ni}} V_{\text{ч}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{Ni}}$  – плотность никеля,  $\text{кг/м}^3$ .

Тогда искомое значение массы частицы составит

$$m_{\text{ч}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,9815 \cdot 10^{-10} \text{ кг.}$$

Удельная магнитная восприимчивость  $\chi_{\text{уд}}$  может быть рассчитана по формуле [9 – 12]

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{\chi}{\rho}, \quad (6)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества;  $\rho$  – плотность вещества,  $\text{кг/м}^3$ .

В свою очередь магнитная восприимчивость вещества  $\chi$  может быть рассчитана по формуле [1, 2]

$$\chi = \frac{J}{H}, \quad (7)$$

где  $J$  – намагниченность вещества, А/м.

Для расчета возьмем справочное значение намагниченности насыщения никеля  $J_s = 6,084 \cdot 10^{11} \text{ А/м}$ .

Намагниченность вещества  $J$  может быть рассчитана по формуле [1, 2]

$$J = \frac{M_{\text{ч}}}{V_{\text{ч}}}, \quad (8)$$

где  $M_{\text{ч}}$  – магнитный момент частицы никеля,  $\text{А} \cdot \text{м}^2$ .

Отсюда

$$M_{\text{ч}} = JV_{\text{ч}}. \quad (9)$$

Таким образом, магнитный момент  $M_{\text{ч}}$  с учетом допущений составит

$$M_{\text{ч}} = 6,084 \cdot 10^{11} \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,038 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

С учетом последовательного преобразования формул (7) – (9), имеем

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{M_{\text{ч}}}{V_{\text{ч}} H \rho_{\text{Ni}}}. \quad (10)$$

Во время экспериментов полученное значение напряженности магнитного поля составило  $4,2 \cdot 10^4$  А/м. Принимая во внимание данное значение, удельная магнитная восприимчивость частицы никеля составит

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{2,038 \cdot 10^{-2}}{3,35 \cdot 10^{-14} \cdot 4,2 \cdot 10^4 \cdot 8,9 \cdot 10^3} = 1,252 \cdot 10^3 = 1252.$$

Рассчитаем  $F_{\text{магн}}$  по формуле (1) [9 – 12]

$$F_{\text{магн}} = \frac{1,252 \cdot 10^3 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} \cdot 7,5 \cdot 10^{-2} \cdot 8}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ Н}.$$

Полученное значение магнитной силы подтверждает верность формулы расчета и коррелирует с ранее высказанным утверждением о преобладании магнитной силы над силой тяжести.

В непосредственной близости от электромагнита (расстояние не более 2 мм) магнитная сила, действующая на ферромагнитные частицы, не может быть меньше силы тяжести вне зависимости от направления действия сил. В противном случае удержание частиц на поверхности было бы затруднительным вследствие их смещения потоками воздуха с небольшими скоростями (в среднем 7,5 м/с), а само использование нагретого теплового потока было бы невозможным из-за полного сноса им внедряемых частиц с их необходимого месторасположения. Средняя скорость погружения феррочастицы в таком случае составила 20 мкм/мин, время погружения – от одной до полутора минут. Более длительный нагрев, согласно экспериментам, приводит к полной деструкции полимера по объему.

Для расчета не связанных с магнитным полем сил примем допущение, согласно которому поверхностный слой полимера будем считать покоящейся высоковязкой ньютоновской жидкостью. Также для расчета возьмем следующие значения некоторых необходимых величин:

- скорость движения частицы  $v_{\text{ч}} = 20$  мкм/мин или  $0,33 \cdot 10^{-6}$  м/с;
- динамическая вязкость расплавленного полипропилена  $\mu_{\text{р. пп}} = 2 \cdot 10^4$  Па·с;
- коэффициент сопротивления воздуха для шара  $c = 0,3$ ;
- плотность воздуха  $\rho_{\text{возд}} = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент поверхностного натяжения расплава полипропилена  $\sigma_{\text{р. пп}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м;

- глубина внедрения частицы  $l_{\text{вн}} = 30$  мкм или  $3 \cdot 10^{-5}$  м;
- плотность расплава полипропилена  $\rho_{\text{р. пп}} = 910$  кг/м<sup>3</sup>;
- скорость потока воздуха  $v_{\text{возд}} = 7,5$  м/с согласно экспериментальным данным;
- площадь поперечного сечения частицы  $S_{\text{п. с. ч}} = 12,56 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>.

