

УДК 532.516; 532.5:532.135;621.396.6.002.72

**Анатолий Павлович ДОСТАНКО,**  
*академик Национальной академии наук Беларуси,  
доктор технических наук, профессор Белорусского государственного  
университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск*

**Евгения Викторовна КОРОБКО,**  
*доктор технических наук, профессор,  
Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова  
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*

**Владимир Алексеевич КУЗЬМИН,**  
*кандидат технических наук доктор технических наук, профессор,  
Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова  
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*

**Зоя Анатольевна НОВИКОВА**  
*научный сотрудник  
Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова  
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА КРЕПЛЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА МАГНИТНОМ СТОЛЕ**

*Приведены экспериментальные результаты разработки технологии крепления образцов деталей из немагнитных материалов (алюминий, стекло, эбонит, текстолит) на стандартном плоском магнитном столе, которая основана на создании и применении маг-*

© Достанко А. П., Коробко Е. В., Кузьмин В. А., Новикова З. А.

*ниточувствительного клеевого слоя между деталью и подложкой, изменяющего свое состояние от квазитвердого до текучего. Показано, что под воздействием магнитного поля удельные сдвиговые усилия сцепления детали с клеем возрастают на три порядка и наблюдается увеличение адгезионных сил сцепления слоя с подложкой в 4-6 раз.*

**Ключевые слова:** магниточувствительная клеевая композиция, фиксация, немагнитные образцы.

**Постановка проблемы в общем виде.** В связи с повышением требований к точности обработки и ростом числа деталей из немагнитных материалов и сплавов различной формы и толщины особенно актуальны разработки высокопроизводительных зажимных приспособлений – базонесущих элементов оснастки, контактирующих с поверхностью детали [1]. Их конструкции и эксплуатационные свойства определяются схемами базирования и обработки, заданной точностью, геометрической формой, жесткостью и размерами деталей. В практике используются различные зажимные устройства и приспособления: гидравлические, вакуумные, магнитные, механические (болты, скобы, специальные захваты), электрические, а также клеи, термокомпаунды. По типу контакта они делятся на точечные, линейные, плоскостные, объемные. Плоскостные создают более благоприятные условия обработки, а также обеспечивают доступность поверхности и поэтому предпочтительнее при использовании в электромагнитных, магнитных, вакуумных и электростатических устройствах. Основные достоинства этих устройств: равномерность прижима детали к подложке, относительная стабильность и значительная величина силы притяжения. Известно, что электромагнитные зажимные приспособления являются самыми эффективными. Они способны создавать удельную силу притяжения  $2-70 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, электростатические и вакуумные – на порядок ниже. Как показала практика, все известные типы приспособлений имеют свои недостатки. Так, применение магнитных приспособлений ограничивается спектром только магнитных деталей, зависимостью силы притяжения от их толщины. При толщине деталей менее 1,5–2 мм она оказывается столь малой, что отпадает сам вариант ис-

пользования данного вида крепления. Вакуумные зажимные устройства непригодны для деталей с перфорированной поверхностью. Кроме того, обязательным является требование, по которому сила сжатия упругой прокладки должна быть меньше прижимного усилия деталей, чтобы не произошла разгерметизация устройства. Электростатические крепежные устройства (ЭКУ) лишены этих недостатков. Применение в них управляемых электрореологических клеев, меняющих свое состояние от текучего до квазитвердого и улучшающих адгезию к объекту на время действия электрического поля, позволило расширить функциональные возможности последних и улучшить их основные показатели [2]. Однако промышленное применение ЭКУ сдерживается из-за недостаточной стабильности силы притяжения и технологических ограничений – необходимости подключения одного из электрических контактов непосредственно к детали и применения для надежной фиксации объекта механообработки высоковольтного напряжения (кВ). Современные разработки показали, что, несмотря на свою универсальность, проблема широкого практического использования электростатических крепежных устройств сводится к получению больших сил притяжения детали к подложке за счет характеристик прослойки – электроуправляемого клея. Кроме того, оно зависит как от состояния поверхности пары деталь-подложка, характеристик диэлектрического покрытия базового основания, так и требует особых условий использования, связанных с минимизацией влажности окружающей среды и использованием специальных рецептур СОЖ на основе диэлектрических жидкостей.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор.** Создание высокоэффективного клеевого материала, способного менять свое состояние от жидкого до квазитвердого, является сложной задачей. Основные проблемы связаны с применением больших концентраций наполнителя в клеевой композиции для получения высокого структурного отклика на воздействие магнитного поля и необходимостью сохранения ее текучести. Для получения достаточно прочного сцепления детали с подложкой важны структурные особенности

