

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства"
(ПГУАС)

**Л.Н. Шафигуллин, А.В. Лахно,
П.И. Аношкин, А.А. Бобрышев**

**ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Пенза 2014

УДК 620.1:678

ББК 34.5

В93

Рецензенты: доктор технических наук, профессор кафедры «Организация и информатизация производства» О.Н. Кухарев (ПГСХА);
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки» С.А. Болтышев (ПГУАС).

В93 **Высокотехнологичные** полимерные композиционные материалы для изделий машиностроения: моногр. / Л.Н. Шафигуллин, А.В. Лахно, П.И. Аношкин, А.А. Бобрышев. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 184 с.
ISBN 978-5-9282-1199-8

В монографии представлены исследования высокотехнологичных полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами для изделий машиностроения.

Проанализированы эпоксидные, полиэфирные и эпоксиполиуретановые композитные материалы, показана перспективность их применения в машиностроении в качестве защитных покрытий, фасонных изделий, футеровочных плит для защиты металлических конструкций от воздействия агрессивных сред и ударных нагрузок.

Рассмотрены многокритериальные методы оптимизации составов полимерных наполненных композитов, учитывающие физико-механические, технологические и экономические критерии композитов. В результате предложена методика расчета оптимальных составов полимерных композиционных материалов.

Проанализированы существующие методы изготовления заготовок и деталей из полимерных композитов. Выявлена эффективность использования механической обработки для производства машиностроительных изделий и деталей из композиционных материалов.

Монография подготовлена на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта» и предназначена для широкого круга специалистов, занимающихся изучением и разработкой полимерных композитных материалов, а также может быть использована, студентами обучающимися по направлению 08.04.01 «Строительство».

ISBN 978-5-9282-1199-8

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014

© Шафигуллин Л.Н., Лахно А.В.,
Аношкин П.И., Бобрышев А.А., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Новые материалы, появляющиеся вследствие стремления к совершенствованию существующих машиностроительных конструкций и изделий, открывают возможности для реализации перспективных конструктивных решений и технологических процессов.

В настоящее время перспективы прогресса в машиностроении неразрывно связаны с разработкой и широким внедрением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в производство. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: исследовать основные физико-механические свойства полимерных композиционных материалов и выявить закономерности изменения деформационно-прочностных и коррозионных показателей композитов на различных смолах в зависимости от вида и концентрации модифицирующих добавок, объёмного содержания, вида и дисперсности наполнителей; исследовать влияние технологических факторов, таких как режимы механической обработки, воздействие агрессивных сред, на физико-механические и технологические свойства полимерных композитов; разработать достоверные прогнозные модели влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства полимерных композитов с последующей реализацией в системе автоматизированного проектирования составов ПКМ; разработать высокотехнологичные составы композиционных материалов для производства машиностроительных изделий.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся изучением и разработкой полимерных композиционных материалов, докторантов, аспирантов и студентов технических специальностей.

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс вызывает необходимость создания высокотехнологичных полимерных материалов, используемых в машиностроении.

Разработки и исследования отечественных и зарубежных ученых показали большие перспективы получения композиционных материалов на основе модифицированных эпоксидных и полиэфирных смол [1–13]. Благодаря уникальному комплексу эксплуатационных свойств композиционные материалы на основе полимеров нашли широкое применение в машиностроении при производстве защитных покрытий, стеклопластиков, фасонных изделий, футеровочных плит для защиты металлических конструкций от воздействия агрессивных сред и ударных нагрузок, элементов станочной системы (станин, направляющих, подрезцовых пластин и державок токарных резцов), а также для восстановления и усиления конструкций и омоноличивания сборных элементов.

Футеровочные плиты и элементы фитинговых систем из полимерных композиционных материалов в процессе своей эксплуатации испытывают различные внешние нагрузки (статические, динамические, ударные), а также действие агрессивных сред (вода, смазочно-охлаждающая жидкость, кислые и щелочные среды), снижающих их физико-механические свойства и приводящих к преждевременному выходу из строя готовых изделий.

В процессе изготовления и применения полимерных композиционных материалов возникает необходимость их механической обработки: резки, фрезерования, сверления. Механическую обработку резанием используют для обеспечения повышенной точности геометрических размеров изделий, при их сложной конфигурации, а также при малых объемах производства, когда использование трудоемкой и дорогостоящей технологической оснастки (пресс-форм) экономически нецелесообразно. Во многих случаях детали повышенной точности и высокого качества могут быть получены только механической обработкой – точением, сверлением и фрезерованием.

Применение механической обработки в сочетании с оптимизацией составов полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами отвечает современным требованиям повышения технологичности производства изделий в машиностроении [1].

С целью повышения эффективности производства и достижения высокого качества изделий из полимерных композиционных материалов необходима разработка моделей, позволяющих оптимизировать их технологические и физико-механические свойства. Решение данной задачи связано с расчетом параметров физико-механических свойств и оптимизацией технологических показателей механической обработки композиционных материалов.

1. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

1.1. Эпоксидные, полиэфирные и эпоксиполиуретановые композиционные материалы в машиностроении

В настоящее время в машиностроении широко используются полимерные композиты на основе эпоксидных смол. Для производства изделий из ПКМ в основном используют эпоксидно-диановые смолы ЭД-20 и ЭД-16 [1,9].

Эпоксидные смолы (олигомеры) являются низкомолекулярными линейными полимерами. Эпоксидные смолы содержат одну или несколько групп, в которых наряду с нормальной связью между углеродными атомами присутствует связь через кислородный мостик [10].

Для придания эпоксидным олигомерам ценных технических свойств в них создают пространственно-сшитую структуру, т.е. проводят отверждение. Введение специальных отвердителей обеспечивает образование в определенных условиях поперечных химических связей. В результате отверждения эпоксидные смолы легко переходят в термореактивное состояние. Эпоксидные смолы обладают рядом уникальных сочетаний свойств: возможностью получения их в жидком и твердом состоянии; отсутствием летучих веществ при отверждении; способностью отверждаться в широком температурном интервале в слоях любой толщины; малой усадкой; высокими значениями адгезионной и когезионной прочности; химической стойкостью к действию агрессивных сред; атмосферостойкостью; высокими физико-механическими показателями; хорошей окрашиваемостью и совмещаемостью с другими полимерами [11-18].

Отверждение эпоксидного олигомера происходит по реакционно-способным группам: эпоксидным и гидроксильным, входящим в состав эпоксидного олигомера. Этим объясняется сходный характер процессов отверждения эпоксидных олигомеров независимо от их структуры. Отверждение можно производить различными классами органических, неорганических и элементоорганических соединений (полиамины, полиангидриды, полиамиды и т.д.) [14, 17-23]. Отверждение идет по механизму поликонденсации или ионной полимеризации в присутствии инициаторов [11, 14-15, 18, 23-25].

Выбирая тип отвердителя, можно в широких пределах изменять физико-механические и химические свойства получаемых композитов – от резиноподобных до жестких, высокопрочных и высокомодульных, сохра-

няющих свои прочностные показатели в условиях длительного воздействия температур до 200°C и выше.

Для изготовления клеев, покрытий, связующих для стеклопластиков, пропиточных и заливочных компаундов используют низкомолекулярные эпоксидные смолы ($M_{cp}=350-600$). Отверждение смол происходит при комнатной и умеренной температурах (60-100 °C).

Смолы средней молекулярной массы ($M_{cp}=600-1400$) отверждают в горячем режиме ангидридами дикарбоновых кислот, ароматическими аминами, фенолформальдегидными смолами. Основное применение в машиностроении они нашли в качестве эмалей, лаков, шпаклевок, клеев. Твердые смолы высокомолекулярной массы в основном используют как основу порошковых красок, пресс-порошков, лакокрасочных материалов [20, 26].

На свойства эпоксидных композитов в значительной степени влияет не только вид, но и количество вводимого отвердителя. Количество отвердителя регулируется в зависимости от эпоксидного числа смолы (содержания эпоксидных групп) с учетом поправочного коэффициента. Величина коэффициента в свою очередь зависит от количества активных атомов водорода в отвердителе, вступающих в реакцию с эпоксидной группой. Также от природы отвердителя зависит густота пространственной сетки в эпоксидных композициях, что в свою очередь существенно влияет на величину внутренних напряжений.

Отверждение эпоксидных смол носит экзотермический характер, т.е. протекает с выделением тепла. Это может привести к преждевременному отверждению и образованию пор или растрескиванию.

Для отверждения диановых эпоксидных смол с молекулярным весом от 370 до 1000 широко применяют полиамины [11]. Наиболее часто используются алифатические амины: диэтилентриамин (ДЭТА); триэтилентетраамин (ТЭТА); диэтиламинопропиламин (ДЭАПА); полиэтиленполиамин (ПЭПА) – техническая смесь аминов, состоящая из смеси 25 соединений, в состав которой входят и выше перечисленные ДЭТА и ТЭТА.

Амины взаимодействуют с концевыми эпоксидными группами в результате миграции подвижного атома водорода аминогруппы [21, 27-29]. При этом происходит раскрытие α – оксидного цикла. Большинство из ароматических и алифатических отвердителей аминного типа содержит реакционноспособные группы на обоих концах молекул, что способствует образованию сшивок между молекулами эпоксида [15].

Скорость реакции взаимодействия гидроксильных групп аминов с эпоксидными группами эпоксидных соединений невелика. Однако гидроксильные группы, присутствующие в системе, оказывают заметное влияние на скорость реакции эпоксидных групп с аминогруппами. Для ускорения отверждения в реакционную смесь вводят ускорители,

содержащие гидроксильные группы – воду, фенолы, спирты, кислоты, при этом образуются водородные связи с кислородными атомами эпоксидных групп, что облегчает раскрытие эпоксидных циклов. Введение протоноакцепторных соединений, содержащих группы $-\text{COOR}$, $=\text{C}$, $-\text{O}$, $-\text{CONH}_2$, $-\text{SO}_3$, R , $-\text{SO}_2\text{NR}_2$, $-\text{CN}$, $-\text{NO}_2$, $-\text{Cl}$, $-\text{F}$, способствует замедлению отверждения полиаминами. Соотношение между эпоксидной смолой и полиамином должно быть стехиометрическим, но практически берется небольшой избыток отвердителя, величина которого зависит от летучести полиамина. Большой избыток полиамина снижает стойкость эпоксидов к действию воды, солей и веществ кислого характера.

Ароматические полиамины (м – фенилендиамин, диаминодифенилметан, диаминодифенилсульфон) в качестве отвердителей применяются реже за счет более низкой реакционной способностью по сравнению с алифатическими полиаминами. Отверждение таких систем протекает медленно и требует нагрева до 150°C [14, 17, 20, 30].

В случае использования эпоксидных композиций в условиях воздействия на них агрессивных сред (щелочных растворов) эффективно применять для отверждения кубовый остаток, представляющий собой осмоленную часть 3-диметиламинопропанола-1.

В лакокрасочной промышленности в качестве отвердителя эпоксидных смол широко применяются дициандиамин (ДЦДА) и полиаминомиды [10, 15, 18, 23, 26, 31].

В качестве отвердителей эпоксидных композиций (клеев и защитных покрытий) нашли применение третичные амины, являющиеся представителями наиболее реакционноспособных оснований Льюиса.

Для отверждения эпоксидных олигомеров часто используют ангидриды дикарбоновых кислот, которые взаимодействуют с гидроксильными группами макромолекул, образуя сложноэфирную связь. В результате этого появляется свободная карбоксильная группа, содержащая подвижный атом водорода, способный реагировать с эпоксидной группой, образуя новую гидроксильную группу [15].

Частое использование ангидридов в качестве отвердителей обусловлено тем, что в результате реакции со спиртовыми группами смолы не происходит выделение воды и образования побочных продуктов.

Также в качестве отвердителей можно использовать дикарбоновые кислоты, олигоэфиры с концевыми карбоксильными группами [16].

Присутствие в молекулах эпоксидной смолы гидроксильной группы позволяет использовать в качестве отвердителей ди- и полиизоцианаты [9, 25, 32, 33], которые бывают неблокированные (2,4-толуилنديизоцианат, 1,6-гексаметилендиизоцианат), частично блокированные (монофенилуретан (МФУ), дигликольуретан (ДГУ), монобутилуретан) и

полностью заблокированные изоцианаты (продукт ФЭУ, дибутилуретан, дифенилметанизоцианат).

В результате взаимодействия гидроксильных групп смолы с изоцианатными группами образуются уретановые связи. В случае повышенных температур (180-200 °С) могут образовываться пространственные структуры [25]. Эпоксидная группа также способна взаимодействовать с изоцианатами с образованием пятичленных циклов оксазолидонов – 2.

Не исключена возможность взаимодействия амидогруппы с эпоксидной группой смолы. В результате отверждения эпоксидной смолы изоцианатами образуется полимер с большей частотой пространственной сетки, не содержащей сводных функциональных групп. В случае применения аминных отвердителей гидроксильные группы не участвуют в химическом взаимодействии, отверждение осуществляется в результате взаимодействия эпоксидных групп с первичными и вторичными аминами.

При использовании изоцианатов для отверждения эпоксидных смол формируется более густая пространственная сетка между структурными элементами, чем при использовании отвердителей аминного характера. Однако в отвержденных изоцианатами эпоксидных композициях возникают внутренние напряжения в 2-5 раз больше, чем в композициях отвержденных аминами.

В процессе высокотемпературной сушки происходит распад уретановой связи между изоцианатом и блокирующим агентом. Освободившиеся изоцианатные группы реагируют с гидроксильными группами эпоксидной смолы, в результате чего образуется нерастворимый полимер, а выделившиеся фенол или спирт улетучиваются. В качестве блокирующих агентов применяются вторичные ароматические амины, лактамы, амиды, триазолы, оксины, тиолы, спирты и т.д.

Материалы на основе эпоксидных смол применяются в тех случаях, когда требуется обеспечение сочетания химической устойчивости, атмосферостойкости и высоких физико-механических эксплуатационных характеристик.

Также в машиностроении широко распространены полимерные композиты на основе полиэфирных смол. В основном при изготовлении изделий из полиэфирных смол используют конструкционную ортофталевую смолу средней реакционной способности с превосходными рабочими характеристиками 540-М 888.

Полиэфиры – это полимеры, содержащие в основной цепи макромолекулы функциональные группы простых (простые полиэфиры) или сложных (сложные полиэфиры) эфиров. Полиэфиры бывают двух типов: насыщенные и ненасыщенные.

Простые полиэфиры, $\text{HO} - [- \text{R} - \text{O} -]_n - \text{H}$ (R – углеводородный радикал различного строения, содержащий не менее двух атомов углерода),

получают полимеризацией циклических окисей (пропилена окиси, этилена окиси) или поликонденсацией гликолей.

Сложные полиэфиры линейной структуры, $\text{H}[-\text{ОАО}-\text{СО}-\text{А}'-\text{СО}-]_n-\text{ОН}$, (А – углеводородный радикал, $\text{А}'$ – остаток органической или неорганической кислоты (полиэтилентерефталат, нуклеиновые кислоты)), получают поликонденсацией либо гликолей с двухосновными кислотами или их ангидридами, либо оксикислот. При использовании многоатомных спиртов (глицерина, пентаэритрита, полиолов) получают разветвленные (алкидные смолы) или сшитые полиэфиры.

Свойства полиэфиров очень разнообразны и зависят от химического состава, структуры, молекулярной массы и наличия функциональных групп ($-\text{ОН}$ и $-\text{СООН}$). Простые полиэфиры эластичнее сложных. Полиэфиры могут вступать в химическую реакцию по концевым функциональным группам с увеличением молекулярной массы; ненасыщенные полиэфиры способны «сшиваться» с образованием трёхмерных структур. Сложные полиэфиры гидролизуются под действием кислот и щелочей, простые полиэфиры значительно устойчивее к гидролизу.

Применение полиэфиров определяется их свойствами. Ненасыщенные полиэфиры невысокой молекулярной массы (олигоэфиры) применяют в качестве компонентов клеев, лакокрасочных материалов, для пропитки и т.п. Полиэфиры высокой молекулярной массы используют в производстве пластмасс (поликарбонаты), плёнок и полиэфирных волокон.

Распространенными полимерными связующими, используемыми в машиностроении, являются ненасыщенные полиэфирные смолы: полиэфирмалеинаты и полиэфиракрилаты.

Полиэфирмалеинаты получают в результате взаимодействия ненасыщенных дикарбоновых кислот (малеиновой) и многоатомных спиртов (этиленгликоля). В ходе реакции получают аморфные стекловидные полиэфиры, которые растворяются в растворителе и способны участвовать в процессе полимеризации. С этой целью применяют мономер стирол.

Полиэфиракрилаты получают в результате реакции глицерина, фталевого ангидрида и метакриловой кислоты в среде инертного растворителя при температуре $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и интенсивном перемешивании. Свойства полиэфиракрилатов и полиэфирмалеинатов примерно одинаковы.

Отверждение 50-70% растворов полиэфиров проводят в присутствии 0,5-3% инициаторов радикальной полимеризации при $80-160\text{ }^{\circ}\text{C}$; при использовании пероксидных инициаторов в сочетании с 0,05-8% ускорителей (диметил- или диэтиланилин, тиомочевина, аскорбиновая кислота, соединения Sn , Mn , Co или V) реакция протекает при комнатной температуре. Отверждение проводят также фотохимически в присутствии 0,1-3% фотоинициаторов или под действием излучения (рентгеновское и γ – излучение, быстрые электроны).

Отверждение полиэфирных смол протекает под действием окислительно-восстановительных систем. Реакция инициируется перекисными соединениями. Распад перекисей в смоле, дающей начало радикальной полимеризации, происходит под действием нагрева, ультрафиолетовых лучей, облучения, а при обычной температуре реакция ускоряется добавкой сильных восстановителей: третичных аминов, нафтенатов кобальта и марганца и других веществ [35, 36].

В связи с вращением CH_2 и эфирных групп в полимерной цепи полиэфирной смолы, вызывающем рассеяние энергии, она обладает большой сегментальной подвижностью.

Физико-механические свойства полиэфирных смол зависят от степени их отверждения, т.е. от количества сшитого полимера. Увеличение содержания неотвержденного полимера способствует повышению коэффициента потерь, приводит к снижению модуля упругости, прочностных свойств, придает нестабильность физико-механическим свойствам полимерного связующего [37].

Отвержденные полиэфирные смолы устойчивы к воздействию воды, солевых растворов, минеральных кислот, растительных и животных масел, жиров, условно стойки против действия разбавленных щелочей и бензола, неустойчивы против концентрированных кислот, сильных щелочей, окислителей и многих растворителей. Обладают хорошей адгезией к различным поверхностям и высокими диэлектрическими показателями.

Для улучшения свойств композитов (комплекса демпфирующих и деформационно-прочностных свойств, повышения теплостойкости, химической и атмосферной устойчивости, адгезии, технологичности и т.д.) полимеры подвергают модификации.

На рис.1.1 представлена схема модификации сетчатых полимеров, на основе эпоксидных и полиэфирных связующих [38, 39]. В соответствии с данной классификацией модификацию термореактивных полимеров, получаемых на основе реакционноспособных мономеров и олигомеров, можно разделить на три группы: химические, физико-химические и физические. На практике обычно применяют комбинированные способы модификации.

Практической направленностью модификации полимеров для получения конструкционных материалов с высокими деформационно-прочностными показателями в производстве машиностроительных материалов является улучшение технологических, конструкционных и деформационно-прочностных свойств, к которым следует отнести: регулирование скорости и температуры отверждения; повышение жизнеспособности; снижение вязкости; повышение ударной вязкости, теплостойкости, долговечности и термостабильности; снижение ползучести; увеличение внутреннего трения, обрабатываемости [15].

Основным и эффективным способом изменения деформационно-прочностных свойств эпоксидных и полиэфирных матричных композиций является химическая модификация. С точки зрения структурной организации, химическую модификацию полимеров определяют как систему методов направленного регулирования их структуры на различных уровнях, вследствие введения специальных добавок и изменения химического строения компонентов реакционной смеси.

Для получения эпоксидных полимерных КМ с высокими деформационно-прочностными свойствами в качестве модифицирующих добавок используют фурановые и полиэфирные смолы, полиизоцианаты, каучуки [40, 41].

Основным недостатком эпоксидных полимеров является значительная хрупкость, связанная с густотой сетки в отвержденном состоянии, что затрудняет их применение в качестве машиностроительного материала. Для эластификации сетчатых полимеров применяют совместимые модификаторы, выделяющиеся в процессе структурообразования в отдельные эластичные фазы. В качестве модификатора (пластификатора) наиболее часто применяют продукт поликонденсации метакриловой кислоты, фталевого ангидрида и триэтиленгликоля (МГФ-9), а также дибутиловый эфир фталевой кислоты (дибутилфталат). Особенность их действия заключается в снижении внутренних остаточных напряжений, возникающих в эпоксидном композите в процессе полимеризации в связи с неравномерностью температур на различных участках массива композита и сохраняющихся после полного отверждения [42].

Широкое распространение в производстве машиностроительных плиточных материалов нашли эпоксиполиуретановые композиции, обладающие высокой демпфирующей способностью, прочностью, трещиностойкостью и т.д. Для производства полиуретанов широкое распространение получил способ ступенчатой полимеризации ди- или полиизоцианатов с соединениями, содержащими две и более гидроксильных групп (сложными или простыми полиэфирами).

Изменяя состав исходных компонентов, получают эластичные, полужесткие и жесткие пенополиуретаны [9]. Однако в машиностроительном производстве в основном используют жесткие полиуретаны:

- на основе простых полиэфиров (ППУ-305А, ППУ-306, ППУ-306Т, ППУ-307, ППУ-403Б и т.д.);
- сложных полиэфиров (ППУ-3, ППУ-3С, ППУ-9, ППУ-13, ППУ-14 и т.д.).

