



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 669.018.95

В.И. ЖОРНИК, д-р техн. наук, проф.

начальник отделения технологий машиностроения и металлургии – заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: zhornikv@gmail.com

А.В. ИВАХНИК, канд. техн. наук, доц.

ведущий научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: itmol@mail.ru

А.М. ПАРНИЦКИЙ, канд. техн. наук, доц.

старший научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: eugoracorp@tut.by

А.С. АДАМЕЙКО

магистрант лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: Adameyko001@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 29.09.2025.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И РЕЖИМОВ СИНТЕЗА ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГРАФЕНОПОДОБНЫЙ УГЛЕРОД

Рассмотрен механизм формирования пластичной смазки с гибридной дисперсной фазой, включающей, мыльный компонент в виде солей высших карбоновых кислот (в частности, литиевой соли 12-гидрооксистеариновой кислоты — 12-LioSt) и немыйльный компонент в виде высокодисперсных частиц органического или неорганического происхождения (в частности, частиц графеноподобного углерода (ГПУ) — терморасширенного графита). Разработана математическая регрессионная модель пластичной литиевой смазки с гибридной дисперсной фазой состава 12-LioSt–ГПУ, позволяющая определять компонентный состав (концентрацию 12-оксистеарата лития и ГПУ) и режим синтеза (температуру термообработки реакционной массы) в зависимости от требуемого уровня реологических (пенетрации) и трибологических (нагрузки сваривания) свойств пластичного смазочного материала.

Ключевые слова: пластичная смазка, гибридная дисперсная фаза, мыльный загуститель, графеноподобный углерод, реологические и трибологические свойства, регрессионная модель, компонентный состав, режим термообработки

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-86-97>

Введение. Пластичные смазочные материалы (ПСМ) представляют собой композиционный мажеобразный материал, включающий несколько составляющих, основными из которых являются

дисперсионная среда (масляная основа, занимающая 75–95 об.%) и дисперсная фаза (структурный каркас из волокон или совокупности дисперсных частиц различной природы, занимающих

5–25 об.%) (рисунок 1). Наряду с этими основными компонентами в состав пластичной смазки могут входить специальные функциональные добавки в виде маслорастворимых (присадок) и нерастворимых в масле (наполнителей) веществ. При этом тиксотропность (сочетание свойств твердого и жидкого тел) пластичной смазки обуславливает наличие в ней структурного каркаса (дисперсной фазы), который, с одной стороны, за счет сил адсорбции удерживает в своих ячейках масляную основу и обеспечивает смазке свойства твердого тела, имеющего определенную механическую прочность, а с другой стороны, при приложении нагрузки, превышающей предел прочности при сдвиге (как правило, 5–200 Па), структурный каркас деформируется и пластичная смазка начинает течь по закономерностям, характерным для неньютоновских жидкостей [1–4]. Следует также отметить, что подавляющее большинство ПСМ теряют свойства твердого тела не только под воздействием критических нагрузок, но и при повышении температуры и достижении ею такого значения, при котором сопротивление смазки критической нагрузке, т. е. ее предел прочности, становится равным нулю. Для отдельного класса электро- и магнитно-реологических смазок потеря свойств твердого тела происходит в результате воздействия магнитных полей [5].

Реологические свойства смазок связаны с особенностями структуры их дисперсной фазы и определяются, с одной стороны, дисперсностью, анизотричностью волокон, образующих структурный каркас, а с другой — величиной энергии взаимодействия между структурными элементами каркаса и взаимодействием дисперсной фазы с дисперсионной средой (маслом).

Загустители пластичных смазок по их природе делят на две группы: неорганические (например, высокодисперсный силикагель, бентониты, вспученный графит, комплексы металлов (литий, кальций) в виде мыл, неорганические пигменты) и ор-

ганические, в том числе мыльные (соли высших жирных кислот), углеводородные (сажа, твердые предельные углеводороды — парафин, церезин), полимерные (фторопласты, полимеры целлюлозы), пигментные (органические красители) [1, 3].

Смазки на одном типе загустителя, т. е. имеющие одинарную дисперсную фазу (ОДФ), относятся к группе простых смазок (литиевая, кальциевая, полимочевинная, бентонитовая). Более высокий уровень реологических и трибологических свойств удастся получить при использовании комбинированных дисперсных фаз. Это может быть комплексный загуститель (комплексная соль одного аниона высокомолекулярной органической и низкомолекулярной неорганической кислот, например 12-гидрооксистеарат лития + борат (или терефталат) лития). Загуститель может иметь также гетерогенное строение (гетерогенная дисперсная фаза (ГДФ)), представляющее собой либо сочетание различных солей (например, натриевой и кальциевой) одной и той же карбоновой кислоты, либо комбинацию загустителей различного типа (например, мыло и высокодисперсные неорганические или органические частицы (литиевая соль 12-гидрооксистеариновой кислоты + наночастицы углерода)) [6, 7]. В качестве мыльных загустителей чаще всего используют литиевые, кальциевые, натриевые мыла; в последние годы получили распространение также смешанные (натриево-кальциевые, кальциево-литиевые) мыла.

Для улучшения функциональных свойств смазочных материалов (антиокислительных, антифрикционных, противоизносных, противозадирных, низкотемпературных) в их состав вводятся различного рода добавки в виде присадок и наполнителей. При этом наполнители представляют собой высокодисперсные (микро- и наноразмерные) частицы различной природы (углеродные материалы, сульфиды металлов, полимеры, мягкие металлы, оксиды). Введение в состав пластичных смазочных материалов различных наполнителей является одним из наиболее приоритетных путей их направленного улучшения. Целевой спектр применения наполнителей очень широк. В частности, известно значительное количество как широко распространенных, так и узкоспециализированных наполнителей. Однако наиболее используемыми наполнителями в ПСМ остаются такие материалы со слоистой структурой, как дисульфид молибдена (MoS_2) и графит (рисунок 2), а также различные комбинации с их участием. Основной технический результат введения наполнителей в виде MoS_2 и графита — увеличение ресурса работы смазки и обеспечение работы узлов трения при высоких нагрузках за счет улучшения противоизносных и противозадирных свойств. При высоких показателях технических характеристик к числу негативных факторов применения MoS_2 следует отнести его высокую стои-

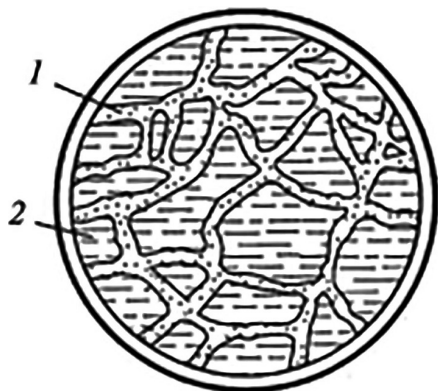


Рисунок 1 — Схематическое изображение структуры пластичной смазки: 1 — каркас, образованный дисперсной фазой; 2 — смазочное масло (дисперсионная среда)
Figure 1 — Schematic representation of the grease structure: 1 — frame formed by a dispersed phase; 2 — lubricating oil (dispersion medium)