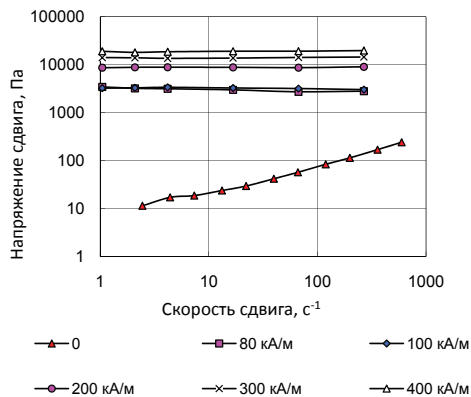
контактного взаимодействия частиц наполнителя друг с другом и с поверхностями подложки и детали. Кроме того, слои должны быть максимально тонкими, поскольку прочность крепления деталей к подложке резко уменьшается с увеличением толщины слоя материала между ними, так как зависит от высоты образующихся структурных мостиков. Известно очень мало исследовательских работ, посвященных проблеме разработки метода крепления немагнитных материалов на магнитном столе [3–5], в которых использовалась реологическая жидкость, слабо изменяющая свои прочностные свойства для крепления ферромагнитных материалов, или осуществлялось крепление немагнитных материалов в поле с нестабилизированными параметрами, что требовало применения дополнительных манипуляций по настройке положения детали и подбора напряженности внешнего поля.

**Цель статьи.** С учетом наивысших показателей электромагнитных крепежных приспособлений по достижимой величине усилий фиксации, а также возможности их применения в различных влажностных условиях окружающей среды перед исследователями была поставлена задача создания универсального магнитного приспособления, применимого и для деталей как из магнитных, так и из немагнитных материалов и позволяющего при включении – отключении магнитного поля без потерь и повреждения поверхности детали освободить ее из крепежного приспособления. Решение этой задачи возможно, как и в случае с электростатическими крепежными устройствами, при создании и использовании магниточувствительных клеевых композиций.

**Изложение основного материала исследования.** С учетом приведенных выше требований к реологическим материалам, изменяющим свои характеристики под действием внешнего магнитного поля, авторами был разработан состав и приготовлен образец магниточувствительной клеевой композиции, содержащей 87 % мелкодисперсного ферромагнитного материала, – использовался порошок карбонильного железа (размер частиц порядка нескольких микронов). В качестве дисперсионной среды применялись гидрофильные или олеофильные жидкости. Смешение компонентов сопровождается введением твер-

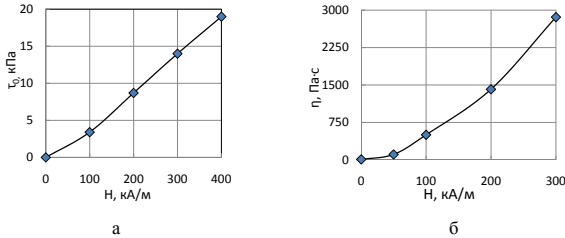
дых частиц в жидкость. При этом система проходит несколько стадий: а) смачивание (поверхность раздела фаз твердое тело – газ заменяется поверхностью раздела твердое тело – жидкость); б) механическое диспергирование (разъединение частиц в жидкой среде); в) стабилизация дисперсной системы. Все перечисленные стадии связаны с адсорбцией на поверхности частиц молекул несущей среды или специально подобранных ПАВ. Последние улучшают смачивание поверхности твердых частиц жидкостью, оказывают расклинивающее действие, облегчая диспергирование, способствуют равномерному распределению частиц в объеме и стабилизируют поверхность раздела твердое тело – жидкость.