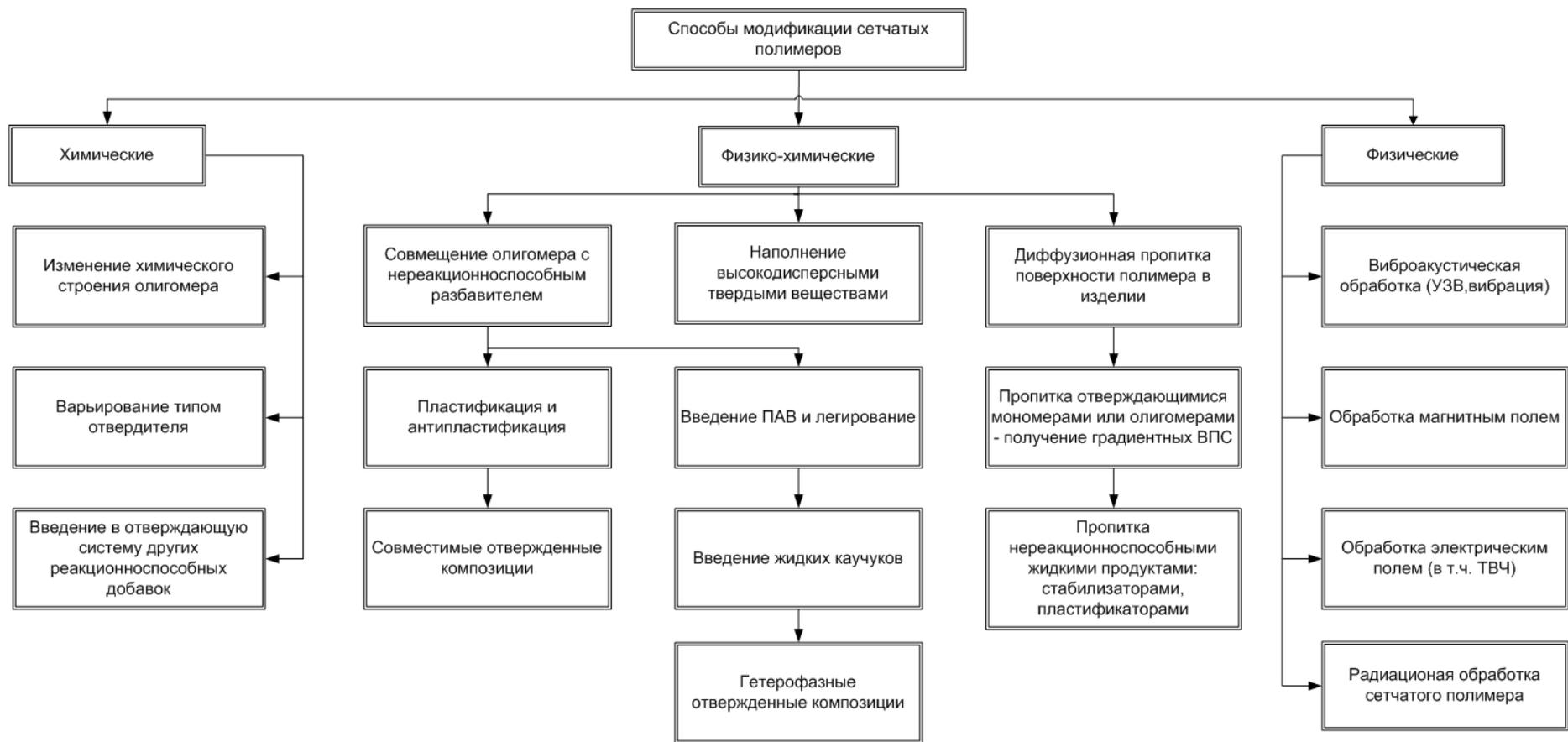


Рис. 1.1. Схема способов модификации сетчатых полимеров

Введение в полимерные КМ различных наполнителей приводит к изменению физико-механических свойств исходной полимерной матрицы. Для получения наполненных эпоксидных, полиэфирных и эпоксиполиуретановых композитов в качестве наполнителей применяют минеральные и органические порошки. Вид и качество дисперсного наполнителя, форма и размеры его частиц влияют на прочностные характеристики полимерных композитов [43-46]. По форме частицы наполнители бывают: волокнистые, чешуйчатые, пластинчатые, округлые и монокристаллические [47, 48]. По свойствам минералов их делят на слабоактивные и на наполнители, имеющие свободные валентности для связи с полимером. Наиболее эффективными наполнителями для получения машиностроительных композитов являются керамзит, маршалит, диабаз, аэросил, отходы шлифовального производства, сварочная пыль, гранитный порошок [46, 49, 50].

В отдельную группу полимерных материалов выделяют полимербетоны. Полимербетоны относятся к числу КМ на основе матрицы из полимерных связующих и традиционных заполнителей (кварцевый песок, щебень). Им присущи не только высокая прочность, химическая стойкость и долговечность, но и специфические свойства (диэлектрические, электропроводящие, демпфирующие) [51].

Существуют более тридцати видов тяжелых и легких полимербетонов. Наибольшее распространение получили бетоны на смолах ФАЭД (фураноэпоксидная смола), ФАМ (фурфуролацетоновая), ПН-1 (полиэфирная ненасыщенная смола) и ММА (метилметакрилат). Для ускорения отверждения и улучшения свойств полимерных связующих из синтетических смол применяют отвердители, пластификаторы и другие специальные добавки.

Наиболее часто для полимербетонов в качестве связующих используют терморезактивные смолы: фурановые, эпоксидные, полиэфирные. Полимербетоны в зависимости от варьирования концентрации полимерного связующего, модифицирующих добавок и наполнителя могут обладать высокой прочностью, химической стойкостью к большинству промышленных агрессивных сред или демпфирующей способностью.

К недостаткам полимербетонов следует отнести высокую ползучесть, а также старение, усиливающееся при действии попеременного нагревания и охлаждения, а также увлажнения. Поэтому их менее эффективно использовать по сравнению с полимерными КМ для производства опорных элементов станков (станин, направляющих, подрезцовых подложек и др.), подвергающихся постоянному нагреву или охлаждению.

Полимерные композиционные материалы используют для защиты конструкций от вредных влияний среды, в качестве футеровки для обеспечения защиты поверхностей от возможных механических или физических повреждений, для изготовления износостойких покрытий, а

также для снижения шума и вибрации в горно-металлургической, обрабатывающей и машиностроительной промышленности. Благодаря уникальному комплексу эксплуатационных свойств ПКМ нашли широкое применение в машиностроении при производстве защитных покрытий, стеклопластиков, фасонных изделий, футеровочных плит для защиты металлических конструкций от воздействия агрессивных сред и ударных нагрузок, элементов станочной системы (станин, направляющих, подрезцовых пластин и державок токарных резцов), а также для восстановления и усиления конструкций и омоноличивания сборных элементов [46, 52].

1.2. Методы оптимизации составов полимерных композиционных материалов

Полимерные композиты характеризуются многокомпонентностью, что определяет сложность выбора оптимальных составов для различных технических приложений. Это связано с тем, что для каждой смолы возможно применение различных отвердителей и модификаторов, которые в значительной степени определяют как технические характеристики получаемого материала, так и его стоимость. При этом использование различных наполнителей приводит к еще более сложной задаче определения оптимальных составов. Вследствие этого трудно осуществить повторяемость результатов определения оптимальных составов, что приводит к субъективному характеру выбора содержания многокомпонентной полимерной смеси. В этих условиях становится сложно прогнозировать характеристики получаемых композитных материалов с заданными свойствами. Использование метода прецедентов, при достаточно большой базе данных для различных ПКМ позволяет в некоторой степени формализовать процесс выбора параметров смеси. Однако этот путь решения является достаточно трудоемким, так как требует проведения множества экспериментов с различными смесевыми составами. Поэтому наиболее эффективным является прогнозирование свойств материала на основе математических моделей [53-58], описывающих физико-технические характеристики композитов.

Задачи оптимизации составов обычно сводятся к поиску экстремума целевой функции $f(c,x)$ (c – вектор весовых коэффициентов, x – вектор изменяемых параметров (свойства материала)). Наиболее важным является подбор весовых коэффициентов таким образом, чтобы максимум целевой функции приходился именно на точку с оптимальными свойствами. Здесь необходимо учитывать не только соотношение этих величин, но и допустимые пределы отклонения свойств.

При решении задач оптимизации важным этапом является выбор метода поиска экстремума. Неверный выбор метода приводит к

некоторому увеличению объёма вычислений, а неточность в выборе целевой функции полностью ставит под сомнение результаты вычислений. Целевая функция, экстремум которой определяется в процессе оптимизации и которая выражена в виде функции параметров объекта, задает критерии оптимальности.

При решении практических задач нередко приходится иметь дело с ситуациями, когда необходимо одновременно выполнение нескольких критериев, зачастую противоречивых. При производстве изделий в машиностроении из ПКМ необходимо обеспечение противоречивых физико-технических показателей (высокие значения предела прочности при одноосном сжатии, твердости и динамического модуля упругости; низкое значение массопоглощения, высокая коррозионная стойкость) при минимальной себестоимости полученного изделия.

Для решения данных задач используют методы многокритериальной оптимизации: линейная свертка, максиминная свертка, метод идеальной точки, решения оптимальные по Парето и по Слейтеру.

В методе линейной свертки задают весовые неотрицательные коэффициенты c_i , обозначающие степень важности каждого критерия, и максимизируется линейная комбинация целевых функций, то есть решается задача:

$$\begin{cases} F(x) = \sum_{i=1}^m c_i \cdot f_i(x) \rightarrow \max \\ x \in X \\ c_i \geq 0; i = \overline{1; m}; \sum_{i=1}^m c_i = 1 \end{cases}, \quad (1.1)$$

В методе максиминной свертки заранее задаются масштабирующие коэффициенты f_i^0 и решается задача максиминной оптимизации:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{\min_{i=1:n} f_i(x)}{f_i^0} \rightarrow \max \\ x \in X \end{cases}, \quad (1.2)$$

Коэффициенты f_i^0 здесь используются для приведения всех целевых функций к одному масштабу, либо наоборот, для выделения какого-либо из критериев. Основным недостатком этого подхода является вероятность потери гладкости полученной целевой функции.

В методе идеальной точки определяется множество возможных значений целевых функций многокритериальной задачи как множество, которое получают при всех допустимых значениях X :

$$Y = \{y \in R^m : y = f(x), x \in X\}, \quad (1.3)$$

Под идеальной точкой понимают значение функции f^* , состоящей из максимальных значений всех целевых функций, являющихся ее аргументами:

$$f^* = \left(\max_{x \in X} f_1(x); \max_{x \in X} f_2(x); \dots; \max_{x \in X} f_m(x) \right), \quad (1.4)$$

Основным исследуемым случаем является вариант, когда $f^* \notin Y$ (рис. 1.2). В противном случае имеется точка, в которой достигается максимум по всем критериям, она является оптимальной.

Решением задачи многокритериальной оптимизации (ЗМКО) является точка, вариант значений целевых функций в которой минимально по норме отличается от идеальной точки: $\left| (f(x) - f^*) \right| \rightarrow \min, x \in X$. Для определения расстояния можно использовать стандартную Евклидову, Чебышевскую или другой вид нормы.

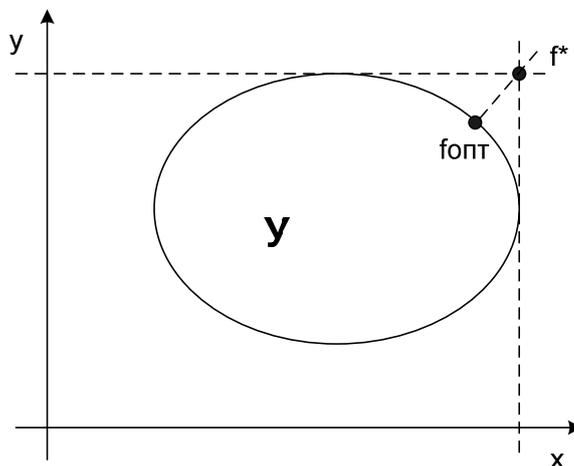


Рис. 1.2. Метод идеальной точки

Одним из распространенных методов решения ЗМКО является решение, оптимальное по Парето и по Слейтеру.

Решение $x \in X$ называется оптимальным по Парето, если не существует $y \in X$, что $f_i(y) \geq f_i(x)$, $i = \overline{1; m}$ и при этом хотя бы для одного i условие выполняется в строгой форме. Оптимальное решение по Парето означает, что нельзя улучшить решение хотя бы по одному критерию, не ухудшив его по остальным.

Решение $x \in X$ называется оптимальным по Слейтеру если не существует такого $y \in X$, что $i = \overline{1; m}$. Оптимальное по Слейтеру означает, что нельзя улучшить решение одновременно по всем критериям.

Понятие оптимальности по Слейтеру более широкое, чем оптимальное по Парето. Любая точка оптимальная по Парето, будет оптимальной

Слейтеру, но не наоборот. Однако и Парето оптимальные решения дают весь спектр оптимальных решений многокритериальной задачи.

Подставляя различные значения весовых коэффициентов c_i при решении ЗМКО методом линейной свертки получают Парето оптимальное решение. Парето оптимальное решение является решением задачи линейной свертки при некотором наборе весов. В этом смысле линейная свертка является самодостаточной.

В процессе производства КМ достаточно легко оценить стоимость компонентов, но стоимость технологического процесса изготовления композита зависит во многом от массогабаритных параметров изделия. Вследствие этого общая целевая функция представляет собой сумму трех целевых функций параметров объекта:

$$F(x) = c_1 \cdot f_1(x) + c_2 \cdot f_2(x) + c_3 \cdot f_3(x), \quad (1.5)$$

где $f_1(x)$ – функция, определяемая показателями физико-технических свойств композита;

$f_2(x)$ – функция, определяемая стоимостью компонентов композита;

$f_3(x)$ – функция, определяемая стоимостью технологического процесса изготовления КМ;

c_1, c_2, c_3 – весовые коэффициенты.

Технологический процесс изготовления композитов имеет свои определенные погрешности. Это приводит к тому, что реальные параметры отличаются от расчетных параметров. Поэтому в качестве функции отклика используют функцию, которая определяет минимальное значение функции $F(x)$ на некотором интервале варьирования параметров объекта:

$$F_{opt}(x) = \min_{\Delta x \in R} F(x + \Delta x), \quad (1.6)$$

где R – область варьирования параметров объекта, определяемая свойствами технологического процесса.

Реальные технологические процессы можно реализовать только с конечной точностью. Это связано с погрешностью систем дозирования и объемной неоднородностью смеси. При этом может оказаться, что целевая функция с ярко выраженным экстремумом дает оптимальный состав только в очень малой близости к точке экстремума, и при технологических отклонениях производства композитного материала его качество может катастрофически снизиться. Тогда возникает необходимость либо выбрать такой вид целевой функции, чтобы в окрестности экстремума функция была достаточно пологой, либо учитывать технологический разброс состава смеси в алгоритме поиска экстремума. Первый подход ограничивает выбор вида целевой функции, а второй усложняет процесс поиска экстремума.

Процесс оптимизации физико-технических свойств разбивают на два последовательных этапа. Такой подход позволяет уменьшить количество факторов, влияющих на качественные показатели КМ, которые следует учитывать при нахождении оптимальных составов.

На первом этапе оптимизируется матрица композита. Для выбранной пары «смола – отвердитель» находят экстремум функции $F(x)$ (x – массовое содержание отвердителя), а функция $F(x)$ является целевой, включающей в себя физико-технические показатели, являющиеся важными с точки зрения результирующей оценки свойств композита и выраженные через массовое содержание отвердителя x , стоимость компонентов и технологического процесса изготовления КМ. Весовые коэффициенты при этих параметрах определяются из специфики нагруженности деталей. При этом задача сводится к одномерной задаче поиска экстремума.

Для решения данной задачи применяют любые известные алгоритмы. Основным критерием выбора алгоритма является меньшее количество итераций с целью уменьшения количества экспериментов.

На втором этапе оптимизируется объемное содержание наполнителя в КМ. Выбирается соответствующий наполнитель, и определяется оптимальное содержание из условия максимума целевой функции $F(x)$ (x – объемное содержание наполнителя), в которую с различными весовыми коэффициентами входят характеристики физико-технологических свойств, стоимость компонентов КМ и технологического процесса. При таком подходе второй этап оптимизации так же сводится к одномерному поиску экстремума.

Таким образом, задача оптимизации физико-технических свойств КМ сводится к двум последовательным задачам одномерного поиска экстремума.

В тех случаях, когда ограничения на вид целевой функции нежелательны, то, возможно, учитывать технологические погрешности на этапе поиска экстремума. Для этого определяют вектор допустимых технологических отклонений состава Δ . В этом случае процесс оптимизации несколько усложняется и сводится к решению задачи:

$$x \cdot = \arg \min \{ \max \{ F(x, \Delta) : \Delta \in W \} : x \in X \}, \quad (1.7)$$

где x – область изменения состава;

W – область технологических погрешностей.

При этом деление на два этапа оптимизации становится не корректным. В этом случае задача сводится к ЗМКО.

Важной частью задачи поиска экстремума является на практике ограничение поиска некоторой определенной областью. Это выполняется несколькими способами и имеется много возможных комбинаций методов поиска экстремума и методов ограничения поиска. При этом не все

эффективные методы поиска экстремума совместимы с некоторыми методами наложения ограничений.

Сравнение эффективности различных методов связано с некоторыми трудностями. Некоторые алгоритмы дают решение за меньшее количество итераций, но требуют больших знаний о поведении целевой функции, либо выполнения дополнительных промежуточных расчетов.

Максимизация функции одной переменной имеет самостоятельный процесс и является важным элементом различных процедур максимизации функций нескольких переменных. От правильной организации одномерного поиска существенно зависит успех решения задачи оптимизации.

Пусть $f(x)$ – функция, определённая на отрезке $[a, b]$. Функцию $f(x)$ называют унимодальной, если существует единственная точка x^* , в которой $f(x)$ принимает экстремальное значение. Унимодальная функция не должна быть гладкой или даже непрерывной. Из определения унимодальности следует, что если $x_1 < x_2 \leq x^*$, то $f(x_1) > f(x_2)$. Аналогично, если $x \leq x_1 < x_2$, то $f(x_1) < f(x_2)$. Задача поиска экстремума функции $f(x)$ состоит в построении такой последовательности нахождения $\{x_k\}$, чтобы минимальное значение функции достигалось в интервале $x_{i-1} \leq x^* \leq x_i$. Такой интервал называется интервалом неопределённости.

Алгоритм выбора абсцисс $\{x_k\}$ называется стратегией поиска. При заданном количестве вычислений функции оптимальной стратегией является та, которая ведёт к наименьшему интервалу неопределённости. Наиболее оптимальной стратегией является стратегия Фибоначчи, тесно связанная с числами Фибоначчи.

Для решения задачи одномерной минимизации также используют метод золотого сечения. При достаточно большом количестве вычислений функции окончательный интервал в методе золотого сечения лишь на 17% больше, чем в методе Фибоначчи, однако организация вычислительного процесса значительно проще. Золотым сечением отрезка называют деление отрезка на две части так, что отношение длины всего отрезка к длине большей части равно отношению длины большей части к меньшей части.

Метод относится к последовательным стратегиям. Задается начальный интервал неопределенности и требуемая точность. Алгоритм уменьшения интервала опирается на анализ значений функции в двух точках. В качестве точек вычисления функции выбираются точки золотого сечения. Тогда с учетом свойств золотого сечения на каждой итерации, кроме первой, требуется только одно новое вычисление функции. Условия окончания процесса поиска стандартные: поиск заканчивается, когда длина текущего интервала неопределенности оказывается меньше установленной величины.

1.3. Композиционные материалы для футеровочных плит и фитингов

Защита технологического оборудования, эксплуатируемого в опасной производственной среде, является одной из важнейших научно-технических и экономических проблем мирового хозяйства.

Существуют следующие методы борьбы с коррозией: выбор соответствующего среде коррозионностойкого сплава; изменение состава среды (понижение агрессивности или приведение среды в некое стабильное состояние); отделение металла (бетона) от агрессивной среды слоем более стойкого материала (лакокрасочного композиционного материала, футеровка, гуммирование и т.п.); применение новых конструктивных решений, включая новые материалы, органического и неорганического происхождения [16, 35].

Метод футеровки применяется для защиты от особо агрессивных сред. В современном машиностроении широко используются футеровочные плиты из ПКМ, так как они обладают высокими физико-механическими и технологическими свойствами.

Футеровочные плиты из ПКМ, применяемые в машиностроении, в процессе своей эксплуатации испытывают различные внешние нагрузки (статические, динамические, ударные), а также действие агрессивных сред (вода, смазочно-охлаждающая жидкость, кислые и щелочные среды), снижающих их физико-механические свойства и приводящих к преждевременному выходу из строя готовых изделий [17, 46].

Футеровочные плиты из полиэтилена устойчивы к воздействию кислот, щелочей и растворов солей, неустойчивы в окисленных средах. Нерастворимы при комнатной температуре в растворителях, однако при повышении температуры до 70-80 °С растворимы во многих углеводородах. Под действием кислорода при повышенных температурах и под действием света полиэтилен стареет, становясь хрупким и теряя эластичность. Плиты из полиэтилена технологичны: возможна механическая обработка и сварка.