Силу тяжести, действующую на ферромагнитную частицу, найдем по формуле [1, 2]:

$$F_{\text{тяж}} = m_{\text{ч}} g; \quad (11)$$

$$F_{\text{тяж}} = 2,9815 \cdot 10^{-10} \cdot 9,81 = 2,925 \cdot 10^{-9} \text{ Н.}$$

Сила Архимеда, действующая на ферромагнитную частицу, также рассчитывается по известной формуле [9 – 12]:

$$F_A = \rho_{\text{р. пп}} g V_{\text{ч}}; \quad (12)$$

$$F_A = 9,1 \cdot 10^2 \cdot 9,81 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,99 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

Сила давления потока воздуха на частицу вычисляется по формуле:

$$F_{\text{дав}} = c S_{\text{п. с. ч}} \rho_{\text{возд}} \frac{v_{\text{возд}}^2}{2}; \quad (13)$$

$$F_{\text{дав}} = 0,3 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} \cdot 1,225 \cdot \frac{(7,5)^3}{2} = 1,947 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Сила трения в покоящейся вязкой жидкости рассчитывается по закону Стокса [3 – 6]:

$$|F_{\text{в. тр}}| = | -6\pi r_{\text{ч}} \mu_{\text{р. пп}} v_{\text{ч}} |, \quad (14)$$

где  $r_{\text{ч}}$  – радиус частицы, м;

$$|F_{\text{в. тр}}| = | -6 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6} | = 2,487 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Силу поверхностного натяжения расплавленного полимера с учетом допущений рассчитаем по формуле [9 – 12]:

$$F_{\text{п. н.}} = \sigma_{\text{р. пп}} l_{\text{вн}}; \quad (15)$$

$$F_{\text{п. н.}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Сила сопротивления среды [9 – 12] зависит от плотности среды, площади поперечного сечения тела движущегося тела и квадрата его скорости

$$F_{\text{сопр}} = \rho_{\text{р. пп}} S_{\text{п. с. ч}} v_{\text{ч}}^2 = \beta v_{\text{ч}}^2, \quad (16)$$

где  $\beta = \rho S$  – коэффициент сопротивления среды.

Согласно формуле, эта сила в усредненном значении будет равна

$$F_{\text{сопр}} = 9,1 \cdot 10^2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} \cdot (0,33 \cdot 10^{-6})^2 = 12,45 \cdot 10^{-20} \text{ Н.}$$

Полученные расчеты показывают соотношение основных сил, действующих на внедряемую в поверхность термопласта ферромагнитную частицу, и подтверждают значительное преобладание внедряющих сил над противодействующими силами находящейся в состоянии расплава поверхности термопластичного полимера. Это гарантирует надежную фиксацию ультрадисперсного ферромагнетика в поверхностном слое термопласта и сообщает последнему поверхностной твердости и износостойкости, сопоставимой с данными параметрами у внедряемых частиц металла или металлического сплава, что обеспечит долговую и бесперебойную работу узлов машин и механизмов с деталями из термопластичных полимеров.

### Заключение

Показанные расчеты сил на примере внедряемых в поверхность полипропилена частиц никеля дают возможность определить параметры воздействия на частицы ферромагнетиков различного размера и магнитных свойств для их гарантированного внедрения в поверхностные слои термопластов с различными физико-механическими свойствами. Универсальность расчетов позволяет вывести аналитическое уравнение движения ферромагнитной частицы в расплавленном поверхностном слое термопластичного полимера с последующим созданием на его основе математической модели армирования поверхностного слоя изделий из термопластов. Данные расчеты позволяют создать универсальную установку для экспериментального и промышленного проведения поверхностного армирования полимерных изделий.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Разработка метода магнитно-термического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения», конкурс «Аспиранты», 2020 г. № договора 20-33-90298/20.*