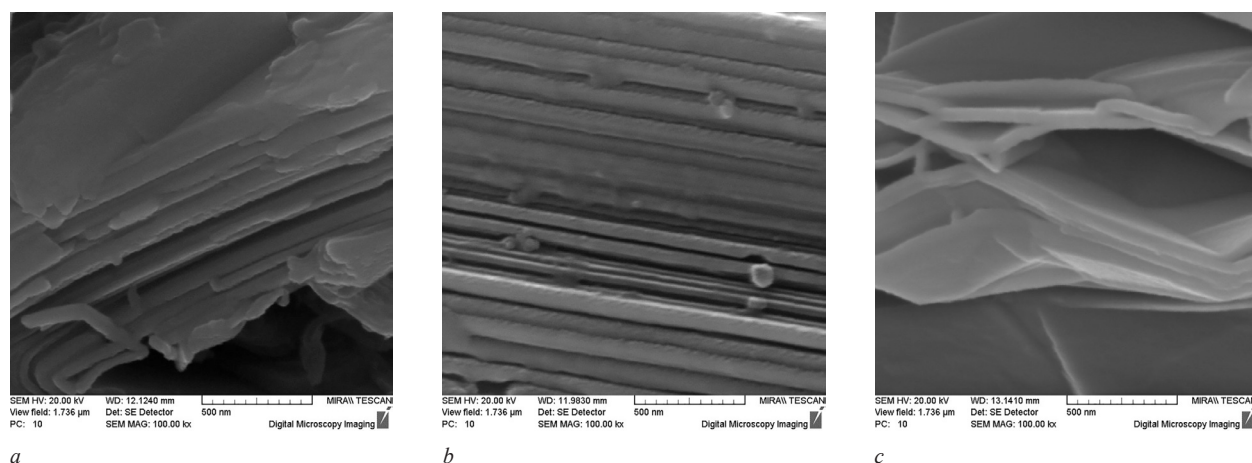


Рисунок 2 — Микроструктура слоистых наполнителей: *a* — дисульфид молибдена; *b* — природный графит; *c* — графеноподобный углерод
 Figure 2 — Microstructure of layered fillers: *a* — molybdenum disulfide; *b* — natural graphite; *c* — graphene-like carbon

мость и повышенное коррозионное и абразивное воздействие на элементы узлов трения в условиях повышенной влажности. Дисульфид молибдена при контакте с влагой и кислородом разрушается с образованием агрессивной серной кислоты и абразивных частиц окиси молибдена, способных разрушать компоненты узлов трения, что ограничивает спектр его применения в смазках [8, 9].

Уменьшение объемов применения дорогого и дефицитного MoS_2 путем замены его на более доступные материалы, в основном различные полимеры, бентониты, гексагональный нитрид бора, слюду, другие слоистые материалы, является одним из эффективных направлений создания современных смазочных материалов для тяжело нагруженных узлов трения. В данном случае ГПУ (терморасширенный графит) благодаря своей чрезвычайно высокой удельной поверхности (до $100 \text{ м}^2/\text{г}$) может выступать в смазке не только как функциональный наполнитель (противозадирный, антифрикционный, противоизносный), но и в качестве компонента дисперсной фазы (загустителя), уменьшая (полностью прекращая) использование органических загустителей и тем самым повышая термическую стойкость пластичной смазки. При этом стоимость пластичных смазок, модифицированных ГПУ, может быть снижена до полутора раз по сравнению со смазками, содержащими дисульфид молибдена [10–13].

Целью данной работы является оптимизация компонентного состава и режимов синтеза композиционной пластичной смазки с гибридной дисперсной фазой, включающей литиевую соль 12-гидрооксистеариновой кислоты и высокодисперсные частицы ГПУ.

Механизм формирования дисперсной фазы на мыльной основе. В простейшем случае ПСМ рассматриваются как двухкомпонентные коллоидные системы: дисперсионная среда и дисперсная фаза [14]. В реальных условиях к таким двухкомпонентным системам можно отнести только

смазки на полисилоксанах, загущенных сажей, пигментами и полимерами. Во всех остальных случаях в коллоидной системе ПСМ кроме дисперсионной среды и дисперсной фазы всегда присутствуют дополнительные компоненты, что бывает обусловлено как технологическими факторами, так и требованиями к уровню функциональных свойств продукта.

Таким образом, ПСМ выступают как весьма сложные поликомпонентные системы, основные свойства которых определяются их составом. Тем не менее, с позиций коллоидной химии при работе с ПСМ для изучения процессов структурообразования, разработки технологических режимов и прогнозирования свойств их прежде всего рассматривают как двухкомпонентные системы. ПСМ можно рассматривать как высокоструктурированные тиксотропные дисперсии, образованные трехмерным структурным каркасом дисперсной фазы. В ячейках структурного каркаса капиллярными, адсорбционными и другими физическими связями удерживается дисперсионная среда — смазочное масло, а частицы (элементы) дисперсной фазы в одном или двух измерениях имеют коллоидные и в третьем — макроскопические размеры.

Самой распространенной группой дисперсных фаз (загустителей) являются мыла, представляющие собой соли высших карбоновых (жирных) кислот. При обычных температурах они практически не взаимодействуют с нефтяными маслами и другими смазочными жидкостями. В этих условиях мыла не растворяются и практически не набухают в маслах, а при повышении температуры они способны коллоидно диспергироваться в маслах. Диспергирование мыл дополнительно облегчается и ускоряется интенсивным механическим перемешиванием.

Мыльные ПСМ разделяют на четыре основные группы:

- смазки на мылах щелочных металлов (натриевые, калиевые и литиевые);

- мылах щелочноземельных металлов (кальциевые и бариевые);
- алюминиевых мылах;
- мылах тяжелых металлов (свинцовые, цинковые).

В каждой основной группе следует выделять подгруппу обычных и так называемых комплексных смазок. В мировой промышленной практике наибольшее распространение получили мыльные ПСМ, относящиеся к первым двум группам, на их долю приходится около 90 % от всех видов ПСМ.

Процесс структурообразования олеогелей при синтезе ПСМ многоступенчат и зависит от множества условий образования зародышей кристаллов (ассоциатов и мицелл), их роста (агрегации мицелл и образования надмицеллярных структур — волокон) и, наконец, от условий формирования трехмерного структурного каркаса, придающего смазке пластичность и другие характерные для нее свойства. Многие из этих стадий протекают параллельно, что не позволяет изучать какую-либо из них в чистом виде.

На формировании дисперсных частиц загустителя и образовании пространственной структуры значительно сказываются тип и концентрация мыла, природа дисперсионной среды, наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ), их концентрация и природа, температура кристаллизации мыла и скорость охлаждения расплава, интенсивность перемешивания, гомогенизация и другие условия процесса. Рост кристаллов, их агрегация, сцепление и образование волокон происходят через ультратонкие сольватные слои ПАВ при их наличии или прослойки дисперсионной среды, прочно связанные с поверхностью дисперсных частиц и являющиеся элементом дисперсной фазы — структурного каркаса. В зависимости от множества вышеперечисленных факторов мыльный загуститель в смазках может существовать в различных внешних модификациях, разной степени дисперсности и анизотричности. Электронно-микроскопическими, рентгеноструктурными и другими методами исследований установлено, что элементы структурного каркаса ПСМ представляют собой кристаллические частицы лепестковой, игольчатой, пластинчатой, обычной ните-

видной, скрученной нитевидной, жгутообразной формы (рисунок 3 *a, c*). Эти частицы имеют длину микроскопических, а толщину или диаметр коллоидных размеров [3, 15].

К комплексным ПСМ относятся смазки, загустителем которых является соль высокомолекулярных жирных или гидрооксикарбоновых кислот, а стабилизатором (комплексобразователем) — соль того же катиона низкомолекулярной органической (или неорганической) кислоты. Таким образом, комплексные ПСМ отличаются более сложным химическим строением, требуют более совершенной технологии их синтеза по сравнению с простыми ПСМ, но при этом характеризуются улучшенными показателями практически по всем видам параметров, в частности, более высокой температурой каплепадения, повышенными противоизносными, противозадирными и вязко-температурными характеристиками, что обусловлено более развитой и более прочной структурой их дисперсной фазы (см. рисунок 3 *b, d*). Например, температура каплепадения простых кальциевых ПСМ составляет 80–100 °С, а комплексных кальциевых ПСМ — 230–250 °С; простых литиевых ПСМ — 180–190 °С, комплексных литиевых ПСМ — 230–250 °С. Предельная нагрузка сваривания простых кальциевых ПСМ составляет 2100–2300 Н, а комплексных кальциевых ПСМ — 3600–4000 Н; простых литиевых ПСМ — 1200–1600 Н, комплексных литиевых ПСМ — 2200–2600 Н [13].