Футеровочные плиты из полипропилена более прочны, чем полиэтилен, обладают стойкостью к кислотам, органическим растворителям, минеральным маслам. Не устойчивы в олеуме, хлорсульфированной кислоте, дымящейся азотной кислоте, бромной воде. Плиты из полипропилена технологичны: возможна механическая обработка и сварка.

Футеровочные плиты из поливинилхлорида (винипласта) стойкие в минеральных кислотах (за исключением азотной кислоты и олеума), щелочах, растворах солей и органических растворителях. Недостатками поливинилхлорида являются низкий предел рабочей температуры, малая ударная вязкость, большой коэффициент линейного термического

расширения, постепенная деформация под нагрузкой. Винипластовые плиты легко свариваются.

Футеровочные плиты из фторопласта обладают высокой химической стойкостью к кислотам, щелочам, окислителям, растворителям и не стойки к расплавам щелочных металлов и фтору. Важным свойством фторопластовых плит является их термостойкость, которая позволяет им не изменять свои свойства в интервале температур от $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Недостатками фторопласта является низкая адгезия к металлическим и неметаллическим конструкциям, трудносвариваемость.

Футеровочные плиты из стеклопластиков, получаемые на основе связующих органических смол, стекловолоконистых наполнителей и других добавок. Характеризуются хорошей химической стойкостью в кислотах, щелочах, электролитах, маслах, жидких топливах, газообразных средах и т.д.

Стеклопластики имеют высокие физико-механические свойства (предел прочности при одноосном сжатии, твердость, динамический модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, ударную вязкость), а также обладают хорошей адгезией к металлам, бетону и дереву. Стеклопластиковые футеровочные плиты нетехнологичны, в связи с повышенным износом режущего инструмента при механической обработке резанием.

Резиновые футеровки обладают большим сроком службы, малым весом, высокой плотностью прилегания, простотой установки и демонтажа без применения специальных газо-резательных работ, минимальной опасностью травматизма при проведении монтажных и демонтажных работ, эффективно поглощают шум (до 50%) и вибрацию. Недостатками резиновых материалов являются: невысокая бензо- и маслостойкость, относительно низкая тепло- и морозостойкость, склонность к старению под воздействием тепла, кислорода воздуха и света. Кроме того, являясь продуктом вулканизации (химического взаимодействия каучука с серой), резина содержит свободную серу, а последняя с течением времени выделяется и вызывает коррозию металлов, контактирующих с резиной.

Полиуретаны используют в качестве футеровок и защитных антикоррозионных покрытий для стальных металлоконструкций, бетонных строений, морской техники, портовых сооружений, в автомобилестроении, горнорудной, нефтегазодобывающей промышленности работающих в неблагоприятных атмосферных и агрессивных средах (морской и пресной воде; в водных растворах солей, кислот и щелочей; в сырой нефти, бензине и масле) [34].

Полиуретановая футеровка устойчива к ультрафиолетовому излучению, имеет высокое сопротивление раздиру и усталостную прочность, достаточную прочность при растяжении и удлинении при разрыве,

сопротивление истиранию, высокую упругость при относительно высоких показателях твердости. Недостатками полиуретановой футеровки являются: невысокая механическая прочность, низкие диэлектрические свойства и значительная зависимость физико-механических и технологических свойств от температуры при нагреве выше 80 °С, а также высокие требования к качеству заточки режущего инструмента и его невысокая стойкость.

В связи с развитием современного машиностроительного производства, увеличением номенклатуры производимых материалов и изделий появилась необходимость в получении высокотехнологичных футеровочных плит из ПКМ. Рассмотренные выше виды футеровочные плиты не всегда удовлетворяют требованиям: повышенным физико-механическим свойствам; низким массопоглощением; высокой химической стойкостью к различным агрессивным средам (вода, бензин, масло, смазочно-охлаждающая жидкость); низкой стоимостью.

В этой связи, для получения футеровочных плит, удовлетворяющих заданным требованиям, используют материалы на основе эпоксидных (ТУ 6-05-958-78) и полиэфирных (ТУ 6-11-96-84) связующих с различными дисперсными и волокнистыми наполнителями.

Эпоксидные дисперсно-наполненные КМ получили широкое распространение при производстве элементов фитинговых систем (концевые муфты, сгоны, тройники и т.п.).

Эпоксидные концевые муфты предназначены для оконцевания силовых трехжильных кабелей напряжением 1, 6 и 10 кВ, и для выполнения ответвлений кабелей, рассчитанных на напряжение только до 1 кВ. Соединительные кабельные муфты служат для герметизации участков соединений и защиты их от механических воздействий. Соединительные эпоксидные (СЭ) муфты имеют конструктивное исполнение: с корпусом из двух частей и поперечным разъемом его в средней части (СЭп), провод заземления располагается вне муфты; с корпусом из двух частей и продольным разъемом его в вертикальной плоскости (СЭв), провод заземления располагается в специальном пазу в нижней части корпуса; с корпусом, имеющим экран из листовой стали и два конуса с припаянными к ним манжетами из свинца (СЭм), один конус соединяется с цилиндрической частью муфты на заводе, а другой – на месте монтажа; эпоксидным корпусом, образующимся на участке соединения кабелей после отверждения компаунда, залитого в съемную металлическую форму (СЭс). Для соединения кабелей на напряжения 6 и 10 кВ применяются эпоксидные муфты СЭп, СЭв и СЭм, а для кабелей на напряжение до 1 кВ муфты СЭс.

Данные муфты используются внутри сухих, влажных и сырых помещений при температуре окружающей среды от +50 до -50°С, с

относительной влажностью до 75%, в помещениях с проводящей пылью (при условии периодической чистки), с химически активной средой (кроме взрывоопасных), в пожароопасных помещениях. Срок эксплуатации данных изделий не менее 30 лет.

1.4. Механическая обработка полимерных композиционных материалов осевыми инструментами

В настоящее время существующие методы изготовления заготовок и деталей из полимерных КМ в машиностроении методом прямого пресования, литья под давлением не дают возможности получения точных размеров деталей вследствие усадки материала, наличия технологических уклонов, смещения элементов штампа. В этой связи в соответствии с современными тенденциями развития машиностроительного производства изделий и деталей из КМ эффективным представляется их изготовление механической обработкой [61].

Методы обработки большей частью зависят от используемого оборудования и инструмента. Однако режущих инструментов, оборудования и технологических методов, специально предназначенных для механической обработки ПКМ очень мало. В основном используется инструмент, сконструированный для обработки металла и дерева. Этим обусловлены трудности эффективной обработки резанием ПКМ, усугубляемые многообразием видов и недостаточностью представлений о присущих им свойствах, характеризующих их обрабатываемость [62].

Так, при детальном изучении обработанных резанием поверхностей ПКМ они часто оказываются шероховатыми и покрытыми трещинами и рисками (следами режущего инструмента). Также обнаруживается, что чрезмерное тепло трения, развивающееся в результате механической обработки, вызывает прижоги на поверхности реактопластов, так как концентрация температур в инструменте приводит к возникновению значительных температур (до 500⁰С) на его режущих кромках и в объеме режущего клина. В результате чего возникает необходимость дополнительной отделочной обработки деталей, что увеличивает трудоемкость изготовления деталей из КМ [63].

В процессе производства и применения полимерных изделий используют механическую обработку: фрезерование, сверление, развертывание, нарезание резьбы, шлифование, зачистку поверхности. Фрезерование и сверление деталей из КМ являются наиболее распространенными операциями, применяемыми при обработке плоских и фасонных поверхностей, пазов, уступов, фасок, выполнения технологических отверстий.

Фрезерование применяют для прорезки пазов, вырезки окон, лючков, для получения различного рода канавок и уступов, а также для получения

изделий заданных габаритных размеров. Операция фрезерования выполняется с использованием концевых, дисковых, шпоночных фрез и значительно реже – торцевых и цилиндрических. При этом требования к точности фрезерования 11-13 квалитетов, к шероховатости поверхности $R_a \geq 6,3$ мкм (R_a – средняя величина микронеровностей поверхностей). Для фрезерования изделий из ПКМ используют быстроходные горизонтально- и вертикально-фрезерные металлообрабатывающие станки, оснащенные специальными устройствами для улавливания и отсоса стружки и пыли, а также зажимными устройствами и приспособлениями.

В зависимости от требований, предъявляемых к точности обрабатываемой поверхности, сверление может быть промежуточной, предварительной или окончательной операцией. Как предварительная операция сверление производится перед зенкерованием, развертыванием, растачиванием, как окончательная – при получении глухих и открытых отверстий для штифто-болтовых соединений изделий из ПКМ с элементами конструкций. В качестве режущих инструментов для обработки отверстий применяют: перовые, спиральные быстрорежущие сверла; сверла, оснащенные пластинками твердых сплавов. В качестве оборудования используют сверлильные станки, предназначенные для обработки металлов, а также специальные полуавтоматические станки. Основные требования к отверстиям: точность в пределах 10-13 квалитетов, параметр шероховатости поверхности $R_a \geq 3,2-8$ мкм.

Производительность и качество изготовления деталей из ПКМ зависит от рационального проведения процессов обработки резанием, которые достигаются в том случае, если:

- 1) режущая часть инструмента имеет оптимальные геометрические параметры и качественную заточку лезвий;
- 2) обработка заготовок ведется с техническими и экономическими обоснованными подачами и скоростями резания;
- 3) кинематические и динамические возможности механизмов коробки подач и скоростей станка позволяют реализовать обоснованные значения подачи и скорости резания.

Под термином режимы резания понимается совокупность числовых значений глубины резания (t), подачи (S), скорости резания (V), геометрических параметров и стойкости режущей части инструментов (T), а также силы резания, мощности и других параметров рабочего процесса резания, от которых зависят его технико-экономические показатели.

Попытки применения закономерностей и рекомендаций стандартов по резанию металлов для обработки осевыми инструментами ПКМ не имели успеха, так как композитные материалы имеют специфические свойства, обуславливающие особенности их механической обработки. Процесс резания ПКМ целесообразно рассматривать как самостоятельный

имеющий определенные закономерности и специфику. Сравнение закономерностей процесса резания ПКМ и металлов необходимо для того, чтобы учесть их различия при обработке композитных материалов на металлорежущих станках, с использованием металлорежущего инструмента [62].

Изучение стружек, образуемых в процессе обработки ПКМ, позволяет судить о различных явлениях, происходящих в зоне резания (уровне деформации, температуры), а также о качестве обработанных поверхностей [63].

При резании ПКМ происходит образование раздробленной, прерывистой стружки с трещинами вокруг вершины режущего клина. При механической обработке ПКМ стружка образуется вследствие преодоления упругих деформаций, а упруго сжатый во время обработки материал после прохождения режущего лезвия упруго восстанавливается. Упругое последствие для соответствующих материалов и режимов резания будет различно, но значительно выше, чем при обработке сталей. В большинстве случаев упругое последствие приводит к возникновению за режущим лезвием инструмента напряжений, которые могут превышать временное сопротивление обрабатываемых ПКМ и вызывать появление разрывов и трещин на обработанной поверхности [63].

Большое влияние на процесс стружкообразования оказывает износ инструмента. Увеличенный износ приводит к образованию раздробленной, «мятой» стружки с выделением большого количества пыли и газов. Качество обработанной поверхности и точность размеров деталей ухудшаются.

В процессе механической обработки ПКМ на режущий клин осевого инструмента действуют силы, приложенные к передним и задним его поверхностям (рис.1.3). Однако соотношение этих сил иное, чем при обработке металлов. Вследствие упруго последствия силы, действующие по задним поверхностям инструмента, превосходят силы, действующие по его передним поверхностям.

Так как ПКМ обладают более низкими механическими свойствами по сравнению с металлами, силы резания при их обработке значительно меньше, а соотношение P_x , P_y и P_z иное. При осевой обработке ПКМ ($P_x=0$) сила P_z в 10-15 раз меньше, чем при резании металлов, а сила P_y составляет 85...95 % от силы P_z [81]. При резании КМ наблюдается большое колебание абсолютных значений сил, связанное с прерывистым характером процесса стружкообразования.

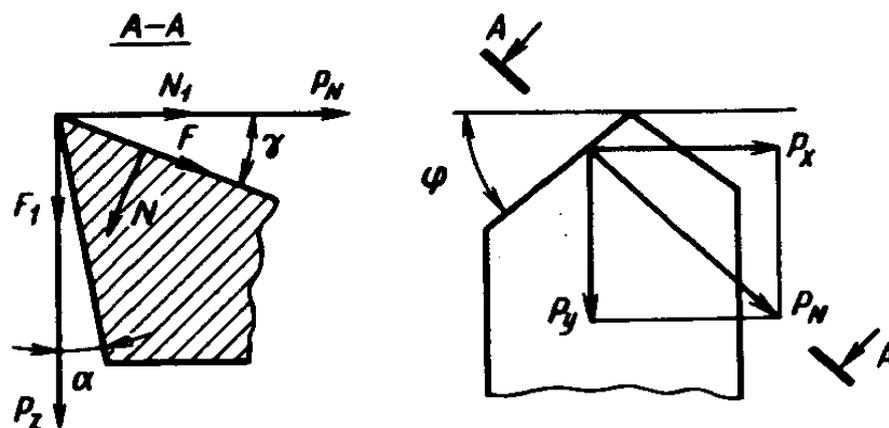


Рис.1.3. Силы, действующие на режущий клин инструмента

Наибольшее влияние на P_x, P_y, P_z оказывает передний угол инструмента γ . Для различных типов ПКМ имеется такое свое значение γ , при котором $P_y = 0$ – критический передний угол (γ_k). При использовании инструмента с γ_k получают высокое качество обрабатываемых поверхностей, так как направление равнодействующей силы совпадает с направлением резания. Однако значение γ_k непостоянно и зависит от подачи и глубины резания. Увеличение заднего угла (α) также приводит к уменьшению сил резания.

Изменение скорости резания в широком диапазоне незначительно влияет на изменение абсолютных значений сил, но изменяет частоту и амплитуду колебания. С увеличением глубины и подачи силы резания возрастают, особенно заметно с ростом износа инструмента, происходящим в основном в результате увеличения сил, действующих на задних поверхностях. При увеличении изнашивания осевого инструмента наблюдается наиболее интенсивный рост P_y . Рост силы P_y приводит к отжатию заготовки в процессе резания, нарушению геометрической формы и точности ее размеров [81].

Общей закономерностью и особенностью процесса резания ПКМ является большое количество теплоты, уходящей в инструмент, связанное с низкой теплопроводностью КМ и стружки надлома, возникающей при механической обработке. Основная часть теплоты переходит в режущий клин со стороны задних поверхностей, испытывающих действие больших сил. Концентрация теплоты в инструменте приводит к возникновению значительных температур на режущих кромках и в объеме режущего клина. Вследствие высокой температуры происходит образование прижогов, дефектов на обработанной поверхности, и ее деструкция.

Увеличение износа инструмента вызывает интенсивный рост

температуры. При этом в определенном интервале температур наблюдается увеличение шероховатости обработанной поверхности, ее оплавление, появление прижогов, выделение газов, которые являются визуальными признаками затупления инструмента [62].

При резании машиностроительных ПКМ изнашивание инструментов независимо от вида обработки, геометрических параметров инструментов и режимов резания происходит по задним поверхностям. Силы, приложенные к передней поверхности инструмента, малы из-за низкой твердости КМ и малого истирания. В то же время вследствие повышенной упругости ПКМ силы и температура, действующие со стороны задних поверхностей лезвий, значительны. При обработке ПКМ износ инструмента по передней поверхности отсутствует, а по задней имеет равномерный монотонный характер, что исключают катастрофический период изнашивания, характерный для резания металлов [63].

Физическая природа изнашивания инструментов, несмотря на одинаковую внешнюю картину его протекания, различна и зависит от марки инструментального материала, режимов механической обработки. При резании ПКМ происходит абразивно-механический и термомеханический износ.

Инструменты из быстрорежущих сталей, твердых сплавов при низких скоростях резания изнашиваются в результате абразивного изнашивания и хрупкого выкрашивания, т.е. в результате абразивно-механического изнашивания.

Термомеханическое изнашивание инструментов происходит при высоких скоростях резания, больших значениях подач и глубин резания, вследствие роста температуры в зоне резания [62].

Так как у осевых инструментов, используемых при обработке ПКМ, отсутствует период катастрофического изнашивания, то износ лимитируется технологическим критерием затупления. Он соответствует износу инструмента, при котором отклонения от геометрической формы и качественные характеристики обработанных поверхностей становятся выше допустимых техническими требованиями к детали.

Особенности, характерные для механической обработки осевыми инструментами ПКМ:

- склонность к скалыванию в процессе резания, что приводит к выкрашиванию поверхностей заготовок на входе и выходе инструмента и увеличению шероховатости поверхности. Поэтому режущий клин инструмента должен иметь большие передние и задние углы, а износ по задней грани не должен превышать 0,5 мм при черновой обработке и 0,2...0,3 мм при чистовой. Увеличение износа способствует возрастанию шероховатости обработанной поверхности;

- трудности достижения низкой шероховатости обработанной поверхности

вследствие неоднородности строения ПКМ и различной твердости ее составных частей. В силу этого износ инструмента, применяемого для обработки композитного материала, лимитируется технологическим критерием затупления, и прежде всего увеличением шероховатости обработанной поверхности;

- сильное абразивное воздействие на инструмент;
- пониженная теплопроводность ПКМ, обуславливающая плохой теплоотвод из зоны резания, следовательно, и резкий нагрев лезвий режущих инструментов, а также оплавление, задиры и разрушение обработанной поверхности;
- интенсивное пылеобразование и выделение вредных газов, что требует применение отсасывающих устройств;
- трудность применения СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость) из-за гигроскопичности ПКМ и образования пасты из пыли и СОЖ, которая налипает на поверхности деталей станка, вызывая их коррозию, попадает на инструмент, затрудняя обработку;
- сложность достижения высокой точности деталей из-за их большого упругого прогиба, повышенного коэффициента линейного расширения ПКМ, интенсивного изнашивания инструмента.

Таким образом, из анализа существующих методов изготовления заготовок и деталей из полимерных КМ, выявлена эффективность использования механической обработки для производства машиностроительных изделий и деталей из композитных материалов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Исследуемые материалы

Для исследований полимерных композитов были подготовлены серии образцов, последовательность изготовления которых заключалась в следующем:

1) КМ на основе эпоксидной смолы.

При постоянном перемешивании к эпоксидной смоле ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) вводили пластификатор дибутилфталат (ДБФ) (ГОСТ 8728-88) и постепенно загружали необходимое количество наполнителя. После 10-15 минут перемешивания вводился отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА) ТУ 2413-357-00203447-99.

2) КМ на основе полиэфирной смолы.

При постоянном перемешивании к полиэфирной смоле 540-М 888 постепенно загружали необходимое количество наполнителя. После 10-15 минут перемешивания вводился отвердитель пероксид №1.

3) Эпоксидный КМ модифицированный полиизоцианатом и полиэфирной смолой (эпоксиполиуретан).

Эпоксидную смолу ЭД-20 модифицировали комплексной добавкой, состоящей из простого полиэфира (компонент Сарэл А-04) и полиизоцианата (компонент Сарэл Б-04).

Для приготовления модифицированной полимерной смеси подготавливали два различных по составу раствора.

Первый состоял из эпоксидной смолы и простого полиэфира (10 мас. ч. на 100 мас. ч. ЭД-20), который подвергался термической обработке при температуре $t = 120^\circ \text{C}$ в течение 90 минут. Во второй состав входили следующие компоненты: полиизоцианат (10 мас.ч. на 100 мас.ч. ЭД-20) и полиэтиленполиамин (11 мас.ч. на 100 мас.ч. ЭД-20). Затем полученные растворы перемешивали.

Приготовленные смеси укладывали в формы и в течение 24 часов отверждали при комнатной температуре, выдерживали в нормальных условиях 28 суток и подвергали испытаниям.

В качестве наполнителей использовали диабаз ($\rho_{\text{и}}=2900 \text{ кг/м}^3$, $S_{\text{yo}} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), маршалит ($\rho_{\text{и}}=2650 \text{ кг/м}^3$, $S_{\text{yo}} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), цемент ($\rho_{\text{и}}=3100 \text{ кг/м}^3$, $S_{\text{yo}} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), аэросил ($S_{\text{yo}} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$), гранитный порошок ($\rho_{\text{и}}=2650 \text{ кг/м}^3$, $S_{\text{yo}} = 150 \text{ м}^2/\text{кг}$) и полиамидное волокно ($d_f = 15 \text{ мкм}$, $l = 6 \text{ мм}$). Состав образцов и основные характеристики ЭД-20, ДБФ, ПЭПА, 540-М 888, пероксида №1, полиизоцианата и наполнителей приведены в табл. 2.1-2.12 и прил. 1.

Эпоксидная смола представляет собой вязкую жидкость плотностью 1150-1210 кг/м³ от светло-желтого до коричневого цвета, хорошо растворимую в ацетоне, толуоле, бензоле, этилацетате и других органических растворителях и является олигомером линейного строения [64].