Прежде всего были исследованы механические характеристики полученной композиции в условиях постоянной сдвиговой нагрузки различной величины. На ротационном вискозиметре марки НААКЕ RV-12, снабженном индуктором магнитного поля, определены зависимости сдвигового напряжения от скорости сдвига материала клеевой композиции в соосно-цилиндрической экспериментальной ячейке (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для магниточувствительной клеевой композиции при различной напряженности магнитного поля

Из приведенных рисунков видно, что магнитореологическая суспензия относится к неньютоновским вязкопластичным жидкостям. Для таких материалов характерно наличие предела текучести, обусловленное достаточной прочностью, возникающей в поле пространственной структурной решетки, которая в нашем случае упрочняется при увеличении напряженности магнитного поля (рис. 2, а). Значение предела текучести под воздействием магнитного поля увеличивается на три порядка. Превышение удельными сдвиговыми нагрузками этих значений приводит к развитию течения клеевой композиции, и ее состояние меняется от квазитвердого до жидкого, характерного для высоковязких сред (рисунок 2, б).



**Рис. 2.** Зависимость предела текучести (а) и эффективной вязкости при скорости сдвига  $10 \text{ c}^{-1}$  (б) магниточувствительной клеевой композиции от напряженности магнитного поля

Зависимость силы сопротивления сдвиговому воздействию в слое магниточувствительной клеевой композиции записывается следующим образом:

$$F = \tau_0 (H)S + \eta(H)S u/d. \tag{1}$$

где  $\tau_0$  – предел текучести,  $\eta$  – динамическая вязкость,  $S$  – площадь поверхности,  $d$  – толщина слоя,  $u$  – скорость движения.

Сдвиг (течение жидкости) происходит при

$$F > \tau_0 (H)S + \eta(H)S u/d. \tag{2}$$

Жесткая фиксация, то есть скорость движения, достигается при

$$F \leq \tau_0 S \tag{3}$$

Таким образом, согласно условию (3) крепление детали на магнитном столе с помощью магнитного поля подразумевает жесткую фиксацию под воздействием сил, величина которых позволяет проводить механообработку.

Суспензия должна обладать адгезией к поверхностям, для исключения проскальзывания [6]. С целью оценок адгезионного взаимодействия магниточувствительной клеевой композиции с деталями из различных немагнитных материалов в магнитных полях различной напряженности определялись предельные усилия вертикального отрыва их от слоя, удерживаемого плоским магнитным полем (рис. 3).

Адгезионные свойства клеевой композиции с магниточувствительным наполнителем в контакте с подложкой были оценены по характеристикам растекания ее конечного объема (капля) по поверхности магнитного стола. С этой целью сконструирована и изготовлена установка, которая позволяет фиксировать изменение краевого угла смачивания, радиуса и высоты капли, помещенной на подложку, являющуюся индуктором магнитного поля.

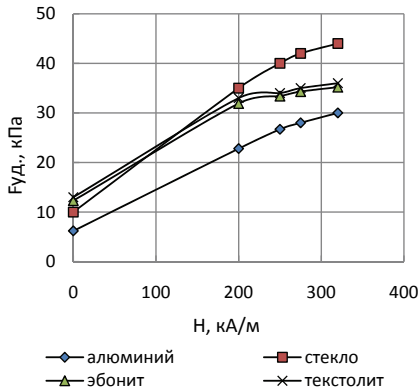


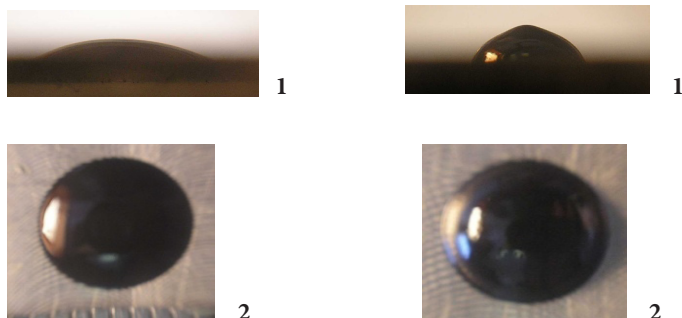
Рис. 3. Зависимости удельных фиксирующих усилий от напряженности магнитного поля при отрыве деталей из различных немагнитных материалов от поверхности магнитного стола с использованием магниточувствительной клеевой композиции