Введение любых наполнителей, в том числе слоистых, в пластичную смазку со сформированной дисперсной фазой представляет значительные технологические сложности из-за высокой вероятности разрушения элементов дисперсной фазы при перемешивании смазочной композиции. Особые затруднения возникают в случае необходимости ввода в ПСМ такого материала, как ГПУ, имеющего чрезвычайно низкую плотность (в частности, плотность ТРГ-пуха — $3,1 \pm 0,2$ кг/м³ [16]).

Предложенный в работах [13, 15, 17] подход к формированию ГДФ, предусматривающий имплантацию частиц наполнителя в волокнистую структуру мыльного компонента на стадии его

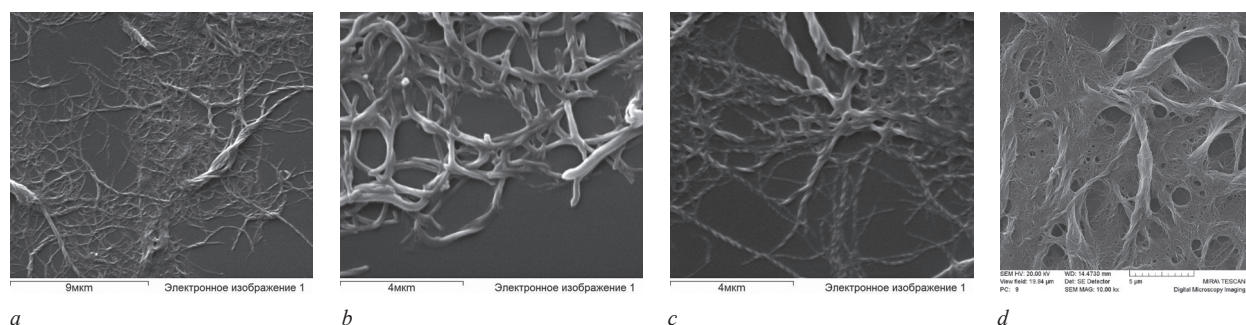


Рисунок 3 — Микроструктура одинарной дисперсной фазы / ПСМ с различными видами мыльного загустителя:

a — кальциевый; *b* — комплексный кальциевый; *c* — литиевый; *d* — комплексный литиевый

Figure 3 — Microstructure of the single dispersed phase / grease with various types of soap thickener:

a — calcium; *b* — complex calcium; *c* — lithium; *d* — complex lithium

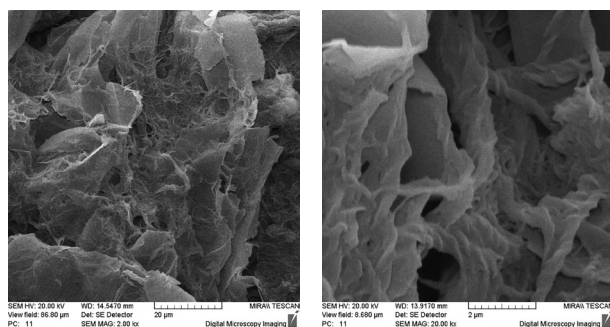


Рисунок 4 — Микроструктура гибридной дисперсной фазы 12-LioSt-ГПУ при различном увеличении
Figure 4 — Microstructure of the hybrid dispersed phase 12-LioSt-GLC at various magnifications

синтеза, позволяет, наряду с противоизносными и противозадирными качествами слоистого наполнителя, придать ему функции дополнительно-го загустителя. Анализ дисперсной фазы 12-LioSt-ГПУ при дисперсности частиц ГПУ менее 10 мкм показывает, что структура ГДФ представляет собой сочетание ломаных пластин ГПУ и витых волокон 12-оксистеарата лития (рисунок 4). Пластины ГПУ и волокна соли карбоновой кислоты равномерно распределены по области анализа. При этом отсутствуют отдельно лежащие элементы дисперсной фазы, волокна переплетены друг с другом, а также оплетают пластины ГПУ. В местах контакта волокон с пластинами они повторяют контур последних и прочно закреплены на их поверхности. Это обеспечивает высокий уровень коллоидной и механической стабильности пластичной смазки на гибридном загустителе состава 12-LioSt-ГПУ.

В таблице 1 приведено сопоставление параметров двух литиевых пластичных смазок, изготовленных по различным технологическим схемам:

- подмешивание ГПУ (3,0 масс.%) в состав литиевой смазки со сформированной одинарной мыльной дисперсной фазой по традиционному способу (смазка 1);

- введение ГПУ (3,0 масс.%) в реактор до начала процесса структурообразования с формированием гибридной дисперсной фазы состава 12-LioSt-ГПУ по способу, описанному в [13] (смазка 2).

Анализ данных таблицы 1 свидетельствует о более высоком уровне реологических (коллоидной и механической стабильности, температуры каплепадения) и трибологических (нагрузки сваривания) свойств смазки с гибридной дисперсной фазой (смазка 2). Особо следует отметить, что эта смазка благодаря своему гибриднему загустителю приобрела уникальную термостойкость. Так, у литиевой смазки, полученной традиционным способом, температура каплепадения составляет 200 °С. При этом смазка полностью расплавляется, свободно течет и становится по реологическим свойствам подобной минеральному маслу, на котором она изготовлена. Температура каплепадения смазки с гибридной дисперсной фазой превышает 300 °С. После испытаний на термостойкость эта смазка не термоупрочнилась и сохранила свои физические свойства.

Разработка регрессионной модели процесса получения пластичной смазки, содержащей ГПУ. Поскольку разработка рецептуры пластичных смазочных материалов и технологических режимов их получения является весьма трудоемкой задачей, решение которой требует значительных материальных и временных затрат, то целесообразно в таких случаях пойти по пути решения задач математической оптимизации, в частности, воспользовавшись методом планирования экспериментальных исследований, который позволяет снизить затраты на разработку новой продукции с обеспечением заданных характеристик ее качества. Задачу оптимизации компонентного состава и режимов синтеза пластичной смазки, содержащей частицы ГПУ, решали аналогично описанному в [18].

Из опыта разработки и применения пластичных смазочных материалов можно заключить, что

Таблица 1 — Параметры литиевых смазок с одинарной и гибридной дисперсной фазой, содержащих частицы ГПУ
Table 1 — Parameters of lithium lubricants with single and hybrid dispersed phases containing GLC particles

Параметры	Смазка 1	Смазка 2
Тип дисперсной фазы	Одинарная	Гибридная
Пенетрация, 10 ⁻¹ мм	185	260
Предел прочности при 20 °С, Па	1320	820
Коллоидная стабильность, %	12	4
Эффективная вязкость при 0 °С и среднем градиенте скорости деформации 10 с ⁻¹ , Па·с	120	240
Температура каплепадения, °С	200	> 300
Изменение пенетрации после 100 000 ударов, 10 ⁻¹ мм	150	25
Нагрузка сваривания, Н	2600	2900
Доля свободной щелочи в пересчете на NaOH, %	Отс.	< 0,1
Кислотное число, мг/г КОН	15	Отс.
Коррозионное воздействие на металлы	Не выдерживает	Выдерживает