Т а б л и ц а 2.1

Основные характеристики эпоксидной смолы ЭД-20

Показатели	Нормы
Цвет по железокобальтовой шкале, не более	12
Содержание эпоксидных групп, %	19,9-22,0
Динамическая вязкость при 25 °С, (Па·с) ·11 ⁻¹	120-250
Содержание (%) общего хлора не более	0,9
Содержание летучих веществ не более	0,9
Время желатинизации, часов не менее	4
Плотность, кг/м ³	1166
Молекулярная масса	390-430

В качестве отвердителя использовали полиэтиленполиамин (ПЭПА), который представляет собой смесь этилендиамина, диэтилентриамин, триэтилтетраамин и других, более сложных соединений. Основные характеристики полиэтиленполиамины приведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Основные характеристики полиэтиленполиамины

Показатели	Нормы
Массовая доля общего азота, %	31,5
Наличие хлор – иона	отсутствует
Массовая доля минеральных примесей, %	0,03
Массовая доля третичных аминогрупп, %	8,4
Массовая доля фракции, отгоняемой при остаточном давлении 1,3 кПа в пределах от 75 °С до 200 °С, %	31,7
Массовая доля кубового остатка, кипящего свыше 200 °С, %	67
Массовая доля воды, %	1,6
Массовая доля азота, третируемого кислотой, %	20,9
Отверждающая способность, мин	69

Дибутилфталат $C_6H_4(COOC_4H_9)_2$ – дибутиловый эфир фталевой кислоты. Бесцветная маслянистая жидкость, $t_{кип} = 340$ °С (с разложением) (206 °С при 11 мм рт. ст.), хорошо растворим в органических растворителях (этаноле, бензоле, ацетоне), малорастворим в воде (~0,1% при 20 °С). Малотоксичен [64]. Основные характеристики дибутилфталата приведены в табл. 2.3.

Ортофталевая полиэфирная смола 540-М 888 представляет собой вязкую жидкость плотностью 1110-1130 кг/м³ от светло – желтого до темно – коричневого цвета, средней реакционной способности, содержащей специальные добавки, значительно снижающие показатели испарения стирола (см. табл. 2.4). Смола 540-М 888 является тиксотропной и содержит ускоритель, который обеспечивает относительно долгий период желатинизации и быстрый процесс отверждения в сочетании с относительно низкой экзотермической температурой [65].

Т а б л и ц а 2.3

Основные характеристики дибутилфталата

Показатели	Нормы
Молекулярная масса	278
Температура плавления, °С	-35
Температура кипения, °С	148
Температура вспышки, °С	340
Температура самовоспламенения, °С	390
Плотность, кг/м ³	1150

Т а б л и ц а 2.4

Основные характеристики полиэфирной смолы 540-М 888

Показатели	Нормы
Динамическая вязкость при 25 °С, (Па·с)·11 ⁻¹	180-200
Кислотное число, мгКОН/г	17
Температура вспышки, °С	34
Содержание стирола (% веса)	43
Время желатинизации, часов не менее	0,75
Плотность, кг/м ³	1110

В качестве отвердителя использовали пероксид №1, который представляет собой раствор перекиси метилэтилкетона в диметилфталате, обладающий средней реакционной способностью [66]. Основные характеристики пероксида №1 приведены в табл. 2.5.

Т а б л и ц а 2.5

Основные характеристики пероксида №1

Показатели	Нормы
Содержание перекиси, %	45
Содержание активного кислорода, %	9,1
Массовая доля воды, %	2
Температура вспышки, °С	70
Удельный вес при 23 °С	1,15-1,17
Цвет	Бесцветный
Вязкость при 23 °С, мПа	15-18
Кислотность (рН)	4-6

Компонент Сарэл А-04 является гидроксилсодержащим компонентом, создающим при реакции с компонентом Сарэл Б-04 полимерную основу пенополиуретана и представляет собой светлую жидкость, состоящую из смеси нескольких химических соединений, таких как полиэферы, эмульгаторы, вспенивающие и сшивающие агенты. Компонент «А-04» малотоксичен, невзрывоопасен. При хранении компонент «А-04» имеет тенденцию к расслаиванию, и поэтому перед использованием его необходимо тщательно перемешать путем перекачивания и опрокидывания бочки в течение 5-11 мин.

Компонентом Сарэл Б-04 является полиизоцианатом марки Б высшего сорта и представляет собой смесь 50-60% диизоцианата и полиизоцианата не менее 30%. Компонент Б-04 – темная жидкость со специфическим запахом. Токсичен, предельно допустимая концентрация его паров в воздухе производственных помещений составляет 0,2 мг/куб.м, температура вспышки 175 °С, воспламенения 215 °С. Компонент Б-04 легко реагирует с атмосферной влагой и водой, при этом образуется осадок твердого полимерного материала. Основные характеристики компонентов Сарэл А-04 и Б-04 приведены в табл. 2.6.

Т а б л и ц а 2.6

Основные характеристики компонентов Сарэл А-04 и Б-04

	Сарэл А-04	Сарэл Б-04
Плотность, кг/м ³ (25 °С)	1100	1240
Вязкость мПа (25 °С)	370	200

Аэросил – чистая двуокись кремния (SiO₂), полученная гидролизом паров четырехпористого кремния в пламени водорода при 1110-1400 °С. Это рыхлый голубовато-белый порошок, в уплотненном виде белая масса. Применяется как высококачественный наполнитель, загуститель. Аэросил – непористый малогидратированный продукт, с однородными по размерам частицами (5-40 нм), имеющими округлую форму, группирующимися в цепочки, хлопья. В опытах применяли аэросил марки А-300 (ГОСТ 14922-77). При введении аэросила [66] в материал увеличивается стабильность их размеров, стойкость к растрескиванию, жесткость. Физико-механические свойства аэросила марки А 300 приведены в табл. 2.7.

Т а б л и ц а 2.7

Физико-механические свойства аэросила марки А-300

Показатели	Нормы
Удельная поверхность, м ² /кг	300±0,3
Плотность набивки, кг/ м ³	50
Потери при сушке, 2 часа при 115 °С, %	<1,5
РН	3,7-4,7
Остаток на сите по Моккеру, 45 мкм, %	<0,05

Диабаз [67] представляет породу основного состава, с массивной текстурой, мелкосреднезернистой структурой, без каверн и неоднородностей, равномерно окрашенную в черный цвет. По радиационно-гигиеническим свойствам порода характеризуется как материал 1 класса, с параметрами ниже фоновых значений. Диабаз используется для производства блочного дорожного камня (мостовая брусчатка, мозаичная шашка, поребрики), для производства ритуальных изделий, в прецизионном машиностроении, а также в строительстве как цокольный камень, частью на бут и щебень. Физико-механические свойства диабаза приведены в табл. 2.8.

Т а б л и ц а 2.8

Физико-механические свойства диабазы

Показатели	Нормы
Истинная плотность, кг/м ³	2900
Удельная поверхность, м ² /кг	165
Водопоглощение, %	0,19
Пористость, %	0,68
Истираемость, кг/м ²	1,2
Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	375
Марка морозостойкости F	110
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	36,16
Ударная вязкость, кДж/м ²	1,75
Модуль упругости при сжатии, МПа	91550
Коэффициент линейного расширения при 20-110 °С, 11 ⁻⁶ С ⁻¹	6,84

Маршалит – пылевидный кварц представляет тонкодисперсную массу чистого белого цвета, получаемую из природных ископаемых или путем размолва кварцевого песка. Кварц – минерал, одна из кристаллических разновидностей кремнезема (SiO₂). Природным кварцем является горный хрусталь, кварцит, кварцевый песок и др. Кварц молотый пылевидный (ГОСТ 9077-59) выпускается с содержанием кремнезема не менее 98 %, Fe < 0,25; Fe₂O₃ < 0,15; Al₂O₃ < 1; CaO < 0,15 и влаги не более 2 %. Также обладает пьезоэлектрическими свойствами, не растворим в воде и кислотах, менее устойчив к щелочам. Нечувствителен к резким сменам температур, в зависимости от содержания примесей и гранулометрического состава выпускают двух марок: А и Б. При проведении опытов использовали маршалит марки Б. Физико-механические свойства маршалита приведены в табл. 2.9.

Т а б л и ц а 2.9

Физико-механические свойства маршалита

Показатели	Нормы
Истинная плотность, кг/см ³	2650
Удельная поверхность, м ² /кг	254
Твердость по Маосу	7
Температура плавления, °С	1700
Температура испарения, °С	2110

Портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, в составе которого преобладают силикаты кальция (70-80 %). Портландцемент – продукт тонкого измельчения клинкера с добавкой гипса (3-5 %). Клинкер представляет собой зернистый материал, полученный обжигом до спекания (при 1450 °С) сырьевой смеси, состоящей в основном из углекислого кальция (известняки различного вида) и алюмосиликатов (глины, мергеля, доменного шлака и др.). Небольшая добавка гипса регулирует сроки схватывания портландцемента. При проведении опытов использовали портландцемент марки ПЦ 400 ДФ (ГОСТ 11178-85), физико-механические свойства которого приведены в табл. 2.10.

Т а б л и ц а 2.10

Физико-механические свойства ПЦ 400 ДФ

Показатели	Нормы
Удельная поверхность, м ² /кг	250-300
Истинная плотность, кг/м ³	3050-3150
Насыпная плотность, кг/м ³	1600

Гранитный порошок – это мелкодисперсная фракция гранита, характеризующаяся шероховатой фактурой и средней сцепляемостью с полимером, стойка к стиранию, царапинам. Гранит – полнокристаллическая, равномернозернистая или порфириовидная горная порода, состоящая из кварца, полевого шпата и темноцветных минералов и обладающая высокой твердостью. Гранит используется в качестве декоративного облицовочного материала, как заполнитель для бетонов, в виде кислотоупорной облицовки. В работе использовали гранитный порошок войновского месторождения, физико-механические свойства которого приведены в табл. 2.11.

Т а б л и ц а 2.11

Физико-механические свойства гранитного порошка

Показатели	Нормы
Истинная плотность, кг/м ³	2650
Удельная поверхность, м ² /кг	150
Прочность при одноосном сжатии, МПа	93
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	17
Истираемость, кг/м ²	4,4
Водопоглощение, %	0,27

Полиамидное волокно – синтетическое волокно, формируемое из расплавов или растворов полиамидов. Оно характеризуется высокой прочностью при растяжении, устойчивостью к знакопеременным деформациям, высоким сопротивлением к ударным нагрузкам и истиранию. Недостатками полимерного волокна являются: сравнительно низкая гигроскопичность, высокая электризуемость, относительно низкий модуль деформации при растяжении и низкие тепло-, термо- и светостойкость. В работе использовали полиамидное волокно марки найлон-6, основные физико-механические свойства которого приведены в таблице 2.12 [68-71].

Т а б л и ц а 2.12

Физико-механические свойства полиамидов

Показатель	Найлон-6
1	2
Линейная плотность, текс*	0,09-350
Плотность, кг/м ³	1130-1150
Равновесная влажность, %:	
1) при относительной влажности воздуха 65 %	3,5-4,5
2) при относительной влажности воздуха 95 %	7,0-8,5
Относительная прочность, сН/текс	40-90
Прочность в мокром состоянии, % от прочности сухого волокна	85-90
Относительная прочность в узле, %	83-93
Относительное удлинение при разрыве, %:	
1) в сухом состоянии	16-60
2) в мокром состоянии	17-65
Температура плавления, °С	215-220
Длина волокна, м	$6 \cdot 10^{-3}$
Диаметр волокна, м	$15 \cdot 10^{-6}$

* Текс–масса 1100 м волокна, выраженная в граммах

2.2. Приборы и установки, методы исследований

Экспериментальные исследования образцов из полимерных наполненных КМ при фрезеровании и сверлении проводили на вертикально-фрезерном станке модели 6Р11Ф3, с применением цилиндрических фрез Р18 Ø 15-32 мм, и на вертикально-сверлильном станке модели 2С132, с применением сверл Р6М5 Ø 5-20 мм (ГОСТ 11902-77).

При механической обработке изделий из ПКМ происходит их разрушение вследствие механо- и термодеструкции полимерной матрицы и

наполнителя, приводящее к снижению прочностных и упругих характеристик изделий из КМ. Основное влияние на физико-механические свойства изделий из ПКМ оказывает качество обработки, т.е. высота получающихся после обработки микронеровностей поверхностей.

Для выяснения влияния механической обработки на прочностные и упругие характеристики изделий из ПКМ провели соответствующие исследования, заключающиеся в следующем: вырезали образцы, предназначенные для определения упругих и прочностных характеристик. Предварительно отдельные участки образца обрабатывали осевым инструментом с различными режимами резания для получения вариации микронеровностей поверхности. Шероховатость поверхности каждого образца измеряли не менее чем в трех точках. Также вырезали образцы с необработанной наружной поверхности.

Определение шероховатости обрабатываемых поверхностей полимерных КМ. Для определения шероховатости обрабатываемых поверхностей использовали образцы из полимерных КМ размером 500x500x10 мм.

Параметры шероховатости измеряли цеховым профилометром с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем (модель 296 ТУ 2-034-4-83). Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в изменение электрического сигнала пропорционально этим колебаниям.

Профилометр предназначен для измерения шероховатости в диапазоне от 0,02 до 11 мкм по ГОСТ 2789-73, с погрешностью, не превышающей требования ГОСТ 19300-86, отсечкой шага 0,25 мм, длиной трассы ощупывания при измерении 6 мм и скоростью трассирования датчика $1 \pm 0,04$ мм. Прибор предназначен для работы в помещениях лабораторного типа при температуре окружающей среды от 11 до 35 °С и относительной влажности от 45 до 80 %.

Пользуясь значением измеренной резонансной частоты колебаний образца прямоугольного сечения, динамический модуль упругости определяется [72]:

$$E_d = 48 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{l^2}{a} \cdot \frac{f}{K_n} \right)^2, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность образца, г/см³;

l, a – соответственно длина, ширина образца, см;

f – резонансная частота колебаний изгиба, Гц;

K_n – поправочный коэффициент, определяемый по таблицам и по коэффициенту Пуансона.

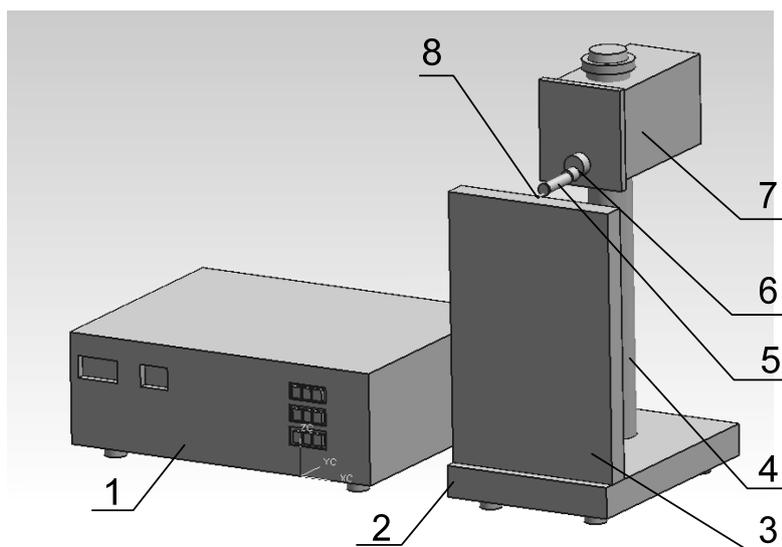


Рис. 2.1. Профилометр модели 296:
 1 – электронный блок; 2 – основание; 3 – измеряемая деталь; 4 – стойка;
 5 – ножевая опора; 6 – хвостовик; 7 – измерительный блок; 8 – щуп

Определение динамического модуля упругости полимерных материалов осуществляли с помощью прибора – типа 3930 фирмы «Брюль и Кьер». Испытательная схема измерителя показана на рис. 2.2. Принцип работы прибора типа 3930 заключается в том, что в образце испытываемого материала возбуждаются механические колебания изгиба с целью получения численных значений резонансной частоты изгибных колебаний.

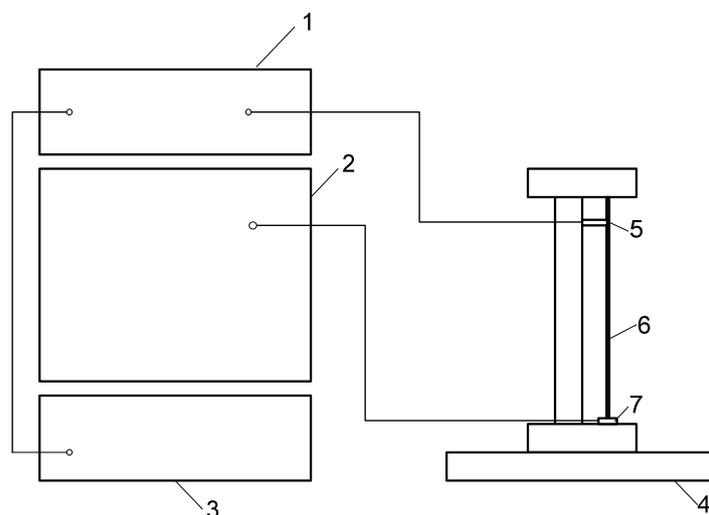


Рис. 2.2. Испытательная схема прибора типа 3930:
 1 – измерительный усилитель; 2 – генератор биений; 3 – самописец биения;
 4 – прибор типа 3930; 5 – электромагнитный преобразователь; 6 – образец;
 7 – возбудитель колебаний

Полученные по формулам (2.1) численные значения динамического модуля упругости представляют в виде графических зависимостей.

Твердость по Геплеру, равновесный модуль упругости, условно-мгновенный модуль упругости, модуль высокоэластичности полимерных КМ определяли методом внедрения конусообразного индентора. Техническая характеристика КИ приведена в табл. 2.13.

Т а б л и ц а 2.13

Характеристика конусообразного индентора

Показатели	Нормы
Высота конической части, мм	5-11
Угол при вершине, град.	53
Величина поправки на закругление конусообразного индентора, мм	0,03-0,20
Точность определения угла при вершине, град.	0,05
Точность измерения глубины погружения КИ, мм	0,01

В напряженном состоянии материала по данным фотоупругости преобладает осевое сжатие. В расчетных формулах метода использованы следующие обозначения: $\Delta_{01}, \Delta_1, \Delta_{15}, \Delta_{41}, \Delta_{43}$ – глубина погружения индентора через 1 с, 1 мин, 15 мин после приложения основной нагрузки и через 1 с и 1 мин после ее снятия (с поправкой Δ), мм; F_M и F_0 – основная и остаточная нагрузка на индентор.

При расчете величин $\Delta_{01}, \Delta_1, \Delta_{15}, \Delta_{41}, \Delta_{43}$ вводится поправка, равная разности высот геометрически правильного конуса и конуса с округленной вершиной.

Общая глубина вдавливания вычислялась по формуле:

$$\Delta = h - h_0 + \delta, \quad (2.2)$$

где Δ – глубина вдавливания, мм;

h – показания индикатора, мм;

h_0 – начальные показания индикатора, мм;

δ – поправка на закругление конусообразного индентора.

Твердость по Геплеру (HB_G) вычислялась по формуле:

$$HB_G = \frac{0.318 \cdot F_M}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \Delta_{15}^2}. \quad (2.3)$$

Условно-мгновенный модуль упругости:

$$E_o = \frac{3,18 \cdot (F_M - F_0) \cdot K_2}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (\Delta_{15}^3 - \Delta_{41}^3)} \quad (2.4)$$

Равновесный модуль упругости, учитывающий упругую и высокоэластическую деформацию:

$$E_{yg} = \frac{3,18 \cdot (F_M - F_0) \cdot K_2}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (\Delta_{15}^3 - \Delta_{43}^3)} \quad (2.5)$$

где K_2 – коэффициент, учитывающий величину нагрузки на конусообразный индентор (табл. 2.14);

α – угол при вершине конусообразного индентора.

Т а б л и ц а 2.14

Коэффициенты, учитывающие величину нагрузки на индентор

Нагрузка, Н	5	11	20	30	60	90	120	150	180	240
K_2	0,1 0	0,1 5	0,25	0,35	0,55	0,75	1,00	1,20	1,35	1,60

Определение предела прочности на растяжение при изгибе. Для определения предела прочности на растяжение при изгибе использовали образцы из полимерных композитов размерами 80x11x4 мм (ГОСТ 4648-71). Прочностные испытания образцов производили на разрывной машине для испытаний материалов типа 2166Р – 5 “Э”.

Машина предназначена для испытания пластмасс на растяжение, изгиб, гистерезис и малоцикловые усталостные испытания: по нагрузке, перемещению, деформации при нормальной температуре. Пределы нагрузки: наибольший 5 кН, наименьший 0,01 Н. Скорость рабочего хода активного захвата: 1...1100 мм/мин. Диапазон измерения перемещения активного захвата: при работе в верхней зоне 0...1100 мм; при работе в нижней зоне 0... 500 мм. Пределы измерений деформации (захвата типа ЗРК-0,5 при работе в верхней зоне), % от номинальной длины рабочего участка: при длине 11 мм 4150 %; при длине 20 мм 2025 %; при длине 25 мм 1600 %; при длине 50 мм 750 %.

Действие машины основано на том, что образец для испытаний, свободно лежащий на двух опорах, кратковременно нагружают в середине и определяют требуемые показатели. Скорость относительного перемещения нагружающего наконечника и опор v должна быть установлена в нормативно-технической документации на материал. При отсутствии

таких указаний скорость относительного перемещения нагружающего наконечника и опор ν в мм/мин вычисляют по формуле:

$$\nu = \frac{\nu_r \cdot L_v^2}{6 \cdot h}, \quad (2.6)$$

где L_v – расстояние между опорами, мм;

ν_r – скорость деформации, равная 0,01 мм/мин или значению, предусмотренному в нормативно-технической документации на материал, мм/мин;

h – толщина образца, мм.

Изгибающее напряжение (σ_f) в МПа при нагрузке рассчитывали путём деления изгибающего момента полимерного композита на момент сопротивления сечения образца по формуле:

$$\sigma_f = \frac{M}{W} \quad (2.7)$$

где M – изгибающий момент, Н · мм;

W – сопротивление сечения образца, мм³.

Предел прочности на растяжение при изгибе (σ_f) в кгс/м²:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L_v}{2 \cdot b \cdot h}, \quad (2.8)$$

где F – нагрузка;

L_v – расстояние между базовыми опорами;

b – ширина образца;

h – высота образца.