Определение этих параметров капли в процессе растекания производится фотографическим методом. В экспериментах варьировался состав композиции (количество наполнителя), размер и масса капли, индукция внешнего магнитного поля. Исследование влияния магнитного поля на растекание и смачивание выполнялось для двух случаев. В первом случае капля падала на поверхность подложки в отсутствие поля. Во втором случае капля на поверхность подложки наносилась при максимальном значении индукции 160 мТл, затем индукция уменьшалась до нуля. В обоих случаях форма капли регистрировалась в двух проекциях (боковой и фронтальной) при помощи цифрового фотоаппарата. Фотографии капель, нанесенных на подложку, представлены на рис. 4. По фотографиям определялись диаметр и высота капли, а также краевой угол смачивания.

Как видно из рис. 4 при аппликации капли на подложку в отсутствие поля, она имеет “классическую”, изменяющуюся до полного растекания, соответствующего стационарному состоянию, форму, аналогичную материалам на лиофильной поверхности. При последующем воздействии магнитного поля до 60 мТл форма капли существенно не изменяется, может лишь наблюдаться слабое растекание, приводящее к увеличению диаметра на 2–3 % и уменьшению ее высоты до 25 %. Если капля на поверхность подложки наносилась в магнитном поле индукцией 160 мТл, то она имела гораздо меньший диаметр, чем в первом случае (в 1,5 раза), и почти в два раза большую высоту. Интересной особенностью является наличие своеобразных изломов на поверхности капли, которые могут свидетельствовать о влиянии магнитного поля на процесс растекания капли, проявляющегося в препятствии этому растеканию.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при растекании капли магниточувствительного клея по твердой поверхности в магнитном поле, кроме обычно рассматриваемых, действуют еще сила Лоренца, приводящая к кажущемуся увеличению вязкости, и сила, возникающая за счет градиента магнитного поля.

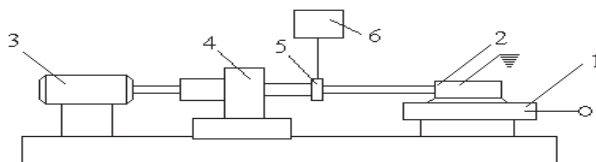




**Рис. 4.** Капля клея на подложке:

*а* – в отсутствие поля: 1 – вид сбоку, 2 – вид сверху; *б* – Капля клея на подложке при воздействии магнитного поля  $B = 160$  мТл: 1 – вид сбоку, 2 – вид сверху

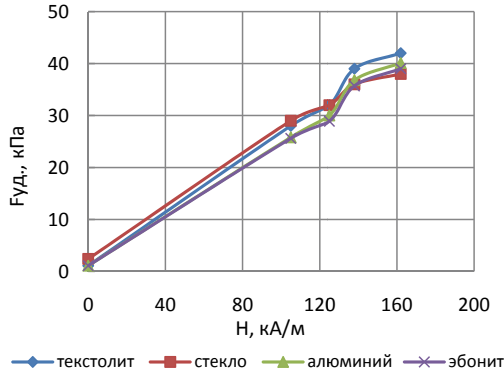
Для оценки влияния магниточувствительной клеевой композиции на предельные сдвиговые показатели в магнитном поле использовано устройство, схема которого приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Схема установки для определения сдвигового фиксирующего усилия: 1 – магнитный стол, 2 – деталь, 3 – привод, 4 – каретка, 5 – датчик, 6 – самописец