показателями, достаточно полно характеризующими качество пластичной смазки, в целом могут являться ее пенетрация P (консистентность) и нагрузка сваривания $P_{св}$, на уровень значений которых в первую очередь влияет количество дисперсной фазы (в данном случае стеарата лития) C_{Li} и наполнителя (в данном случае ГПУ $C_{ГПУ}$); а из технологических режимов можно выделить температуру термообработки реакционной массы $T_{ТО}$, наиболее существенно сказывающуюся на характере протекания процессов структурообразования пластичной смазки. Поэтому применительно к решению задачи оптимизации состава и режимов получения ПСМ на литиевом загустителе с введением наполнителя в виде ГПУ в качестве критериев оптимизации были выбраны пенетрация P (0,1 мм) — Y_1 , нагрузка сваривания $P_{св}$ (Н) — Y_2 , а параметрами оптимизации выступали три фактора: содержание литиевого загустителя в пластичной смазке C_{Li} (масс.%) — x_1 ; содержание наполнителя в виде ГПУ $C_{ГПУ}$ (масс.%) — x_2 ; температура термообработки реакционной массы в процессе приготовления пластичной смазки $T_{ТО}$ (°C) — x_3 . В качестве дисперсионной среды пластичной смазки было выбрано масло индустриальное марки И-40А (ГОСТ 20799-88). Для обоснованного выбора компонентного состава и технологических режимов получения пластичной смазки, а также сокращения продолжительности и объема испытаний были использованы методы математического планирования эксперимента.

Математическая модель уравнения отклика от независимых переменных, с учетом эффектов их взаимодействий и ошибки эксперимента, была представлена в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y — критерий оптимизации; k — число факторов; i, l — номера факторов, $i \neq l$; x_i, x_l — варьируемые факторы (параметры оптимизации); b_0, b_i, b_{il}, b_{ii} — коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на критерий оптимизации.

Для получения модели процесса в виде полинома второй степени реализован некомпозиционный план второго порядка. Использование некомпозиционных планов, предусматривающих всего три уровня варьирования факторов (+1, 0, -1), упрощает и удешевляет проведение эксперимента.

Некомпозиционные планы характеризуются наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей, в результате чего существенно упрощается вычисление коэффициентов модели.

На основе априорной информации были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов (таблица 2).

В соответствии с условиями опытов (таблица 3) осуществлялся синтез пластичных смазок на литиевом загустителе с добавлением ГПУ с оценкой пенетрации P (по ГОСТ 5346-78) и нагрузки сваривания $P_{св}$ (по ГОСТ 9490-75). Эти параметры в достаточной степени определяют качество пластичной смазки и позволяют выбрать области ее наиболее рационального применения.

Значения Y_1 и Y_2 получены как средние на основании трех измерений. Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице 3.

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования, получена модель, характеризующая зависимость Y_1 от исследуемых факторов процесса и представляет собой полином второй степени:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (2)$$

Коэффициенты модели вычисляли по приведенным в [19] формулам:

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j; \quad b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j;$$

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u}.$$

После вычислений получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (с округлением до двух знаков после запятой):

$$b_0 = 239,33; \quad b_1 = -56,00; \quad b_2 = -48,38; \quad b_3 = -3,13;$$

$$b_{12} = 17,5; \quad b_{13} = 3,00; \quad b_{23} = -0,75;$$

$$b_{11} = 4,71; \quad b_{22} = 15,96; \quad b_{33} = 12,96.$$

Дисперсию $s^2\{Y_1\}$ параметра оптимизации определяли по результатам опытов в центре плана (см. таблицу 3, опыты № 5, 10, 15). Для вычисления дисперсии $s^2\{Y_1\}$ составлена вспомогательная таблица 4.

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, вычисляли по приведенным в [19] формулам при

Таблица 2 — Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 2 — Levels and intervals of variation of factors

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			Основной 0	Верхний +1	Нижний -1
Содержание литиевого загустителя C_{Li} , масс.%	x_1	3,0	7,0	10,0	4,0
Содержание ГПУ в загустителе $C_{ГПУ}$, масс.%	x_2	2,0	2,0	4,0	0,0
Температура термообработки $T_{ТО}$, °C	x_3	15,0	195	205	185

Таблица 3 — Матрица планирования и результаты опытов
Table 3 — Planning matrix and experimental results

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y_1 , пенетрация П, 10^{-1} мм	Y_2 , нагрузка сваривания $P_{св}$, Н
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	175	3479
2	+	+	–	0	–	0	0	+	+	0	235	1235
3	+	–	+	0	–	0	0	+	+	0	250	3283
4	+	–	–	0	+	0	0	+	+	0	380	980
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	241	2607
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	195	2607
7	+	+	0	–	0	–	0	+	0	+	205	2100
8	+	–	0	+	0	–	0	+	0	+	303	2067
9	+	–	0	–	0	+	0	+	0	+	325	1960
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	237	2764
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	220	2930
12	+	0	+	–	0	0	–	0	+	+	218	2930
13	+	0	–	+	0	0	–	0	+	+	320	1510
14	+	0	–	–	0	0	+	0	+	+	315	1098
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	240	2607

Таблица 4 — Вспомогательная таблица для расчета $s^2\{Y_1\}$
Table 4 — Auxiliary table for calculating $s^2\{Y_1\}$

Номер опыта в центре плана	Y_1	\bar{Y}_1	$Y_1 - \bar{Y}_1$	$(Y_1 - \bar{Y}_1)^2$
5	241,00	239,33	1,67	2,78
10	237,00		−2,33	5,44
15	240,00		0,67	0,44
$s^2 \{Y_1\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{8,67}{3 - 1} = 4,33$				$s_E = \sum (Y_1 - \bar{Y}_1)^2 = 8,67$

числе факторов $k = 3$. Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3}s^2\{Y_{\Pi}\} = 1,444;$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{8}s^2\{Y_{\Pi}\} = 0,542;$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4}s^2\{Y_{\Pi}\} = 1,083;$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{48}s^2\{Y_{\Pi}\} = 1,174.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели находим их доверительные интервалы. Доверительный интервал Δb_0 коэффициента b_0 находим по выражению

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\} = \pm 2,452,$$

где t_T — табличное значение критерия Стьюдента; при числе степеней свободы f , равном 30, и 5-процентном уровне значимости $t_T = 2,04$:

$$f = (n - 1) \cdot N = (3 - 1) \cdot 15 = 30,$$

где N — число опытов в матрице планирования; n — число параллельных опытов.

Аналогично определяем доверительные интервалы коэффициентов b_i , b_{ii} , b_{ij} :

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\} = \pm 1,501;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 2,123;$$

$$\Delta b_{ij} = \pm t_T s\{b_{ij}\} = \pm 2,210.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Коэффициенты b_3 , b_{12} , b_{13} меньше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. Тогда уравнение регрессии (2) получает вид:

$$Y_1 = 239 - 56x_1 - 48,38x_2 - 3,13x_3 + 17,50x_1x_2 + 3x_1x_3 + 4,71x_1^2 + 15,96x_2^2 + 12,96x_3^2. \quad (3)$$

Адекватность полученной модели проверяем по F-критерию Фишера. Для вычисления дисперсии адекватности $s_{ад}^2$ находим сумму s_R квадратов отклонений расчетных значений \hat{Y}_1 от экспериментальных Y_1 во всех точках плана (таблица 5). Расчетные значения \hat{Y}_1 определяем по выражению (3), $s_E = 8,67$ (см. таблицу 4).