Определение ударного изгиба полимерных КМ. Метод определения по ГОСТ 4647-80 основан на измерении работы в кДж, необходимой для разрушения стандартного образца, свободно лежащего на двух опорах, при испытании его на изгиб ударной нагрузкой. Для определения ударного изгиба использовали образцы из полимерных композитов размерами 80x11x4 мм тип надреза В (ГОСТ 4647-80). Прочностные испытания образцов производили на маятниковом копре типа ПСБ – 1,5 (рис. 2.3). Копер снабжен опорами, на которых устанавливается образец. Удар по образцу маятником осуществляется по середине образца. Плоскость качения маятника должна быть перпендикулярна продольной оси образца, установленного на опорах, и проходить через середину пролета между ними. Технические характеристики копра представлены в табл. 2.15.

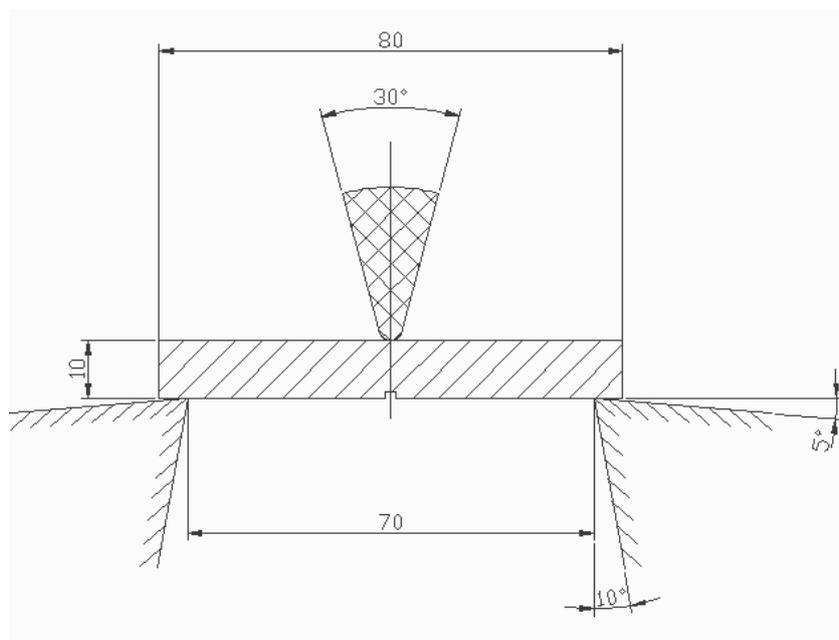


Рис. 2.3. Положение образца при испытании на ударный изгиб.

Т а б л и ц а 2.15

Технические характеристики копра ПСБ – 0.4

Показатели	Нормы
Запас энергии маятника, кгм	0,1
Скорость маятника в момент удара по образцу, м/сек	2,9
Высота физического центра удара над серединой образца, мм	0 ± 2
Расстояние от оси маятника до середины образца, мм	220
Угол подъема маятника, °	160
Угол заострения ножа маятника, °	30 ± 1
Радиус закругления кромки ножа, мм	2,0 ± 0,5
Угол наклона опор, °	5
Угол заострения, боковой, °	11
Радиус закругления опор, мм	1,0 ± 0,5

Ударная вязкость образцов с надрезом (A) в кДж/м² (кгс×см/см²):

$$A = \frac{A_k}{b \cdot S_k} \cdot 10^3, \quad (2.9)$$

где A_k – энергия, затраченная на разрушение образца с надрезом, Дж (кгс×см);

b – ширина образца по его середине, мм (см);

S_k – толщина образца под надрезом, мм (см).

Определение предела прочности при одноосном сжатии. Прочность КМ прежде всего характеризуется пределом прочности при одноосном сжатии $R_{сж}$ (кг/см²), который представляет собой частное от деления разрушающей силы P в кг на площадь поперечного сечения образца F см², т.е.

$$R_{сж} = \frac{P}{F}. \quad (2.10)$$

Для определения предела прочности при одноосном сжатии образцы материала подвергали действию сжимающих внешних сил и доводили до разрушения [61]. Испытуемые образцы были правильной геометрической формы куба следующих размеров: 20 × 20 × 20 мм.

Подготовленные образцы шлифовывали на шлифовальном станке по двум противоположным плоскостям, которые должны быть параллельны. Правильность плоскостей проверяли штангенциркулем.

Для испытаний образцов материала на одноосное сжатие применяли специальные машины, работающие по принципу гидравлического пресса.

Определение твердости по Бринеллю полимерных наполненных композитов производили с помощью прибора типа ХП-250. Прибор отвечает в отношении метода Бринелля и Роквелла действующим стандартам ТГЛ-8648 (по Бринеллю) и ТГЛ-9011 (по Роквеллу).

Прибор типа ХП-250 с наибольшей предельной нагрузкой 250 кгс предназначен для определения твердости по Бринеллю при диаметрах шарика 11, 5, 2,5 мм, с погрешностью ±1% измеряемой величины. Прибор предназначен для работы в помещениях лабораторного типа при температуре окружающей среды от 11 до 35 °С и относительной влажности от 45 до 80 °С.

Перед испытанием места вдавливания шарика были очищены от частиц материала. При определении твердости по Бринеллю вдавливался шарик диаметром 5 мм при нагрузке 62,5 кгс. При выборе нагрузки было учтено, что диаметр отпечатка не должен быть меньше 0,2 и не больше 0,7 диаметра шарика, и толщина образца на месте вдавливания шарика должна в 11 раз превышать ожидаемую глубину.

Твердость по Бринеллю определяли по формуле:

$$HB_{бр} = \frac{2 \cdot P}{D \cdot \pi \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.11)$$

где P – сила вдавливания, кгс;

D – диаметр стального шарика, мм;

d – диаметр сферического отпечатка, мм.

Определение степени массопоглощения после воздействия химических реагентов производили по методике ISO (Международной организации стандартизации пластических масс) и по ГОСТ 12020-72 (Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред) [68].

Образцы в виде кубиков размером $10 \times 10 \times 10$ мм выдерживались в течение 2 недель в нормальных условиях. После этого все образцы взвешивались с точностью до 0,001 г. Далее образцы полностью погружались в рабочую среду (вода и 5% раствор СОЖ в воде). Согласно методу испытание длилось не менее 7 суток. Измерения производились через 1 сутки с момента погружения, затем через 3 суток, 7 суток, 14 суток, 21 сутки, 28 суток, 40 суток, 2 месяца, 3 месяца и 6 месяцев. Перед проведением контрольного взвешивания образцы извлекались, протирались досуха, взвешивались с точностью до 0,001 г и вновь помещались в агрессивную среду до следующего контрольного взвешивания.

Изменение веса (в %) в результате воздействия агрессивной среды вычислялось по формуле:

$$m_t = \frac{M_t - M_0}{M_0} \cdot 100\%, \quad (2.12)$$

где M_0 – исходный вес образца, г;

M_t – масса образца после экспозиции в агрессивной среде в течение времени t .

За окончательный результат принималась средняя величина степени массопоглощения из 3-х значений, полученных при измерениях.

2.3. Статистическая обработка экспериментальных данных

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по методике, которая заключается в определении числа образцов (n), необходимых для получения результатов испытаний с заданной степенью точности (P) [73, 74]. При этом определяется также коэффициент изменчивости исследуемого признака или вариационный коэффициент (V).

Для установления достоверной характеристики вычислялись среднеарифметическое значение (M) из совокупности всех наблюдений, а также среднеквадратическое отклонение (σ), определяющие пределы колебаний исследуемого показателя:

$$M = \frac{\sum y_{cp}}{n}, \quad (2.13)$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \bar{\chi}^2}{n-1}}, \quad (2.14)$$

где y – показатель;

$\sum y$ – сумма отдельных измерений;

$\bar{\chi} = y - M$ – отклонение каждого варианта от среднеарифметического;

$\bar{\chi}^2$ – сумма квадратов.

Необходимый объем выборки, обеспечивающий требуемую точность полученных статистических характеристик при заданном уровне вероятности

$$n = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{\Delta_y^2}, \quad (2.15)$$

где $t = \frac{\bar{\chi}}{\sigma}$ – стандартизированное отклонение;

Δ_y – предельная ошибка выборки.

Средняя ошибка выборки

$$m = \frac{\Delta_y}{t} = \frac{\pm\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.16)$$

Вариационный коэффициент

$$V = \frac{\pm\sigma}{M} \cdot 100\%. \quad (2.17)$$

Обработка кинетических зависимостей методом линейной регрессии. Статическая обработка экспериментальных данных, полученных при анализе кинематических зависимостей, проводилась методом линейной регрессии, описанным в работах [73, 75].

Устанавливалась статистическая зависимость между случайными величинами x и y , в данной работе – время и массопоглощение образцов из полимерных наполненных КМ. Если k_{ix} обозначает частоту появления пары значений x_i, y_j , то выражения:

$$k_{ix} = \sum_j k_{ij} \text{ и } k_{yj} = \sum_i k_{ij}, \quad (2.18)$$

представляют частоту появления соответственно значения x_i и значения y_j . Полное число наблюдений равно:

$$\sum_i k_{ix} = \sum_j k_{yj} = \sum_{ij} k_{ij} = n. \quad (2.19)$$

Среднее значение и дисперсия случайных величин x и y определялись по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i k_{ix} x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_j k_{yj} y_j, \quad (2.20)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_i k_{ix} (x_i - \bar{x})^2, \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_j k_{jy} (y_j - \bar{y})^2. \quad (2.21)$$

Коэффициент ковариации, или корреляционный момент, распределения случайных величин находится по следующей формуле:

$$S_{xy} = \frac{\sum_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{n-1}. \quad (2.22)$$

Степень линейности зависимости между двумя случайными величинами x и y характеризуется коэффициентом корреляции:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} = \frac{[k_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})]}{\sqrt{[k_{ix} (x_i - \bar{x})^2][k_{jy} (y_j - \bar{y})^2]}}. \quad (2.23)$$

Его величина ограничена пределами $(-1 \leq r \leq 1)$. В случае $|r| = 1$, все измеренные значения x_i, y_j лежат на одной прямой, называемой прямой регрессии. Если $|r| < 1$ и выполняется неравенство:

$$|t| = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} > t_\alpha, \quad (2.24)$$

то с вероятностью ошибки α можно считать, что случайные величины x и y связаны линейной зависимостью:

$$y = a + bx. \quad (2.25)$$

Находится величина $f = n - 2$.

По вычисленным значениям $|t|$ и f находится из табл. 2.16 такое табличное значение t_α , наиболее близкое к величине $|t|$, чтобы выполнялось условие $|t| > t_\alpha$. С учетом выполнения условия $|t| > t_\alpha$ определяется величина надежности P , с которой расчетные значения соответствуют опытными данным.

Т а б л и ц а 2.16

 t – распределение

f	P				
	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	6,31	12,71	31,82	63,66	636,92
2	2,92	4,30	6,70	9,93	31,60
3	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
4	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
5	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
7	1,90	2,37	3,00	3,50	5,40
8	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
9	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
20	1,72	2,09	2,53	2,85	3,83
25	1,71	2,06	2,49	2,79	3,72
30	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
40	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
60	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
120	1,66	1,98	2,36	2,62	3,37
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

3. ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Влияние матричных компонентов на физико-механические и технологические свойства полимерных композитов

Полимерные композиты нашли широкое распространение в различных отраслях отечественной промышленности. Они используются в качестве заливочных и пропиточных компаундов, лаков, клеев, конструкционных и плиточных материалов [13, 43, 65, 76-79]. Эти композиты могут эксплуатироваться в различных экстремальных условиях (повышенных температурах, агрессивных средах, ударных, динамических и статических нагрузках), что определяет особый интерес к их упругим и прочностным свойствам.

Знание различных их свойств, на уровне матричных компонентов, позволяет оценить структуру композитов и прогнозировать их поведение в условиях динамических и статических нагрузок.

Свойства вновь получаемых полимерных композитов зависят от различных факторов: температурных режимов отверждения, механохимических воздействий в процессе твердения, но в большей степени от типа отвердителя. Поэтому представляет интерес изучение влияния отвердителей на упругие и прочностные свойства полимерных композитов.

Исходными продуктами изучаемых матричных композитов являлись диановая эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель – полиэтиленполиамин. В связи с этим оценка упругих и прочностных физико-механических свойств [80-82] производилась по измеренным величинам динамического модуля упругости E_d , предела прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, предела прочности при одноосном сжатии $R_{сж}$, твердости по Бринеллю $HB_{бр}$, твердости по Гепплеру HB_g , условно-мгновенного модуля упругости E_o , равновесного модуля упругости $E_{ув}$, ударной вязкости A .

Процесс отверждения эпоксидных смол отвердителем аминного типа ПЭПА происходит с высокой скоростью полимеризации и выделением теплоты, приводящей к саморазогреву полимера. За время отверждения пузырьки воздуха, вовлеченного в композитную смесь при ее перемешивании, не успевают выйти наружу, что приводит к образованию высокопористой структуры.

При недостаточном количестве отвердителя в объеме композита остается незаполимеризованная часть эпоксидного мономера, которую следует рассматривать как отдельную фазу, распределенную в виде дисперсных включений в структуре материала.

С увеличением содержания отвердителя до 17 мас.ч. повышается степень сшивания эпоксидного мономера, что приводит к росту динамического, условно-мгновенного и равновесного модулей упругости (рис.3.1). Дальнейший рост количества полиэтиленполиамина приводит к тому, что в структуре материала в виде отдельной фазы выделяется остаток непрореагировавшего отвердителя. Поскольку отвердитель является более низкомолекулярным веществом, по сравнению с эпоксидным олигомером, его фазовое присутствие в виде дисперсных включений, приводит к росту внутреннего трения. Это обусловлено тем, что низкомолекулярные включения имеют большую степень фазового отличия от полимерного окружения и способны более эффективно поглощать и рассеивать механическую энергию, полученную извне, на внутренние процессы. Поэтому для получения матричных полимерных композитов с высокими физико-механическими свойствами необходима оптимизация количественного содержания отвердителя.

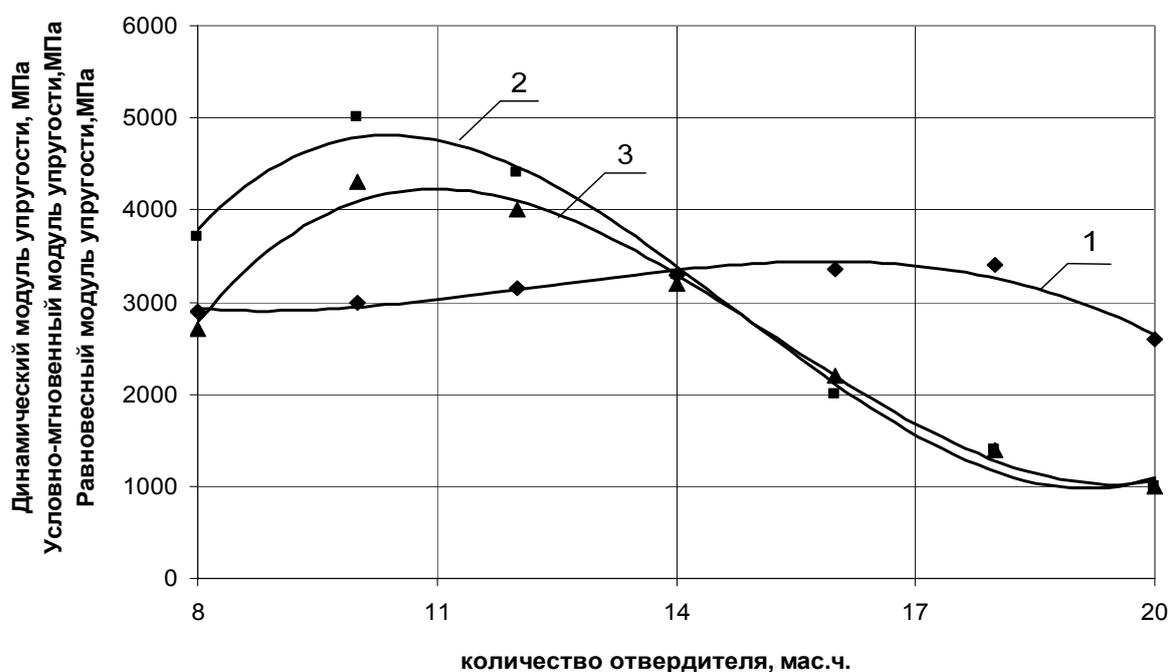


Рис. 3.1. Влияние количества отвердителя на упругие свойства эпоксидной матрицы:

1 – динамический модуль упругости; 2 – условно-мгновенный модуль упругости; 3 – равновесный модуль упругости

Для получения плиточных материалов необходимо, чтобы эпоксидная смола обладала высокими прочностными показателями. Эпоксидная матрица относится к классу густосетчатых полимеров. Известно, что при изгибе и растяжении густосетчатые полимеры разрушаются с ма-

лыми пластическими деформациями. Относительная деформация, предшествующая разрушению, при таких видах нагрузок обычно не превышает 2-3.

При сжатии и сдвиге у них, как правило, проявляется предел текучести и значительные пластические деформации до разрушения. Разрушение на молекулярном уровне чаще всего происходит в результате разрыва ковалентных связей углеродного скелета макромолекул и относительного сдвига полимерных цепей.

Сдвиг осуществляется в результате разрыва слабых ван-дер-ваальсовых или водородных связей, и поэтому происходит при довольно малых напряжениях. Сдвиговые явления сопровождаются образованием микротрещин и пустот, являющихся инициаторами разрушения [78, 83-92].

С целью определения влияния отвердителя проводились прочностные испытания образцов, изготовленных из эпоксидных композитов. Массовое содержание отвердителей варьировалось от 8 до 20 мас.ч. Результаты проведенного экспериментально-теоретического анализа представлены на рис. 3.2–3.3.

Как видно из экспериментальных графиков зависимостей, предел прочности при одноосном сжатии претерпевает экстремальное изменение от возрастания к спаду. Рост предела прочности при одноосном сжатии происходит в интервале от 8 до 18 массовых частей, а спад от 18 до 20 мас.ч. Твердость возрастает в интервале 8 до 12 массовых частей и падает от 12 до 20 мас.ч. Предел прочности на растяжение при изгибе и ударная вязкость на всем исследуемом интервале исследований имеют тенденцию к росту.

Оптимальное количество отвердителя, при котором эпоксидная матрица имеет достаточно высокие прочностные и упругие свойства, находится в интервале 10-18 мас.ч.