Эксперименты проводились следующим образом. На поверхность магнитного стола 1 с предварительно нанесенной клеевой композицией устанавливали деталь 2 и прижимали ее до достижения слоя толщиной 0,2–0,3 мм. Привод 3 приводил в поступательное движение (скорость 0,04 мм/с) каретку 4. Величина фиксирующего усилия, соответствующая минимальному усилию, при котором происходит смещение детали, измерялась тензодатчиком 5 и фиксирова-

лась самописцем 6. Определялось фиксирующее усилие, при превышении которого деталь сдвигается с магнитного стола, и находились его удельные значения (в кПа) соответственно площади контакта детали с поверхностью крепежного устройства.



**Рис. 6.** Зависимость удельных фиксирующих усилий сдвига при креплении деталей из различных материалов с использованием магниточувствительной клеевой композиции от напряженности магнитного поля на магнитном столе

Из приведенных на рис. 6 результатов видно, что изменение предельных значений удельных фиксирующих усилий сдвига от напряженности магнитного поля для всех деталей из различных материалов увеличивается на порядок и более.

**Выводы.** Все представленные в работе экспериментальные результаты свидетельствуют об эффективности разработанного состава магниточувствительного клея применительно к немагнитным материалам, что обеспечило возможность создания универсального и надежного метода фиксации широкого спектра деталей на магнитных столах с целью механообработки их поверхности.

Перспективой дальнейших исследований в данном направлении является создание технологии крепления немагнитных деталей на магнитном столе.

## Список использованной литературы

1. Антонюк В. Е. Техническая оснастка : учеб. пособие / В. Е. Антонюк. – Минск : изд. Гревцова, 2011. – 376 с.
2. Коробко Е. В. Электроструктурированные (электрореологические) жидкости: особенности гидромеханики и возможности использования / Е. В. Коробко. – Минск : АНК ИТМО АНБ, 1996. – 190 с.
3. Патент России № 2229966 В23Н 9/06, опубл. 10.06.2004. Бюл. № 16.
4. А. с. СССР 1247229 В23О 3/15, опубл. 30.07.1986. Бюл. № 28.
5. Патент России № 2312000 В23Q3/15, опубл. 10.12.2007. Бюл. № 12.
6. Kuzmin V. A. Adhesion Peculiarities at the Contact of MRF with Solid State in Gradient Magnetic Field / V. A. Kuzmin, E. V. Korobko, V. P. Roizman, Z. A. Novikova, A. P. Dostanko, A. O. Karabko // Journal of Physics : Conference Series. – 2013. – Vol. 412. – P. 012021.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.2015.*

**Достанко А. П., Коробко Є. В., Кузьмін В. О., Новикова З. А. Розробка методу кріплення немагнітних деталей на магнітному столі**

Наведено експериментальні результати розробки технології кріплення зразків деталей з немагнітних матеріалів (алюміній, скло, ебоніт, текстоліт) на стандартному плоскому магнітному столі, яка заснована на створенні та застосуванні магніточутливого клейового шару між деталлю і підкладкою, що змінює свій стан від квазітвердого до текучого. Показано, що під впливом магнітного поля питомі зсувні зусилля зчеплення деталі з клеєм зростають на три порядки і спостерігається збільшення адгезійних сил зчеплення шару з підкладкою в 4–6 разів.

**Ключові слова:** *магніточутлива клейова композиція, фіксація, немагнітні зразки.*

**Dostanko A. P., Korobko E. V., Kuzmin V. O., Zoya N. A. Development of fixing method of non-magnetic details on the magnetic table**

This article presents the experimental results on the development of technology fixing of samples of details from non-magnetic materials (aluminum, glass, ebony, PCB) on a standard planar magnetic table, which

is based on the creation and use of magnetosensitive adhesive layer between the component and the substrate, changed its state from the quasi-solid to fluid. It is shown that unit shear forces of detail adhesion with glue increase on three orders under the influence of the magnetic field.

**Keywords:** *magnetosensitive adhesive composition, fixation, non-magnetic samples.*