Таблица 5 — Вспомогательная таблица для вычисления s_R
Table 5 — Auxiliary table for calculating s_R

Номер опыта	Y_1	\hat{Y}	$Y_1 - \hat{Y}_1$	$(Y_1 - \hat{Y}_1)^2$
1	175,00	173,13	1,88	3,52
2	235,00	234,88	0,13	0,02
3	250,00	250,13	-0,13	0,02
4	380,00	381,88	-1,88	3,52
5	241,00	239,33	1,67	2,78
6	195,00	200,88	-5,88	34,52
7	205,00	201,13	3,88	15,02
8	303,00	306,88	-3,88	15,02
9	325,00	319,13	5,88	34,52
10	237,00	239,33	-2,33	5,44
11	220,00	216,00	4,00	16,00
12	218,00	223,75	-5,75	33,06
13	320,00	314,25	5,75	33,06
14	315,00	319,00	-4,00	16,00
15	240,00	239,33	0,67	0,44
$s_R = \sum (Y_1 - \hat{Y}_1)^2 = 212,92$				

Находим дисперсию:

$$s_{\text{ал}}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{212,92 - 8,67}{15 - 9 - (3 - 1)} = 51,06,$$

где N — общее количество опытов; k' — количество коэффициентов аппроксимирующего полинома (количество значимых факторов); n_0 — количество опытов в центре плана.

Дисперсия $s_2\{Y_1\} = 4,33$ (см. таблицу 4), поэтому расчетное значение F-критерия

$$F_p = \frac{s_{\text{ал}}^2}{s^2\{Y_1\}} = 11,79.$$

Табличное значение F-критерия при 5-процентном уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 4$, меньшей дисперсии $m_2 = n_0 - 1 = 2$, $F_T = 19,3$. Так как $F_p < F_T$, полученная модель (3) адекватна при 5-процентном уровне значимости.

Анализ уравнения (3) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования увеличение фактора x_1 в большей степени влияет на повышение показателя пенетрации П, чем факторов x_2 и x_3 , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (3) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор x_1 .

Для удобства интерпретации полученных результатов и использования уравнения (3) для практических расчетов необходимо перейти от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) факторов к натуральным значениям ($C_{\text{Ли}}, C_{\text{ГПУ}}, T_{\text{ТО}}$). Для этого использовали следующие формулы:

$$x_1 = \frac{C_{\text{Ли}} - C_{\text{Ли}0}}{\Delta C_{\text{Ли}}}; \quad x_2 = \frac{C_{\text{ГПУ}} - C_{\text{ГПУ}0}}{\Delta C_{\text{ГПУ}}};$$

$$x_3 = \frac{T_{\text{ТО}} - T_{\text{ТО}0}}{\Delta T_{\text{ТО}}},$$

где $C_{\text{Ли}0}, C_{\text{ГПУ}0}, T_{\text{ТО}0}$ — натуральные значения факторов на основных уровнях; $\Delta C_{\text{Ли}}, \Delta C_{\text{ГПУ}}, \Delta T_{\text{ТО}}$ — значения интервалов варьирования.

Таким образом, в соответствии с таблицей 1,

$$x_1 = \frac{C_{\text{Ли}} - 7}{3}; \quad x_2 = \frac{C_{\text{ГПУ}} - 2}{2}; \quad x_3 = \frac{T_{\text{ТО}} - 195}{10}.$$

С учетом перехода к натуральным значениям факторов уравнение регрессии (3) примет вид:

$$Y_1(\Pi) = 0,523C_{\text{Ли}}^2 + 2,917C_{\text{Ли}} \cdot C_{\text{ГПУ}} + 0,1C_{\text{Ли}} \cdot T_{\text{ТО}} - 51,33C_{\text{Ли}} + 3,99C_{\text{ГПУ}}^2 - 60,57C_{\text{ГПУ}} + 0,1296T_{\text{ТО}}^2 - 51,557T_{\text{ТО}} + 5626,39. \quad (4)$$

Аналогично получено уравнение регрессии для нагрузки сваривания $Y_2 (P_{\text{св}})$:

$$Y_2 = 2659,33 + 141,38x_1 + 974,88x_2 + 128,25x_3 + 100x_1x_3 - 103x_2x_3 - 174,29x_1^2 - 240,79x_2^2 - 301,54x_3^2. \quad (5)$$

Полученная модель адекватна при 5-процентном уровне значимости, так как

$$F_p = \frac{s_{\text{ал}}^2}{s^2\{Y_2\}} = 6,73 < F_T = 19,3.$$

После перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) факторов к натуральным значениям ($C_{\text{Ли}}, C_{\text{ГПУ}}, T_{\text{ТО}}$) уравнение (5) примет вид:

$$Y_2(P_{\text{св}}) = -19,37C_{\text{Ли}}^2 + 3,33C_{\text{Ли}}T_{\text{ТО}} - 331,75C_{\text{Ли}} - 60,20C_{\text{ГПУ}}^2 - 5,15C_{\text{ГПУ}}T_{\text{ТО}} + 1732,48C_{\text{ГПУ}} - 3,02T_{\text{ТО}}^2 + 1175,80T_{\text{ТО}} - 114455,11. \quad (6)$$

Анализ уравнения (5), составленного в кодированных переменных, показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов наибольшее влияние на увеличение значения нагрузки сваривания Y_2 оказывает фактор x_2 , соответствующий содержанию ГПУ ($C_{\text{ГПУ}}$), затем следует фактор x_1 , отражающий содержание литиевого загустителя ($C_{\text{Ли}}$), и наименьшее влияние оказывает фактор x_3 , соответствующий температуре термообработки реакционной массы ($T_{\text{ТО}}$). Эти выводы основаны на сравнении коэффициентов при линейных членах уравнения: 974,88 для x_2 , 141,38 для x_1 и 128,25 для x_3 .

При этом, как и в случае пенетрации, наличие квадратичных и взаимодействующих членов в уравнении создает выраженную нелинейную зависимость отклика от факторов, особенно по переменным x_2 ($C_{\text{ГПУ}}$) и x_3 ($T_{\text{ТО}}$), что обусловлено значительными коэффициентами при x_2^2 и x_3^2 .

Уравнения регрессии (4) и (6) можно использовать для выбора рецептуры и технологических режимов получения пластичных литевых смазок с наполнителем на основе ГПУ, обеспечивающих оптимальные значения пенетрации и нагрузки сваривания в зависимости от исследуемых факторов (C_{Li} , $C_{ГПУ}$, $T_{ТО}$). На рисунках 5–10 представлены полученные с помощью уравнений (4) и (6) графические зависимости пенетрации и нагрузки сваривания от исследуемых факторов. При построении поверхностей отклика (с использованием программы SigmaPlot 12) выбран вариант варьирования двух факторов при фиксированном третьем.

Из рисунков 5–7 видно, что основным фактором, влияющим на значение пенетрации, является содержание литиевого загустителя C_{Li} , затем — содержание ГПУ $C_{ГПУ}$ и температура термообработки реакционной массы $T_{ТО}$. Наиболее высокие значения

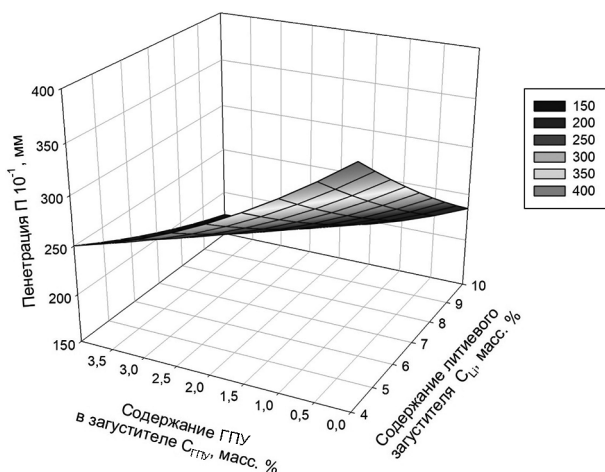


Рисунок 5 — Зависимость пенетрации Π от содержания литиевого загустителя (C_{Li}) и содержания ГПУ в загустителе ($C_{ГПУ}$) при постоянной температуре термообработки $T_{ТО} = 195\text{ °C}$