Проводили отверждение полиэфирной смолы 540-М 888 пероксидом №1. В ходе проведенных экспериментальных исследований установлен схожий характер протекания процессов отверждения в полиэфирном композите. При взаимодействии полиэфирной смолы 540-М 888 с пероксидом №1 образуется полимер со следующей пространственной структурой:

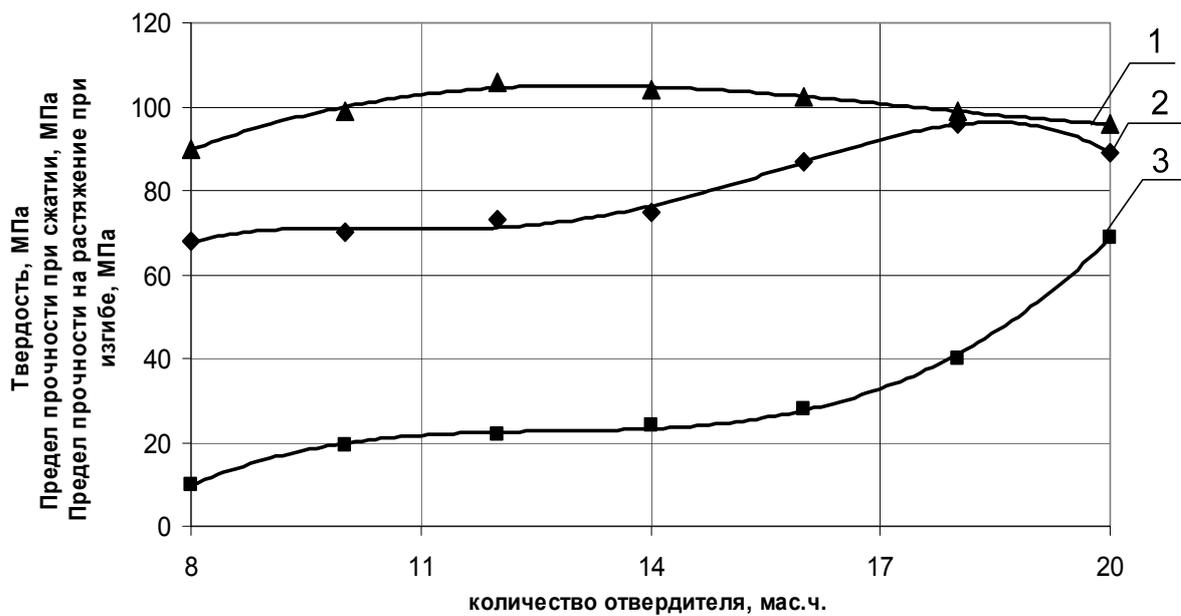


Рис. 3.2. Влияние количества отвердителя на прочностные свойства эпоксидной матрицы:
 1 – твердость; 2 – предел прочности при сжатии;
 3 – предел прочности на растяжение при изгибе

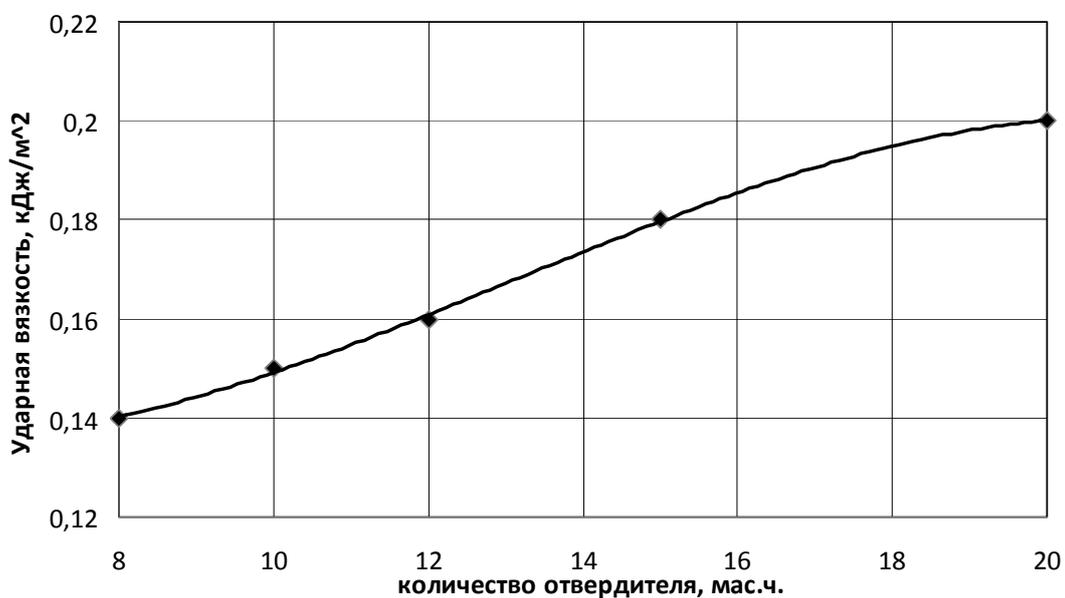
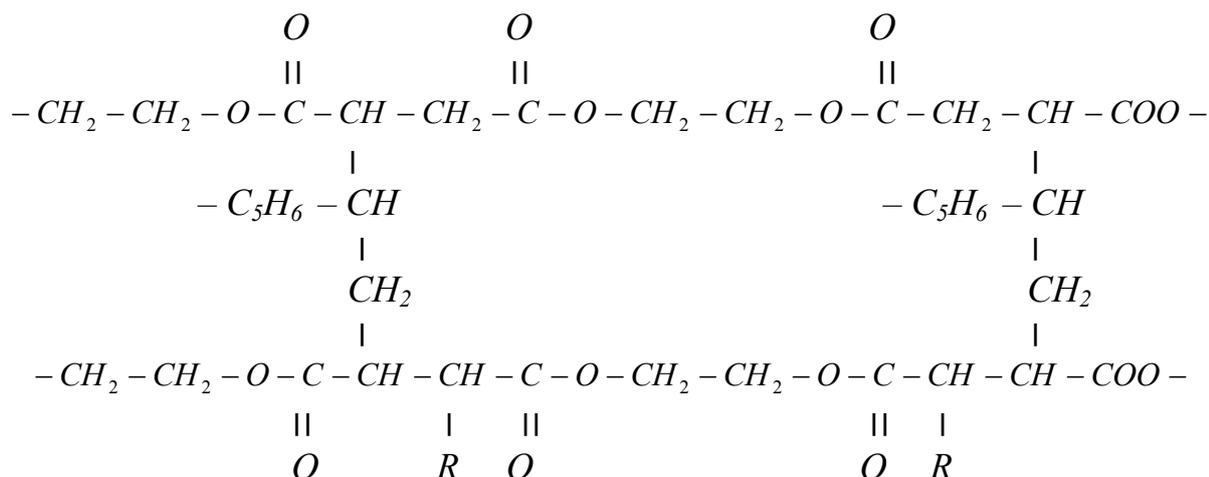


Рис. 3.3. Влияние количества отвердителя на прочностные свойства эпоксидной матрицы



В ходе экспериментально-теоретических исследований установлено, что оптимальное содержание отвердителя, обеспечивающее высокие физико-механические и технологические свойства, находится в интервале 2-3 масс.ч. Результаты исследований представлены на рис. 3.4–3.6.

Следует отметить коррессируемость данных по пределу прочности при одноосном сжатии и динамическому модулю упругости. Это в полной мере соответствует представлению о структурных изменениях в полимере в зависимости от степени его отверждения.

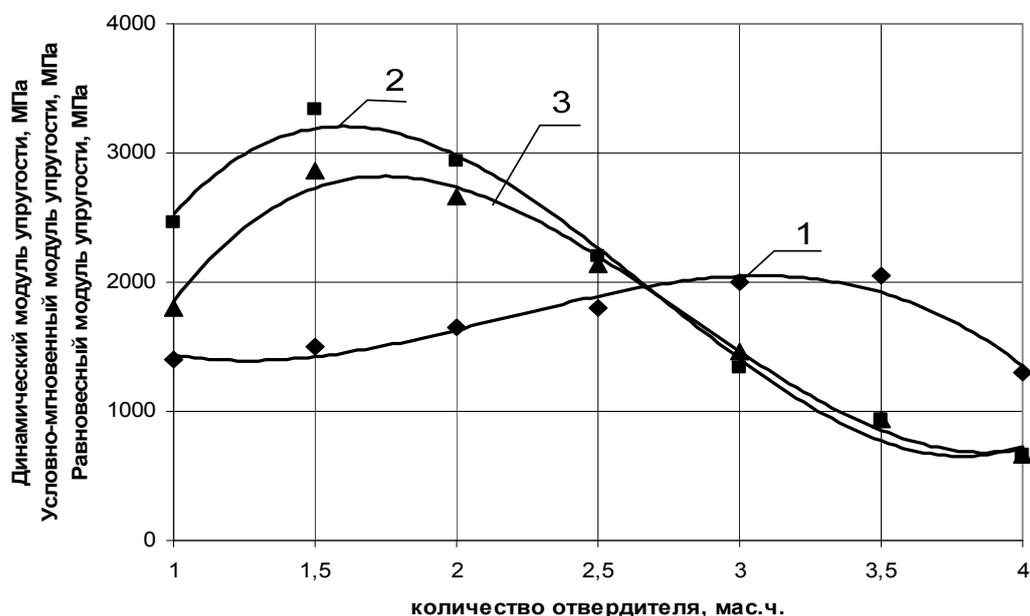


Рис. 3.4. Влияние количества отвердителя на упругие свойства полиэфирной матрицы:
 1 – динамический модуль упругости;
 2 – условно-мгновенный модуль упругости;
 3 – равновесный модуль упругости

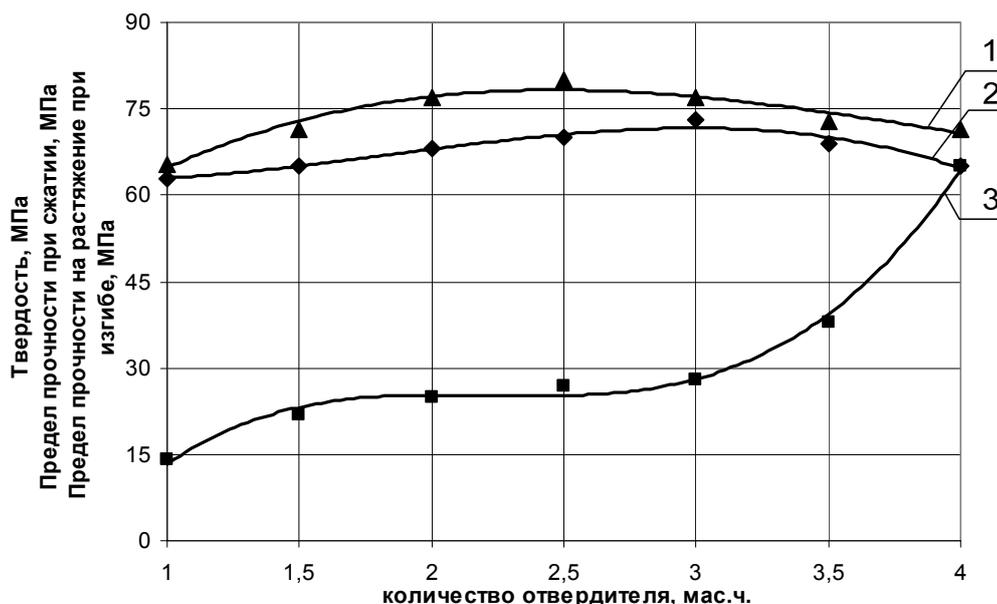


Рис. 3.5. Влияние количества отвердителя на прочностные свойства полиэфирной матрицы:
 1 – твердость; 2 – предел прочности при сжатии;
 3 – предел прочности на растяжение при изгибе

Действительно, с ростом степени сшивания повышаются упругие свойства полимерного матричного материала, что естественным образом сказывается на увеличении прочности при одноосном сжатии. В свою очередь, повышенное содержание отвердителя приводит к тому, что избыток отвердителя выделяется в виде самостоятельной фазы, которая, по существу, является фиктивным пластификатором. Данный эффект прослеживается по увеличению предела прочности на растяжение при изгибе, когда включение пластификатора выполняет роль стопора трещины.

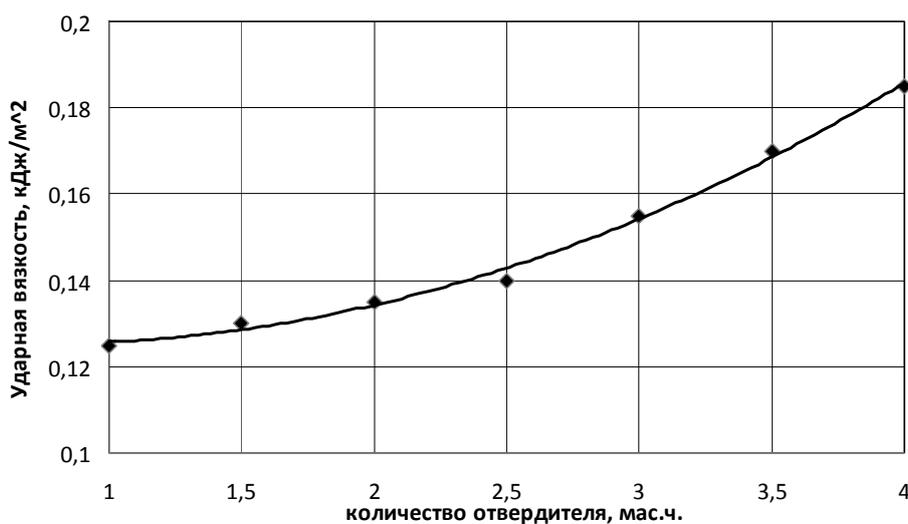


Рис. 3.6. Влияние количества отвердителя на прочностные свойства полиэфирной матрицы

С целью улучшения физико-механических и технологических свойств эпоксидных композитов провели их модификацию. Модификацию эпоксидных сетчатых полимеров можно определить как систему методов направленного регулирования их структуры, происходящего вследствие введения модифицирующих добавок и изменения химического строения получаемого композита [15, 93].

Химическая модификация сетчатых олигомеров основана на изменении химического строения получаемой многокомпонентной смеси путем введения целевых реакционноспособных активных добавок. В связи с тем, что модификаторы легко встраиваются в структурную сетку исходной полимерной матрицы, можно варьировать строением межузловых участков, а, следовательно, макроскопическими свойствами эпоксидных полимеров.

Модификация эпоксидных полимеров комплексными модифицирующими добавками эффективнее, чем одним компонентом, так как, варьируя подбором различных модифицирующих добавок, можно добиться усиления эксплуатационных показателей в комплексе (демпфируемость, упругость, жесткость, прочность).

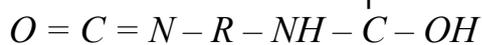
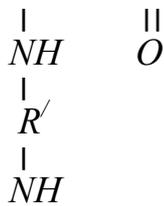
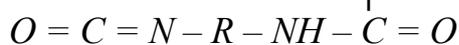
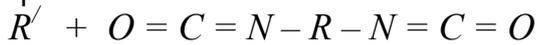
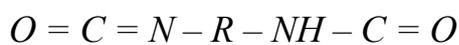
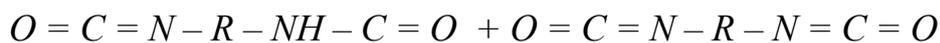
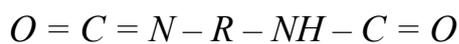
С целью увеличения физико-механических свойств эпоксидную смолу ЭД-20 модифицировали двухкомпонентной добавкой, состоящей из компонентов Сарэл А-04 и Сарэл Б-04.

Процесс приготовления модифицированной полимерной смеси состоял в получении двух различных по составу растворов.

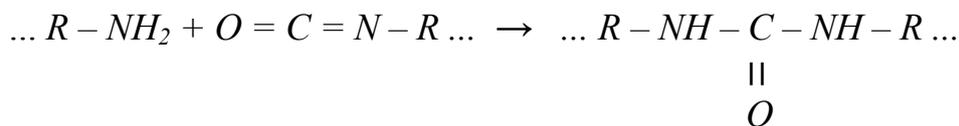
Первый состоял из эпоксидной смолы и компонента Сарэл А-04 (10 мас.ч. на 100 мас.ч. ЭД-20). Во второй состав входили следующие элементы: компонент Сарэл Б-04 (10 мас.ч. на 100 мас.ч. ЭД-20) и полиэтиленполиамин (11 мас.ч. на 100 мас.ч. ЭД-20). Затем полученные растворы перемешивали.

При смешивании эпоксидной смолы с простым полиэфиром химического взаимодействия не происходит, а идет взаимное межпачечное проникновение компонентов полимерной смеси. В дальнейшем простой полиэфир выступает в роли пластифицирующей фазы. Часть непрореагировавшего отвердителя вступает в реакцию с эпоксидной смолой по известной схеме.

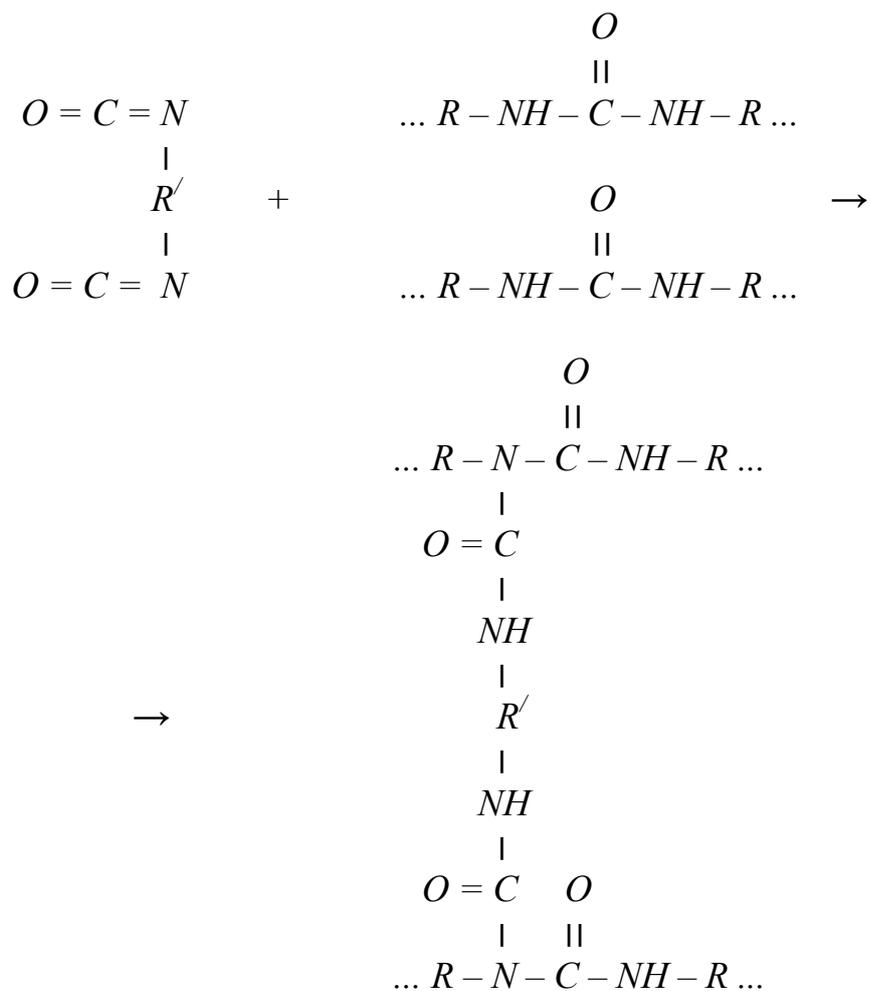
В результате химической реакции полиэтиленполиамин с полиизоцианатом образуется гель-фракция, которая в дальнейшем выступает в роли дополнительного источника диссипации колебательной энергии. Химическое взаимодействие, возникающее при перемешивании полиэтиленполиамин с полиизоцианатом:



Также первичный амин вступает в реакцию с изоцианатными группами:



Продуктом реакции является замещенный карбамид, содержащий подвижный атом водорода при атоме азота и способный взаимодействовать с полиизоцианатом, что приводит к так называемому карбамидному сшиванию:



На рис. 3.7 представлена структура эпоксиполиуретанового композита. Модификация эпоксидной смолы двухкомпонентной модифицирующей добавкой приводит к усилению упругих и прочностных показателей композита (рис. 3.8-3.10).

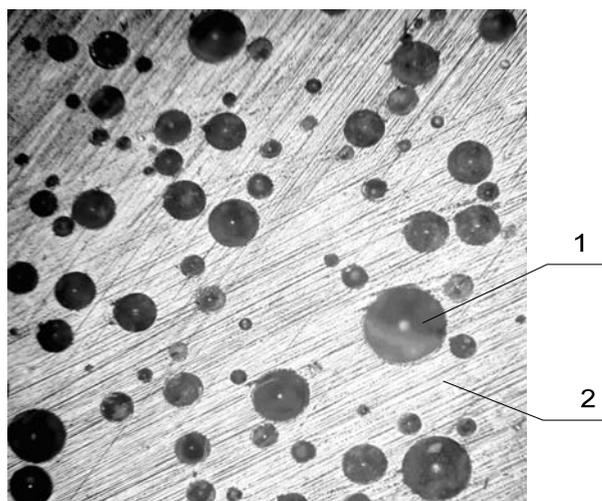


Рис. 3.7. Микроструктура эпоксиполиуретанового композита (x70):
1 – поры; 2 – полимерная матрица

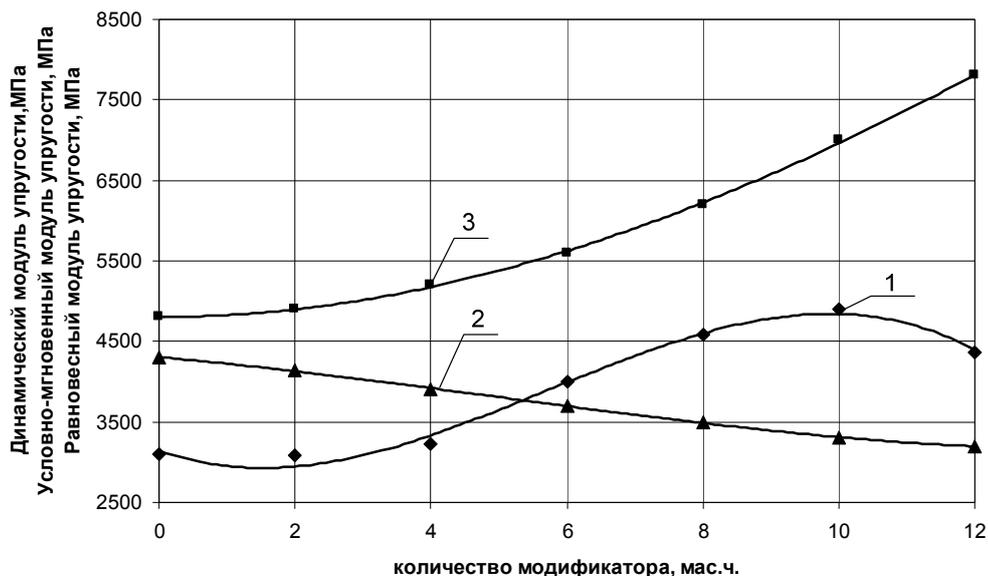


Рис. 3.8. Влияние количества комплексного модификатора на упругие свойства эпоксидной матрицы:
 1 – динамический модуль упругости; 2 – равновесный модуль упругости;
 3 – условно-мгновенный модуль упругости

Из приведенных данных видно, что изменение параметров, характеризующих вязкоупругое состояние эпоксидных композитов в области малых и больших содержаний модифицирующей добавки, различно.

Если в области небольших содержаний добавок (5-10 масс. ч.) наблюдается повышение упругих свойств (см. рис. 3.8), предела прочности на растяжение при изгибе и ударной вязкости (рис. 3.9-3.10), то при повышенном содержании модификатора характерно некоторое убывание или неизменность данных физико-механических характеристик.