### Список литературы

1. Rodionov, Yu. V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology / Yu. V. Rodionov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3Б. – С. 779 – 784.
2. Родионов, Ю. В. Исследование магнитотермического поверхностного армирования полимерных материалов / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, Н. В. Воронин, И. С. Филатов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 7-2021. – С. 37 – 39.
3. Теоретические исследования контактных и изгибных напряжений лопаток рабочего колеса и корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса из полимеров / Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, А. И. Скоморохова [и др.] // Наука в центральной России. – 2020. – № 3 (45). – С. 85 – 97. doi: 10.35887/2305-2538-2020-3-85-97
4. Ван Кревелен, Д. В. Свойства и химическое строение полимеров / Д. В. Ван Кревелен ; пер. с англ. Ф. Ф. Ходжеванова ; под ред. А. Я. Малкина. – М. : Химия, 1976. – 416 с.
5. Кикоин, А. К. Молекулярная физика : учеб. пособие / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин. – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 480 с.
6. Энциклопедия полимеров. Т. 3 Полиоксадиазолы – Я / Под ред. В. А. Кабанова. – М. : Сов. энциклопедия, 1977. – 1152 с.
7. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров : учеб. пособие / А. А. Тагер ; под ред. А. А. Аскадского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Научный мир, 2007. – 573 с.



8. Переработка полимеров и композитов в твердой фазе : учеб. пособие / Г. С. Баронин, А. М. Столин, М. Л. Кербер, В. М. Дмитриев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 140 с.

9. Евдокимов, А. А. Теоретическое обоснование критерия эффективности извлечения ферромагнитных частиц из потока жидкости в электромагнитном сепараторе УМС-4М / А. А. Евдокимов, В. И. Чарыков // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. – 2013. – № 9 (107). – С. 106 – 110.

10. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. Л. Детлаф, А. К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М. : ООО «Изд-во Оникс» ; ООО «Изд-во «Мир и Образование», 2006. – 1056 с.

11. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие. В 10 томах. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., стереотипное. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.

12. Орир, Дж. Физика. Полный курс: примеры, задачи, решения / Дж. Орир : пер. с англ. Ю. Г. Рудой, А. В. Берков. – М. : Книжный дом Университет, 2019. – 752 с.

---

### **Determining Impact Forces on a Ferromagnetic Particle in the Process of Magnetothermal Surface Reinforcement of Products from Thermoplastic Polymers**

**N. V. Voronin<sup>1</sup>, Yu. V. Rodionov<sup>1</sup>, D. V. Nikitin<sup>1</sup>, I. S. Filatov<sup>2</sup>**

*Department of Mechanics and Engineering Graphics (1),  
rodionow.u.w@rambler.ru; TSTU;  
“Instrument-Making College” (2), Tambov, Russia*

**Keywords:** magnetic field; surface reinforcement; calculation of forces; heat exchange; ferromagnetic particles.

**Abstract:** The author considers the forces acting on a ferromagnetic particle from the side of the magnetic and thermal fields, as well as the forces opposing its penetration from the side of the surface layer of the polymer. The calculation of the forces acting on a ferromagnetic particle in the process of its introduction into the surface layer of the polymer is carried out using the example of nickel and polypropylene. The balance of forces required for the introduction of a ferromagnetic particle into the molten surface of a thermoplastic polymer and stable fixation in it is calculated. The universality of the approach used is shown for calculating the parameters of surface modification of thermoplastic products with different properties by ferromagnetic particles of different dispersion and characteristics.

#### *References*

1. Rodionov Yu.V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 3Б, pp. 779-784. (In Eng., abstract in Russ.)

2. Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Voronin N.V., Filatov I.S. [Research of magnetothermal surface reinforcement of polymer materials], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2021, no. 7-2021, pp. 37-39. (In Russ.)