Figure 5 — Dependence of the penetration Π on the lithium thickener content (C_{Li}) and the GLC content in the thickener ($C_{ГПУ}$) at the constant heat treatment temperature $T_{ТО} = 195\text{ °C}$

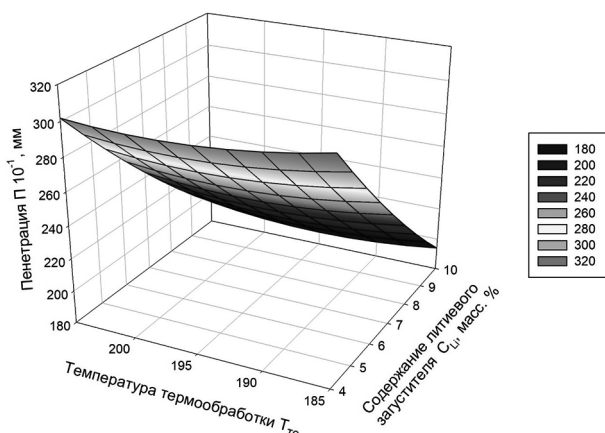


Рисунок 6 — Зависимость пенетрации Π от содержания литиевого загустителя (C_{Li}) и температуры термообработки ($T_{ТО}$) при содержании ГПУ в загустителе $C_{ГПУ} = 2\text{ масс.}\%$

Figure 6 — Dependence of the penetration Π on the lithium thickener content (C_{Li}) and the heat treatment temperature ($T_{ТО}$) with the GLC content in the thickener $C_{ГПУ} = 2\text{ wt.}\%$

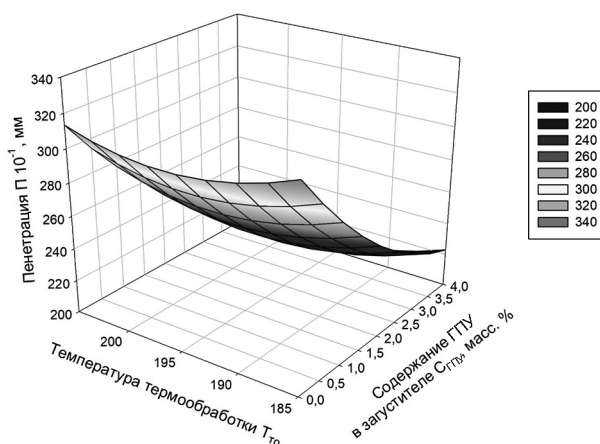


Рисунок 7 — Зависимость пенетрации Π от содержания ГПУ в загустителе ($C_{ГПУ}$) и температуры термообработки ($T_{ТО}$) при содержании литиевого загустителя $C_{Li} = 7\text{ масс.}\%$

Figure 7 — Dependence of the penetration Π on the GLC content in the thickener ($C_{ГПУ}$) and the heat treatment temperature ($T_{ТО}$) with the lithium thickener content $C_{Li} = 7\text{ wt.}\%$

пенетрации (на уровне $\Pi = (280\text{--}380) \cdot 10^{-1}\text{ мм}$) обеспечиваются при содержании $C_{Li} = 4,0\text{--}5,5\text{ масс.}\%$, $C_{ГПУ} = 0\text{--}2,0\text{ масс.}\%$ и температуре термообработки $T_{ТО} = 185\text{--}195\text{ °C}$.

Аналогично анализ поверхностей отклика, представленных на рисунках 8–10, показал, что на нагрузку сваривания $P_{св}$ наиболее сильно влияет содержание ГПУ ($C_{ГПУ}$), затем температура термообработки ($T_{ТО}$), и в наименьшей степени содержание литиевого загустителя (C_{Li}). Наибольшие значения нагрузки сваривания (на уровне $P_{св} = 3000\text{--}3240\text{ Н}$) достигаются при содержании $C_{ГПУ} = 2,5\text{--}4\text{ масс.}\%$, $C_{Li} = 7,75\text{--}9,25\text{ масс.}\%$ и температуре термообработки $T_{ТО} = 195\text{--}205\text{ °C}$. Особенно заметно, что при повышении содержания ГПУ свыше 3 % и одновременном увеличении температуры свыше 195 °C наблюдается резкий рост $P_{св}$, что связано с формированием прочной смазочной пленки, способной выдерживать высо-

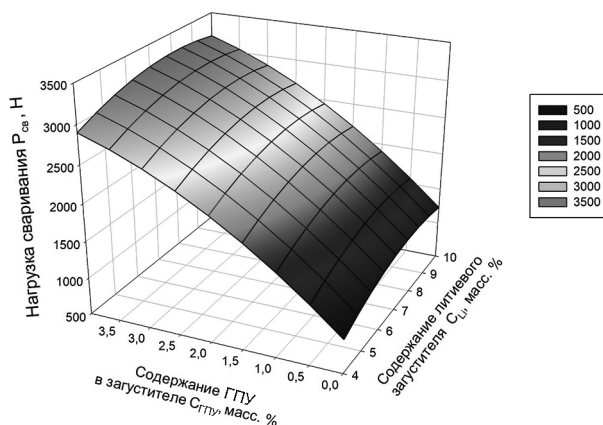


Рисунок 8 — Зависимость нагрузки сваривания $P_{св}$ от содержания литиевого загустителя (C_{Li}) и содержания ГПУ в загустителе ($C_{ГПУ}$) при постоянной температуре термообработки $T_{ТО} = 195\text{ °C}$

Figure 8 — Dependence of the welding load $P_{св}$ on the lithium thickener content (C_{Li}) and the GLC content in the thickener ($C_{ГПУ}$) at the constant heat treatment temperature $T_{ТО} = 195\text{ °C}$

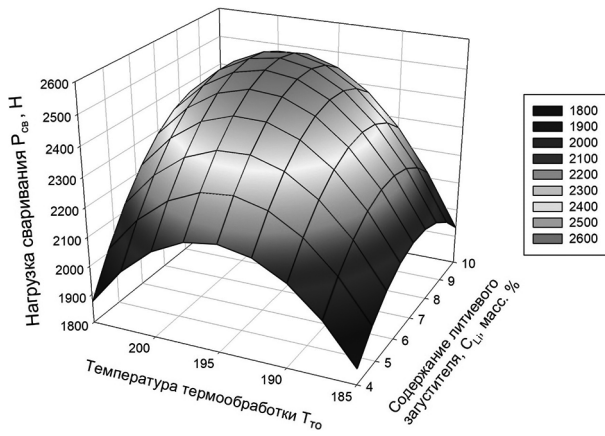


Рисунок 9 — Зависимость нагрузки сваривания $P_{св}$ от содержания литиевого загустителя ($C_{ли}$) и температуры термообработки ($T_{то}$) при содержании ГПУ в загустителе $C_{ГПУ} = 2$ масс. %

Figure 9 — Dependence of the welding load $P_{св}$ on the lithium thickener content ($C_{ли}$) and the heat treatment temperature ($T_{то}$) with the GLC content in the thickener $C_{ГПУ} = 2$ wt. %

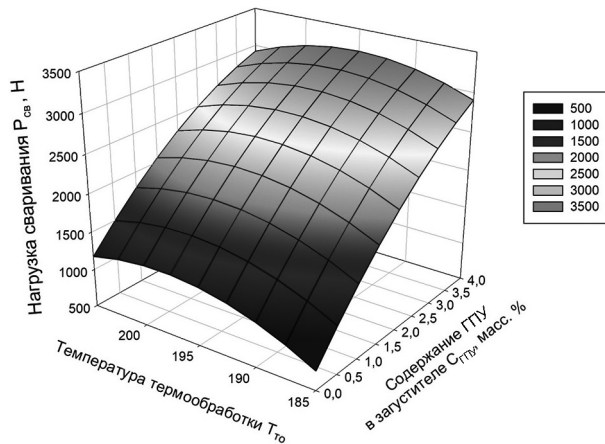


Рисунок 10 — Зависимость нагрузки сваривания $P_{св}$ от содержания ГПУ в загустителе ($C_{ГПУ}$) и температуры термообработки ($T_{то}$) при содержании литиевого загустителя $C_{ли} = 7$ масс. %

Figure 10 — Dependence of the welding load $P_{св}$ on the GLC content in the thickener ($C_{ГПУ}$) and the heat treatment temperature ($T_{то}$) with the lithium thickener content $C_{ли} = 7$ wt. %

кие контактные нагрузки. При снижении содержания ГПУ или недостаточной температуре (ниже 190 °C) наблюдается снижение нагрузки сваривания, что особенно заметно при содержании $C_{ли}$ ниже 6 %.