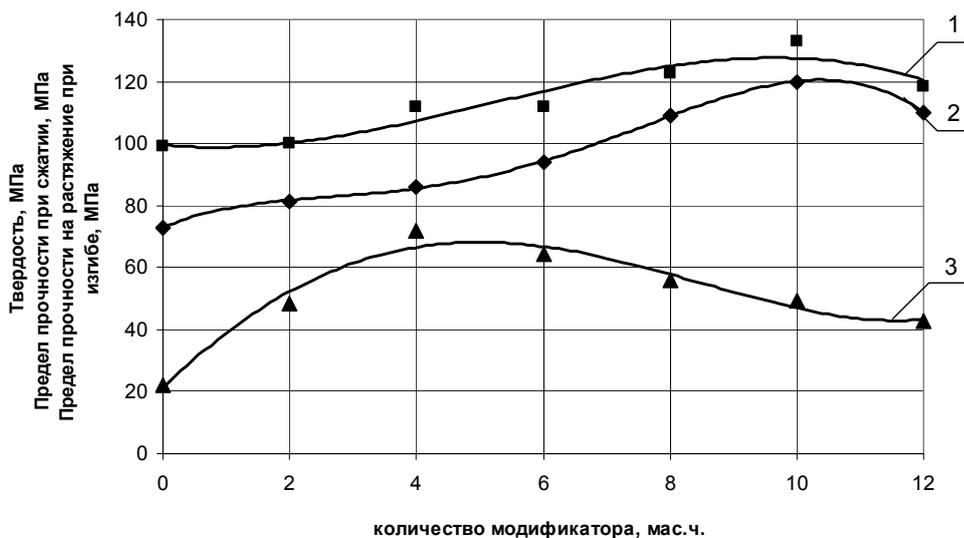


Рис. 3.9. Влияние количества комплексного модификатора на прочностные свойства эпоксидной матрицы: 1 – твердость; 2 – предел прочности при сжатии; 3 – предел прочности на растяжение при изгибе

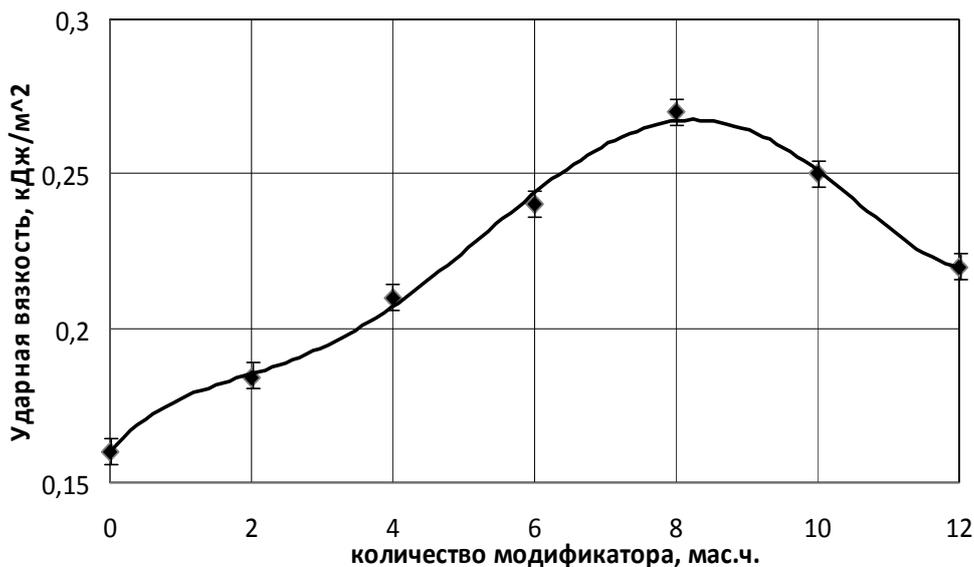


Рис. 3.10. Влияние количества комплексного модификатора на прочностные свойства эпоксидной матрицы

Зависимости предела прочности при одноосном сжатии и твердости (рис. 3.9) от массового содержания комплексной модифицирующей добавки на всем исследуемом интервале имеют тенденцию к увеличению.

Эффект усиления деформационно-прочностных свойств, модифицированных эпоксидных композитов, обязан появлению в структуре эпоксидной смолы поперечной сшивающей цепи и уретановых фрагментов. Анализ полученных данных показал целесообразность модифицирования эпоксидной смолы двухкомпонентной модифицирующей добавкой для получения КМ с повышенными прочностными свойствами.

Эпоксидная матрица, вследствие своей структурной особенности (высокая плотность пространственной сетки), в стеклообразном состоянии обладает значительной хрупкостью, низкой ударной прочностью [94, 95]. Для устранения этих недостатков применяют различные способы модификации полимерных материалов, одним из которых является эластификация.

Эластификацию осуществляли путем введения в состав смеси, состоящей из эпоксидной смолы и аминного отвердителя, низкомолекулярного органического соединения – дибутилфталата.

При содержании пластификатора от 3-10 мас.ч. в эпоксидном композите наблюдается эффект антипластификации, связанный с усилением физико-механических свойств композита [33, 96] (рис. 3.11-3.13).

Вопреки механизму пластификации в зоне антипластификации происходит увеличение упругих и прочностных свойств. Вследствие того, что полимерам свойственна несовместимость, в их смеси с пластификатором происходит фазовое расслоение, в результате которого дибутилфталат выделяется в виде отдельных включений, распределенных

в объеме композитной смеси. Основная функция пластификатора при увеличении прочности ПКМ заключается в рассеивании энергии разрушения вследствие интенсификации сдвиговой текучести и инициирования множества мелких трещин в полимерной матрице. Для обеспечения увеличения прочности отдельные частицы пластификатора должны иметь определенный размер и не образовывать непрерывной фазы, значительно эластифицирующей матрицу.

При содержании пластификатора более 10 мас.ч. резко понижаются упругие и прочностные свойства КМ (рис. 3.11-3.12). Последнее оценивается как нежелательный эффект, снижающий жесткость и устойчивость изделий из эпоксидных композитов.

В процессе производства и применения полимерных изделий в машиностроении используют механическую обработку. В этой связи одним из основных свойств полимерных композитных материалов является технологичность. Технологичность характеризует возможность изготовления изделий из полимерных композитов с заданными размерами и требуемым качеством.

Оценку влияния матричных КМ на технологические параметры произвели по полимерным образцам, обработанных на вертикально-сверлильном станке модели 2С132 с применением сверл Р6М5 Ø 5-20 мм (ГОСТ 10902-77) и вертикально-фрезерном станке 6Р11Ф3 с применением концевых пальчиковых фрез Р18Т Ø 16-32 мм. Поверхности полимерных композитов были обработаны при различных значениях технологических параметров механической обработки для получения вариации микронеровностей поверхности.

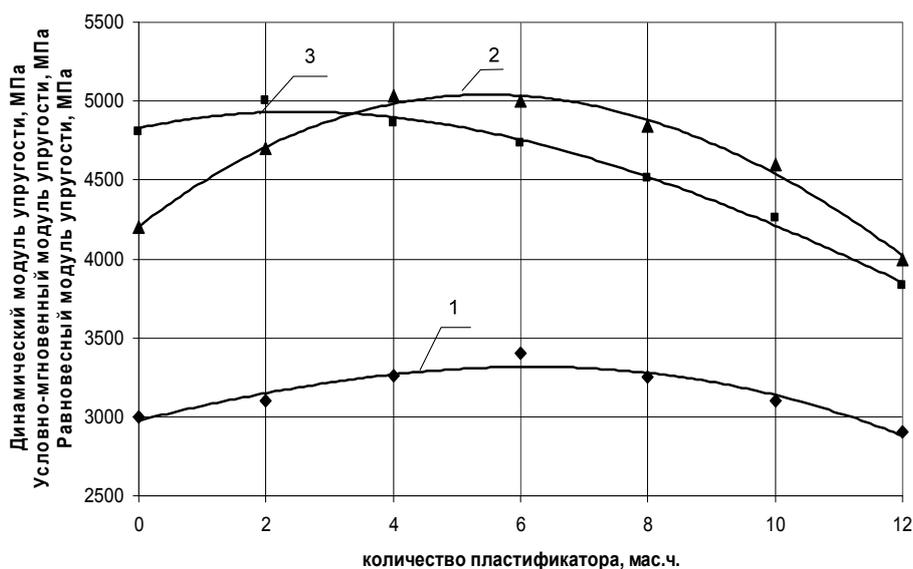


Рис. 3.11. Влияние количества пластификатора на упругие свойства эпоксидной матрицы: 1 – динамический модуль упругости; 2 – равновесный модуль упругости; 3 – условно-мгновенный модуль упругости

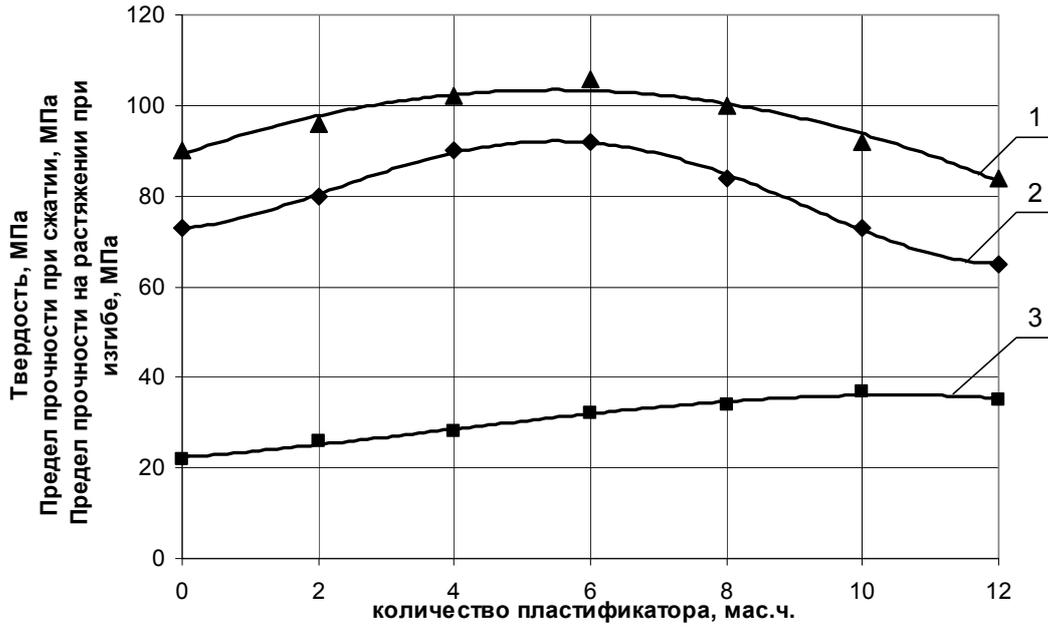


Рис. 3.12. Влияние количества пластификатора на прочностные свойства эпоксидной матрицы: 1 – твердость; 2 – предел прочности при сжатии; 3 – предел прочности на растяжение при изгибе

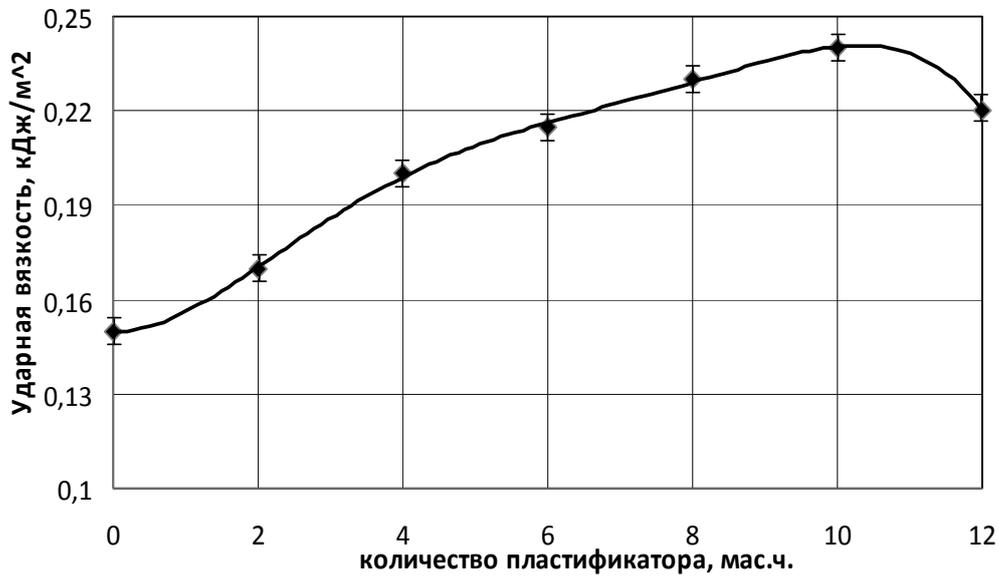


Рис. 3.13. Влияние количества пластификатора на прочностные свойства эпоксидной матрицы

Для сравнения подготовили необработанные образцы. Шероховатость поверхности образцов измеряли не менее чем в трех точках на профилометре модели 296. Определение физико-механических свойств

осуществляли в соответствии с методами, приведенными во второй главе (рис.3.14 – 3.19).

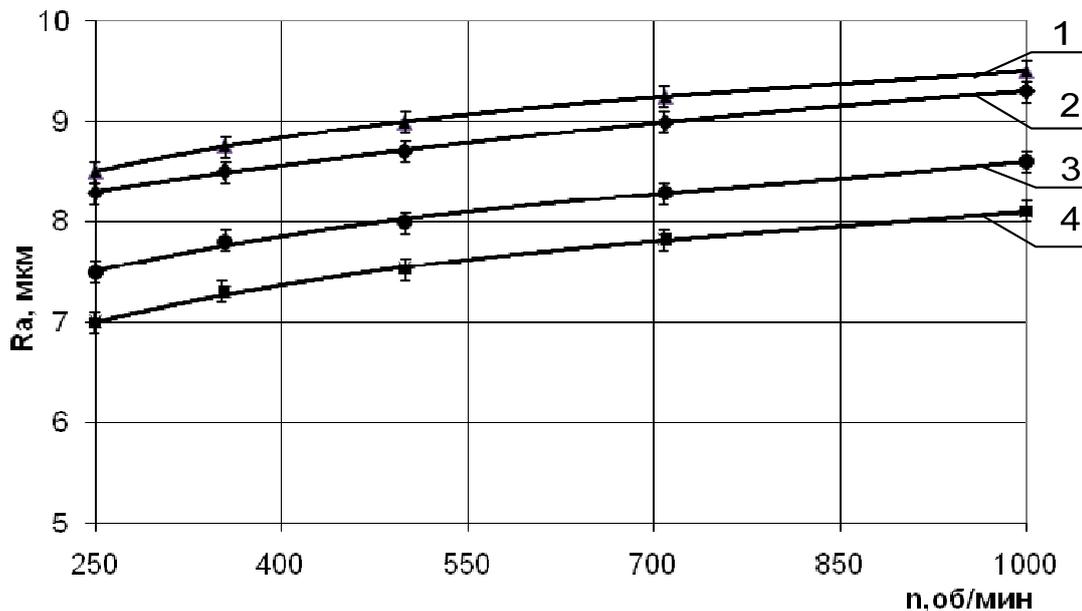


Рис. 3.14. Влияние скорости обработки при сверлении на качество полимерных КМ:

- 1 – полиэфирная смола 540-М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
- 2 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.;
- 3 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.;
- 4 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; Сарэл 04 – 10 мас.ч.

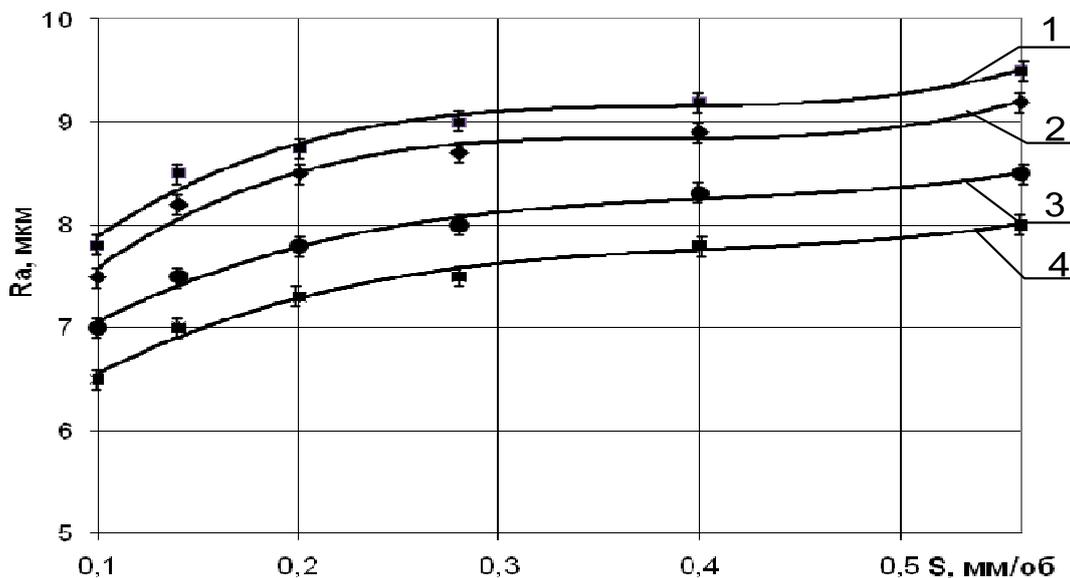


Рис. 3.15. Влияние подачи при сверлении на качество полимерных КМ:

- 1 – полиэфирная смола 540-М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
- 2 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.;
- 3 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.;
- 4 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; Сарэл 04 – 10 мас.ч.

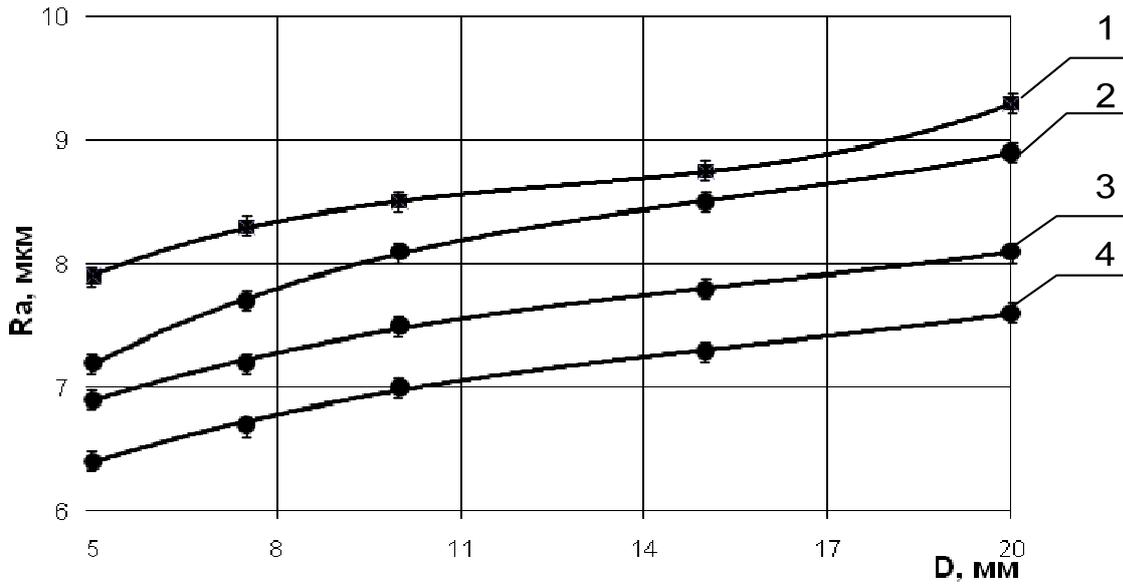


Рис. 3.16. Влияние глубины резания при сверлении на качество полимерных КМ:

1 – полиэфирная смола 540-М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
 2 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; 3 – ЭД-20 – 100 мас.ч.;
 ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; 4 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.;
 Сарэл 04 – 10 мас.ч.

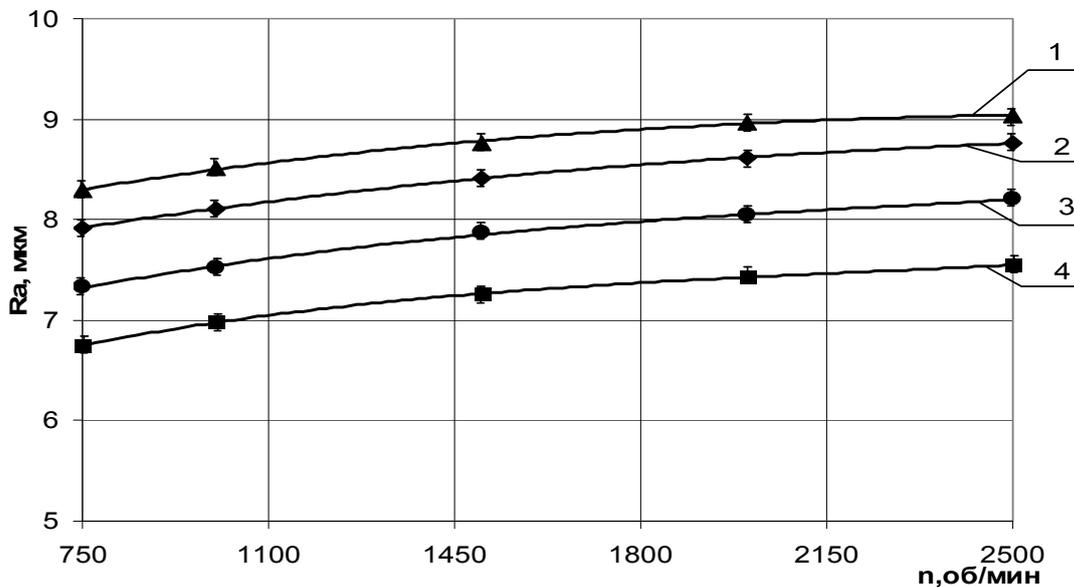


Рис. 3.17. Влияние подачи при фрезеровании на качество полимерных КМ:

1 – полиэфирная смола 540-М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
 2 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; 3 – ЭД-20 – 100 мас.ч.;
 ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; 4 – ЭД-20 – 100 мас.ч.;
 ПЭПА – 11 мас.ч.; Сарэл 04 – 10 мас.ч.