3. Voronin N.V., Rodionov Yu.V., Skomorokhova A.I., Nikitin D.V., Galkin P.A., Filatov I.S. [Theoretical studies of contact and bending stresses of the impeller blades and the casing of a liquid ring vacuum pump made of polymers], *Nauka v tseentral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2020, no. 3 (45), pp. 85-97, doi: 10.35887/2305-2538-2020-3-85-97 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Van Krevelen D.W. *Properties of Polymers Correlations with Chemical Structure*, London; New York, 1972.
5. Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekulyarnaya fizika: uchebnoye posobiye* [Molecular physics: a tutorial], St. Petersburg: Lan', 2008, 480 p. (In Russ.)
6. Kabanov V.A. [Ed.] *Entsiklopediya polimerov. T. 3 Polioxadiazoly – Ya* [Encyclopedia of Polymers. Vol. 3 Polyoxadiazoles - I], Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1977, 1152 p. (In Russ.)
7. Tager A.A., Askadsky A.A. [Ed.] *Fiziko-khimiya polimerov: uchebnoye posobiye* [Physical chemistry of polymers: a tutorial], Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 573 p. (In Russ.)
8. Baronin G.S., Stolin A.M., Kerber M.L., Dmitriyev V.M. *Pererabotka polimerov i kompozitov v tverdoy faze: uchebnoye posobiye* [Processing of polymers and composites in the solid phase: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, 140 p. (In Russ.)
9. Yevdokimov A.A., Charykov V.I. [Theoretical substantiation of the criterion for the efficiency of extracting ferromagnetic particles from a liquid flow in an electromagnetic separator UMS-4M], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2013, no. 9 (107), pp. 106-110. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Yavorskiy B.M., Detlaf A.L., Lebedev A.K. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [Handbook of physics for engineers and university students], Moscow: OOO "Izdatel'stvo Oniks"; OOO "Izdatel'stvo "Mir i Obrazovaniye", 2006, 1056 p. (In Russ.)
11. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika: uchebnoye posobiye. V 10 tomakh. T. VIII. Elektrodinamika sploshnykh sred* [Theoretical physics: a tutorial. In 10 volumes. Vol. VIII. Electrodynamics of continuous media], Moscow: FIZMATLIT, 2005, 656 p. (In Russ.)
12. Orir Dzh. *Fizika. Polnyy kurs: primery, zadachi, resheniya* [Physics. Complete course: examples, tasks, solutions], Moscow: Knizhnyy dom Universitet, 2019, 752 p. (In Russ.)

---

### **Bestimmung der Einwirkungskräfte auf das ferromagnetische Teilchen im Prozess der magnetisch-thermischen Oberflächenverstärkung der Produkte aus thermoplastischen Polymeren**

**Zusammenfassung:** Es sind die Kräfte betrachtet, die von der Seite der magnetischen und thermischen Felder auf ein ferromagnetisches Teilchen wirken, sowie die Kräfte, die seinem Eindringen von der Oberflächenschicht des Polymers entgegenwirken. Die Berechnung der Kräfte, die auf ein ferromagnetisches Teilchen beim Einbringen in die Oberflächenschicht des Polymers einwirken, erfolgt am Beispiel von Nickel und Polypropylen. Es ist das Kräftegleichgewicht berechnet, das zum Einbringen eines ferromagnetischen Partikels in die geschmolzene Oberfläche des thermoplastischen Polymers und zur stabilen Fixierung darin erforderlich ist. Die Universalität des verwendeten Ansatzes ist bei der Berechnung der Parameter der Oberflächenmodifizierung von thermoplastischen Produkten mit unterschiedlichen Eigenschaften durch ferromagnetische Teilchen unterschiedlicher Dispersion und Charakteristik gezeigt.

## **Détermination des forces d'impact sur la particule ferromagnétique dans le processus du renforcement de surface magnétothermique de produits en polymères thermo-plastiques**

**Résumé:** Sont examinées les forces agissant sur la particule ferromagnétique du côté des champs magnétiques et thermiques, ainsi que les forces opposées à son introduction du côté de la couche superficielle du polymère. Est réalisée une analyse des forces agissant sur la particule ferromagnétique lors de son introduction dans la couche superficielle du polymère à l'exemple du nickel et du polypropylène. Est calculé l'équilibre des forces nécessaire pour introduire la particule de ferromagnétique dans la surface fondue du polymère thermoplastique et y maintenir une fixation stable. Est montrée la polyvalence de l'approche utilisée pour calculer les paramètres de modification de la surface des produits en thermoplastiques avec différentes propriétés de particules ferromagnétiques de dispersion et de caractéristiques différentes.

---

**Авторы:** *Воронин Николай Владимирович* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Никитин Дмитрий Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Филатов Иван Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, преподаватель специальных дисциплин, ТОГБПОУ «Приборостроительный колледж», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Грибков Алексей Николаевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.