Таким образом, разработанные математические регрессионные модели обеспечивают научно обоснованную оптимизацию состава и условий получения пластичных литиевых смазок, содержащих ГПУ, позволяя прогнозировать их эксплуатационные свойства через значения пенетрации и нагрузки сваривания.

В частности, при необходимости получения литиевой смазки с функциональными характеристиками, соответствующими требованиям на уровне значений пенетрации $(250-295) \cdot 10^{-1}$ мм и нагрузки сваривания не менее 2500 Н, заложенные в регрессионной модели параметры рецептуры

Таблица 6 — Параметры технически оптимального варианта процесса синтеза пластичной литиевой смазки с ГПУ
Table 6 — Parameters of the technically optimal variant of the synthesis process of lithium grease with GLC

Наименование параметра	Значения параметров техпроцесса	
	расчетные	фактические
Содержание литиевого загустителя $C_{ли}$, масс. %	$6,5 \pm 0,5$	6,5
Содержание ГПУ в загустителе $C_{ГПУ}$, масс. %	$2,0 \pm 0,5$	2,0
Температура термообработки $T_{то}$, °C	$197,5 \pm 2,5$	195–197

и технологических режимов должны находиться в следующих пределах: содержание 12-оксистеарата лития в смазке $C_{ли} = 6,0-7,0$ масс.%; содержание ГПУ в загустителе $C_{ГПУ} = 1,5-2,5$ масс.%, температура термообработки реакционной массы $T_{то} = 195-200$ °C.

В таблице 6 представлены значения параметров технически оптимального варианта процесса синтеза пластичной литиевой смазки с наполнителем на основе ГПУ, которым соответствовали условия получения смазки при проверке адекватности разработанной математической модели.

Заключение. Смазочные материалы, содержащие ГПУ, включенный в структуру мыльного компонента дисперсной фазы, характеризуются повышенной коллоидной и механической стабильностью, имеют более высокую термическую стойкость и нагрузочную способность. Разработанная математическая регрессионная модель процесса получения литиевой смазки, модифицированной частицами ГПУ, позволяет определять компонентный состав смазки (концентрация литиевого загустителя и ГПУ), а также режим ее термообработки в зависимости от требуемого уровня характеристик качества смазочного материала (пенетрации и нагрузки сваривания).

Пластичные смазки, модифицированные высокодисперсными частицами ГПУ (терморасширенного графита), будут призваны заменить широкую гамму пластичных смазок, содержащих дисульфид молибдена или природный графит. Применение ГПУ в смазках позволит улучшить эксплуатационные характеристики смазочных материалов (повысить нагрузочную способность до 1,5–2 ГПа и термическую стойкость до 500–600 °C, снизить коррозионное действие), а также их радиационную стойкость и экологическую безопасность. Применение модифицированных ГПУ смазок поможет увеличить долговечность технологического оборудования различного функционального назначения (кузнечно-прессовое, металлорежущее, теплоэнергетическое), сельскохозяйственной, дорожно-строительной и карьерной техники при снижении затрат на их техническую эксплуатацию.

Список литературы

1. Манг, Т. Смазочные материалы: производство, применение, свойства: справ. / Т. Манг, У. Дрезель; пер. с англ. под ред. В.М. Школьников. — 2-е изд. — СПб.: Профессия, 2010. — 994 с.
2. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение / Л.Р. Рудник; пер. с англ. под ред. А.М. Данилова. — СПб.: Профессия, 2013. — 928 с.
3. Ищук, Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. — Киев: Наук. думка, 1996. — 510 с.
4. Любинин, И.А. Высокотемпературные пластичные смазки: состояние и перспективы производства в странах СНГ / И.А. Любинин, Л.В. Железный // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2013. — № 7. — С. 30–35.
5. Фукс, И.Г. Состав, свойства и производство пластичных смазок / И.Г. Фукс, С.Б. Шибряев. — М.: ГАНГ, 1992. — 157 с.
6. Жорник, В.И. Пластичная смазка с гибридной литий-кальциевой дисперсной фазой / В.И. Жорник, А.В. Ивахник // Инновационные технологии в машиностроении: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоцкого гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. / Полоцкий гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой. — Новополоцк, 2023. — С. 133–135.
7. Ивахник, А.В. Функциональные и технико-экономические преимущества пластичных смазок с гибридной дисперсной фазой / А.В. Ивахник, В.И. Жорник, Э. Зейналов // Трибология – машиностроению: тр. XV Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 12–14 нояб. 2024 г. / ИМАШ РАН. — М., 2024. — С. 79–81.
8. Сравнительная оценка триботехнических свойств РВС «Форсан» и дисульфида молибдена в качестве добавок к смазочным материалам / А.Н. Абрамов, Д.Г. Тюленев, И.С. Мухамадиев [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2008. — № 12. — С. 31–35.
9. Горленко, А.О. Эффективность применения дисульфида молибдена в качестве антифрикционного компонента смазочных масел / А.О. Горленко, И.Л. Шупиков, М.И. Прудников // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2014. — № 1(41). — С. 18–22.
10. Жорник, В.И. Применение терморасширенного графита в пластичных смазочных материалах / В.И. Жорник // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2013. — Вып. 2. — С. 408–411.
11. Влияние физико-химических характеристик расширенного графита на свойства пластичных смазок / О.И. Уманская, Р.Н. Абаджаева, Ю.Л. Ищук [и др.] // Химия и технология топлив и масел. — 1988. — № 2. — С. 32–33.
12. Патент RU 2428462C1, МПК C10M 177/00 (2006.01). Способ получения смазочной композиции: № 2010106513/04: заявлено 24.02.2010: опубл. 10.09.2011 / Ким Е.В., Голубев Е.В.; заявитель ГОУВПО «Тюменский государственный университет». — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2428462C1/ru> (дата обращения 15.07.2025).
13. Патент BY 22180, МПК C10M 169/04, C10M 125/02, C10M 119/04. Способ получения пластичной смазки: № a20150529: заявлено 03.11.2015: опубл.: 26.06.2018 / Жорник В.И., Ивахник А.В., Ивахник В.П.; заявитель Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=31517> (дата обращения: 15.07.2025).
14. Ищук, Ю.Л. Влияние состава дисперсной фазы на структуру и свойства олеогелей – пластичных смазок / Ю.Л. Ищук // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. — 1983. — Вып. 15. — С. 63–75.
15. Zhornik, V.I. The structure and properties of a biodegradable grease with a mixed dispersion medium and a heterogeneous lithium–calcium dispersed phase / V.I. Zhornik, A.V. Zapolsky, A.V. Ivakhnik // Journal of Friction and Wear. — 2022. — Vol. 43, iss. 4. — Pp. 229–235. — DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366622040122>.
16. Определение насыпной плотности терморасширенного графита / Д.М. Караваев, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев, К.В. Трошков // Известия Самарского научного центра РАН. — 2013. — Т. 15, № 4–2. — С. 360–362.
17. Жорник, В.И. Структура и свойства биоразлагаемой пластичной смазки со смешанной дисперсионной средой и гетерогенной литий-кальциевой дисперсной фазой / В.И. Жорник, А.В. Запольский, А.В. Ивахник // Трение и износ. — 2022. — Т. 43, № 4. — С. 351–360. — DOI: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2022-43-4-351-360>.
18. Development of the method and optimization of the composition and modes of obtaining the biodegradable grease with the lithium-calcium thickener / V.I. Zhornik, A.V. Zapolsky, A.V. Ivakhnik, A.M. Parnitsky // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 2(55). — С. 60–72. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-60-72>.
19. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.

ZHORNIK Viktor I., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Technologies of Mechanical Engineering and Metallurgy – Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: zhornikv@gmail.com

IVAKHNIK Anton V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: itmol@mail.ru

PARNITSKY Alexander M., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Senior Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: europacorp@tut.by

ADAMEIKO Andrei S.

Graduate Student of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: Adameyko001@gmail.com

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

MECHANISM OF THE FORMATION AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION AND SYNTHESIS MODES OF THE GREASE CONTAINING THE GRAPHENE-LIKE CARBON

The article considers a formation mechanism of the grease with the hybrid dispersed phase including a soap component in the form of the salts of the higher carboxylic acids (in particular, the lithium salt of the 12-hydroxystearic acid – 12-LioSt) and non-soap component in the form of the highly dispersed particles of the organic or inorganic origin (in particular, the particles of the graphene-like carbon (GLC), thermally expanded graphite). The mathematical regression model of the lithium grease with the hybrid dispersed phase of the 12-LioSt-GLC composition is developed, that makes it possible to determine the component composition (concentration of the lithium 12-oxytate and GLC) and the synthesis mode (heat treatment temperature of the reaction mass) depending on the required level of the rheological (penetration) and tribological (welding load) properties of the grease.

Keywords: grease, hybrid dispersed phase, soap thickener, graphene-like carbon, rheological and tribological properties, regression model, component composition, heat treatment mode

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-4-73-86-97>

References

1. Mang T., Dresel W. *Lubricants and lubrication*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 890 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527610341>.
2. Rudnick L.R. *Lubricant additives: chemistry and applications*. Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2009. 790 p.
3. Ishchuk Yu.L. *Sostav, struktura i svoystva plastichnykh smazok* [Composition, structure and properties of plastic lubricants]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1996. 510 p. (in Russ.).
4. Lyubinin I.A., Zheleznyy L.V. Vysokotemperaturnye plastichnye smazki: sostoyaniye i perspektivy proizvodstva v stranakh SNG [High-temperature plastic lubricants: condition and production prospects in CIS countries]. *Friction & lubrication in machines and mechanisms*, 2013, no. 7, pp. 30–35 (in Russ.).
5. Fuks I.G., Shibrayev S.B. *Sostav, svoystva i proizvodstvo plastichnykh smazok* [Composition, properties and production of plastic lubricants]. Moscow, GANG Publ., 1992. 157 p. (in Russ.).
6. Zhornik V.I., Ivakhnik A.V. Plastichnaya smazka s gibridnoy lityi-kaltsievoy dispersnoy fazoy [Grease with hybrid lithium-calcium dispersed phase]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 55-letiyu Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoy* "Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii" [International scientific and technical conference dedicated to the 55th anniversary of Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk "Innovative technologies in mechanical engineering"], Novopolotsk, 2023, pp. 133–135 (in Russ.).
7. Ivakhnik A.V., Zhornik V.I., Zeynalov E. Funktsionalnye i tekhniko-ekonomicheskie preimushchestva plastichnykh smazok s gibridnoy dispersnoy fazoy [Functional and technical and economic advantages of greases with hybrid dispersed phase]. *Trudy 15 Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Tribologiya – mashinostroeniye"* [Proc. 15th International scientific and technical conference "Tribology for mechanical engineering"]. Moscow, 2024, pp. 79–81 (in Russ.).
8. Abramov A.N., et al. Sravnitel'naya otsenka tribotekhnicheskikh svoystv RVS "Forsan" i disulfida molibdena v kachestve dobavok k smazochnym materialam [The analysis of tribotechnical properties of repair-reductive composition "Forsan" and molybdenum disulfide in different schemes of tests]. *Friction & lubrication in machines and mechanisms*, 2008, no. 12, pp. 31–35 (in Russ.).
9. Gorlenko A.O., Shupikov I.L., Prudnikov M.I. Effektivnost primeneniya disulfida molibdena v kachestve antifriktsionnogo komponenta smazochnykh masel [Efficiency of the disulfide of molybdenum as the antifrictional component of lubricant oils]. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2014, no. 1(41), pp. 18–22 (in Russ.).
10. Zhornik V.I. Primenenie termorasshirennogo grafita v plastichnykh smazochnykh materialakh [Application of expanded graphite in greases]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2013, iss. 2, pp. 408–411 (in Russ.).
11. Umanskaya O.I., et al. Vliyanie fiziko-khimicheskikh kharakteristik rasshirennogo grafita na svoystva plastichnykh smazok [The effect of the physico-chemical characteristics of expanded graphite on the properties of lubricants]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1988, no. 2, pp. 32–33 (in Russ.).
12. Kim E.V., Golubev E.V. *Sposob polucheniya smazochnoy kompozitsii* [Method to produce lubricant composition]. Patent RU, no. 2428462C1, 2011 (in Russ.).
13. Zhornik V.I., Ivakhnik A.V., Ivakhnik V.P. *Sposob polucheniya plastichnoy smazki* [Method to produce a grease]. Patent BY, no. 22180, 2018 (in Russ.).
14. Ishchuk Yu.L. Vliyanie sostava dispersnoy fazy na strukturu i svoystva oleogeley – plastichnykh smazok [The effect of the composition of the dispersed phase on the structure and properties of oleogels, greases]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika i liofilnost dispersnykh sistem*, 1983, iss. 15, pp. 63–75 (in Russ.).
15. Zhornik V.I., Zapolsky A.V., Ivakhnik A.V. The structure and properties of a biodegradable grease with a mixed dispersion medium and a heterogeneous lithium-calcium dispersed phase. *Journal of friction and wear*, 2022, vol. 43, iss. 4, pp. 229–235. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366622040122>.
16. Karavaev D., Makarova L., Degtyaryov A., Troshkov K. Opredelenie nasypnoy plotnosti termorasshirennogo grafita [Determination the bulk density of thermoexpanded graphite]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, vol. 15, no. 4–2, pp. 360–362 (in Russ.).
17. Zhornik V.I., Zapolsky A.V., Ivakhnik A.V. Struktura i svoystva biorazlagayemykh plastichnykh smazki so smeshannoy dispersionnoy sredoy i geterogennoy lityi-kaltsievoy dispersnoy fazoy [Structure and properties of the biodegradable grease with the mixed dispersion medium and heterogeneous lithium-calcium dispersed phase]. *Friction and wear*, 2022, vol. 43, no. 4, pp. 351–360. DOI: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2022-43-4-351-360> (in Russ.).
18. Zhornik V.I., Zapolsky A.V., Ivakhnik A.V., Parnitsky A.M. Development of the method and optimization of the composition and modes of obtaining the biodegradable grease with the lithium-calcium thickener. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 2(55), pp. 60–72. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-60-72>.
19. Spiridonov A.A. *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russ.).