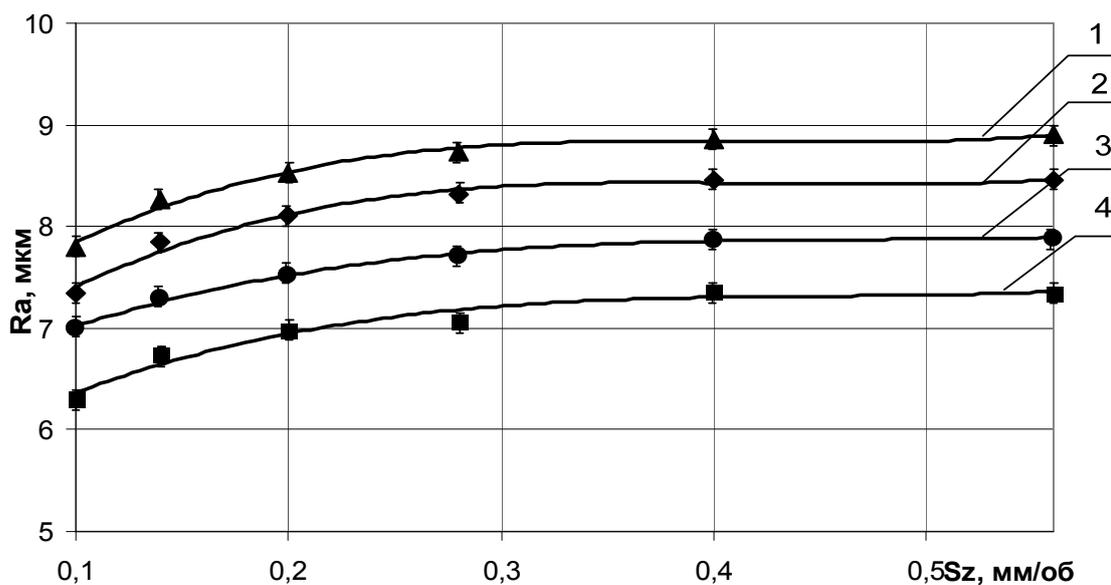


Рис. 3.18. Влияние скорости обработки при фрезеровании на качество полимерных КМ:
 1 – полиэфирная смола 540-М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
 2 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.;
 3 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.;
 4 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; Сарэл 04 – 10 мас.ч.

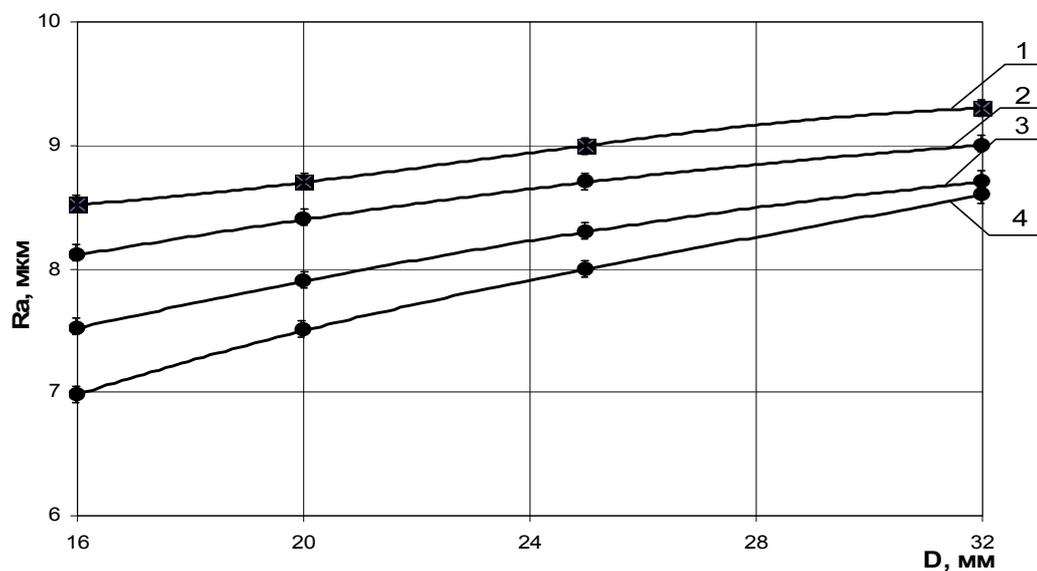


Рис. 3.19. Влияние глубины резания при фрезеровании на качество полимерных КМ:
 1 – полиэфирная смола 540-М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
 2 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.;
 3 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.;
 4 – ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; Сарэл 04 – 10 мас.ч.

В результате экспериментальных исследований установлено, что полученные механической обработкой изделия из эпоксиполиуретановых композитов обладают более высокими физико-механическими свойствами и качеством обработанных поверхностей (снижение шероховатости; отсутствие дефектов на обработанных поверхностях), в отличие от эпоксидных и полиэфирных композитов.

Таким образом, установлена эффективность использования в эпоксидных композитах двухкомпонентной модифицирующей добавки, состоящей из полиэфирной смолы и полиизоцианата.

3.2. Влияние объемного содержания наполнителей на физико-механические и технологические свойства полимерных композитов

Введение в полимерную матрицу наполнителя приводит к существенному изменению ее физико-механических и технологических показателей [97-100].

Установлено, что природа изменения физико-механических свойств КМ при введении наполнителя в эпоксидную и полиэфирную смолу идентична.

С увеличением объемного содержания наполнителя (\mathcal{G}) в композитном материале развиваются два одновременных альтернативных процесса, в большей мере обусловленных возникновением границы раздела между фазами в композите и поэтому обязанных проявлению комплексных свойств, не присущих компонентам в отдельности [97, 101].

С одной стороны, протекает процесс упрочнения композита за счет введения в матрицу дисперсных частиц. Такое упрочнение преимущественно осуществляется в результате близкодействующего взаимодействия отдельных частиц наполнителя, способствующего переводу матричного материала в контактное пространство между частицами наполнителя из его объемного состояния в пленочное, с более высокой прочностью и направленной (от частице к частице) структурированностью. В условиях стесненности частиц в композите пленочная фаза матрицы занимает все больший объем, вплоть до формирования пространственной жесткой упрочняющей решеточной структуры, которая образуется из частиц наполнителя и упрочненных пленочных прослоек матрицы, вследствие своей непрерывности, имеет в объеме композита самостоятельную связность.

С другой стороны, в композите проявляется процесс разупрочнения, развивающийся с повышением содержания наполнителя в композите. Прежде всего, источником дефектов является поверхность раздела фаз. Из-за неполной лиофилизации поверхности частиц матричным материалом образуются пустоты и поры. Вследствие различия упругих постоянных, а также коэффициентов термического линейного расширения материалов наполнителя и матрицы, на границе раздела возникают значительные напряжения, вызывающие растрескивание. Кроме того, с повышением \mathcal{V} в композите проявляется пустотность, вызванная дефицитом связующего.

Усиливающий наполнитель имеет более высокие механические показатели, чем матричный материал. Поэтому распространение трещин в композитном материале происходит либо по матрице, либо по адгезионному контакту наполнителя с матрицей. Таким образом, за прочность композитного материала преимущественно отвечает структурное состояние матричного материала.

В дисперсно-наполненных полимерных композитах матрица находится в двух основных структурно-фазовых состояниях [102-106]. Часть матрицы формируется по типу ее объемного состояния, эквивалентного не наполненному матричному материалу, другая ее часть находится в состоянии тонких адсорбционных упрочненных пленок.

Применение наполнителей из высокомодульных материалов (маршалит, диабаз, гранитный порошок), хорошо смачиваемых матричным связующим, приводит к эффективному повышению упругих свойств КМ на исследуемом интервале наполнения (рис.3.20-3.23; прил. 2). Такое поведение кривых для различных видов наполнителей объясняется следующими факторами:

1) высокомодульный наполнитель способствует образованию в полимерном композите трехмерной структуры, эффективно передающей внешние усилия на все частицы наполнителя. При этом образуется гетерогенная система «наполнитель-полимер», физико-механические свойства которой выше свойств полимерной матрицы;

2) часть внешней колебательной нагрузки воспринимается частицами наполнителя, обладающими более высоким модулем упругости, чем полимерная матрица;

3) наличие частиц наполнителя в композите приводит к упорядочению и ориентации структуры матрицы, что способствует повышению упругих свойств последней.

При механической обработке полимерных наполненных композитов вследствие механодеструкции материалов происходит нарушение целостности жесткого структурного каркаса, в результате чего КМ теряет способность передавать деформацию упругости. Таким образом, происходит

снижение E_d полимерных наполненных КМ после их механической обработки (рис. 3.21).

Усиление упругих свойств в области низкого наполнения определяется следующими факторами [107-110]:

- наличие частиц наполнителя в полимерном композите приводит к возникновению в структуре КМ внутреннего ван-дер-ваальсового поля, вызывающего упорядочение и ориентацию структуры матрицы, то есть матрица в граничном слое у поверхности дисперсных частиц наполнителя переходит в структурно-упорядоченное состояние;

- в процессе кластерообразования образуется ориентационно-упрочненная фаза матрицы, собственная упругость и жесткость которой выше, чем у объемной матрицы;

- модуль упругости дисперсного наполнителя выше модуля упругости полимерной матрицы, поэтому с ростом φ до 0,3-0,4 упругость всей композитной системы повышается.

Полимерные наполненные КМ помимо колебательных нагрузок могут испытывать различные воздействия (растяжение, сжатие, изгиб и т. д.), а также действие окружающей среды (температура, влажность).

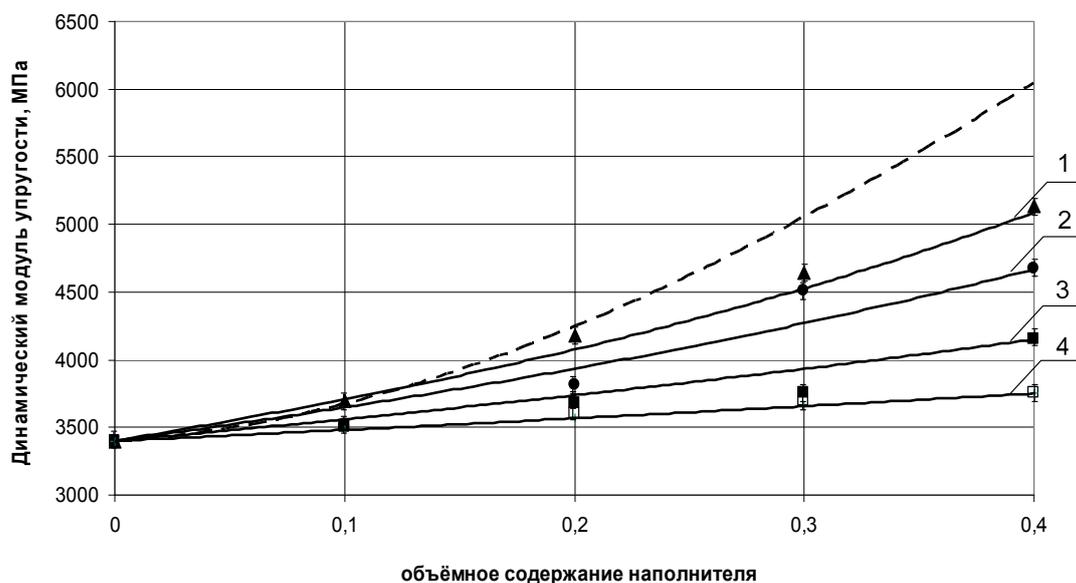


Рис. 3.20. Влияние объемного содержания наполнителей на упругие свойства необработанных КМ (точками отмечены экспериментальные данные; сплошные линии соответствуют уравнению нижнего предела; пунктирная линия – перколяционная модель): 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

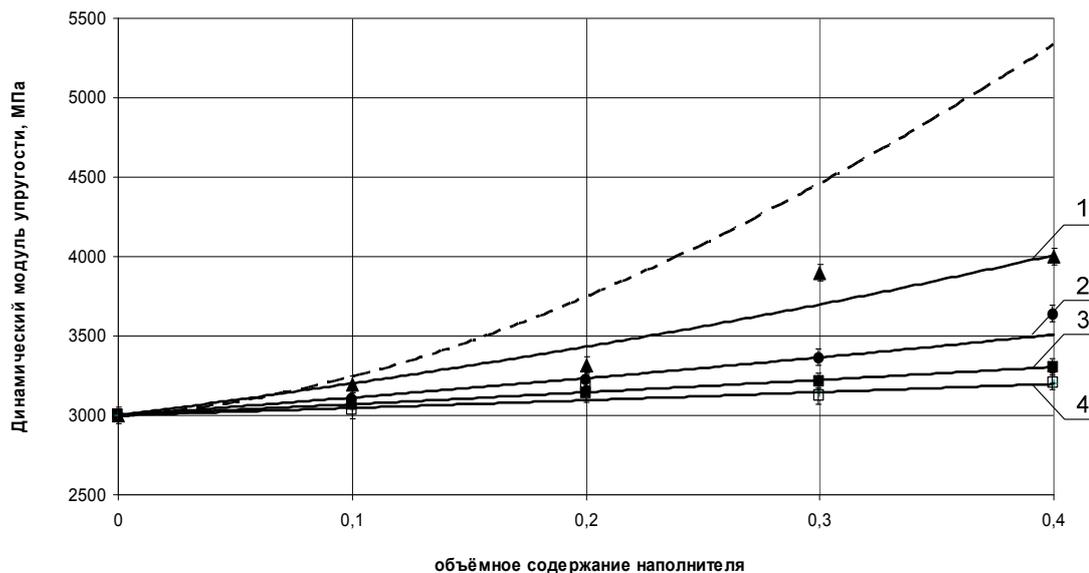


Рис. 3.21. Влияние объемного содержания наполнителей на упругие свойства обработанных КМ (точками отмечены экспериментальные данные; сплошные линии соответствуют уравнению нижнего предела; пунктирная линия – перколяционная модель):
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

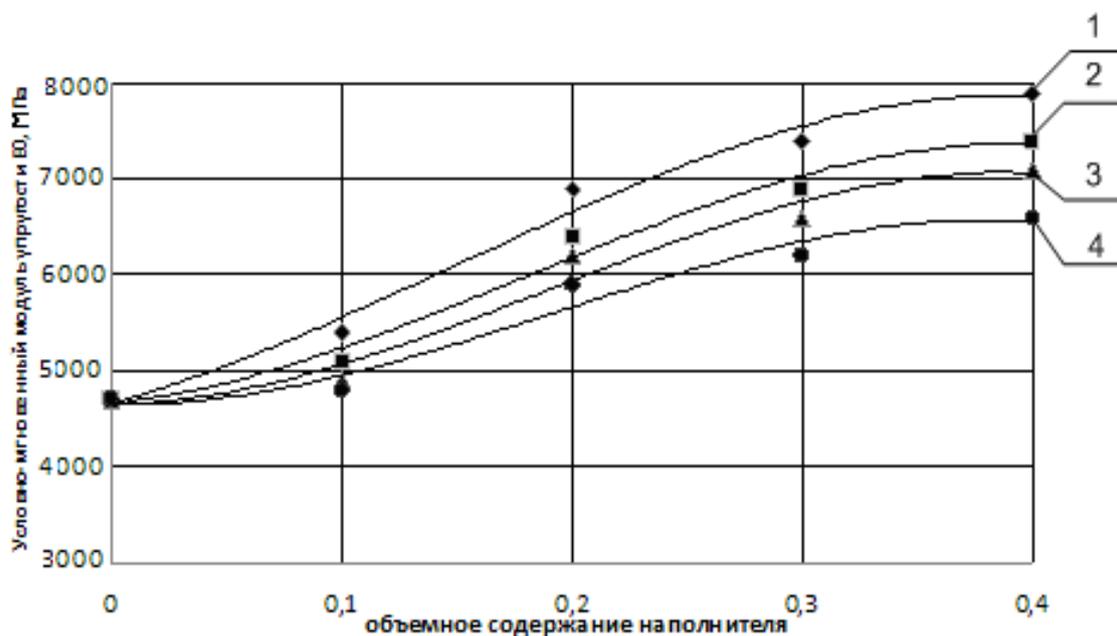


Рис. 3.22. Влияние объемного содержания наполнителей на условно-мгновенный модуль упругости КМ:
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

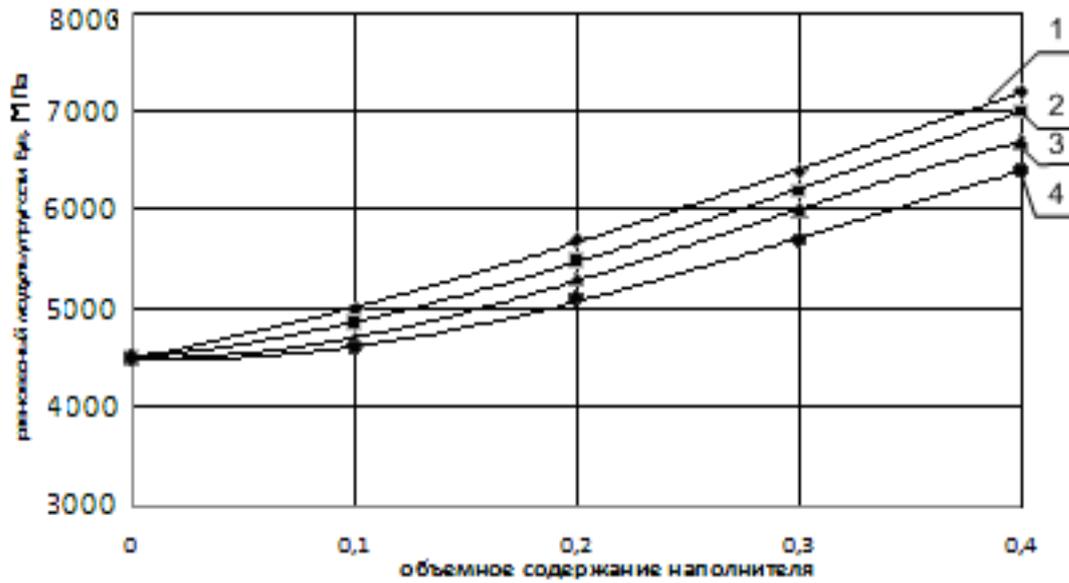


Рис. 3.23. Влияние объемного содержания наполнителей на равновесный модуль упругости КМ:
1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

Исследовали изменение предела прочности при одноосном сжатии $R_{сж}$, предела прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, твердость HB и ударной вязкости A в зависимости от \mathcal{Q} . Результаты экспериментов представлены на рис.3.24-3.26, 3.30-3.36.

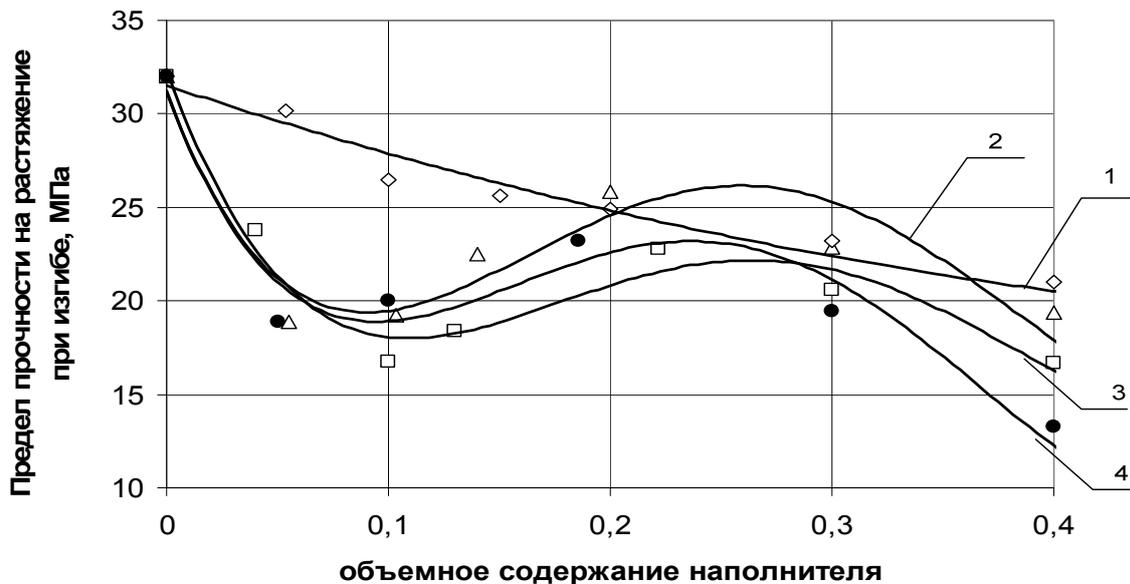


Рис. 3.24. Влияние объемного содержания наполнителей на прочностные свойства КМ:
1 – составы 10-13; 2 – составы 6-9; 3 – составы 2-5; 4 – составы 14-17

В результате введения усиливающего наполнителя в эпоксидную и полиэфирную матрицу у поверхности зоны дисперсного наполнителя возникают остаточные напряжения вследствие различия в термическом расширении наполнителя и полимерной матрицы [111-114].

При изгибе основная часть внешней приложенной нагрузки воспринимается полимерной матрицей, а начальные разрывы возникают в зоне частиц наполнителя. Вследствие этого с ростом объемного содержания усиливающего наполнителя общая изгибная прочность композита падает (3.24-3.26).

При сжатии основная часть подводимой механической энергии рассеивается вследствие ветвления трещин и их торможения частицами наполнителя, что способствует упрочнению полимерного КМ (рис. 3.30-3.31; прил. 2).

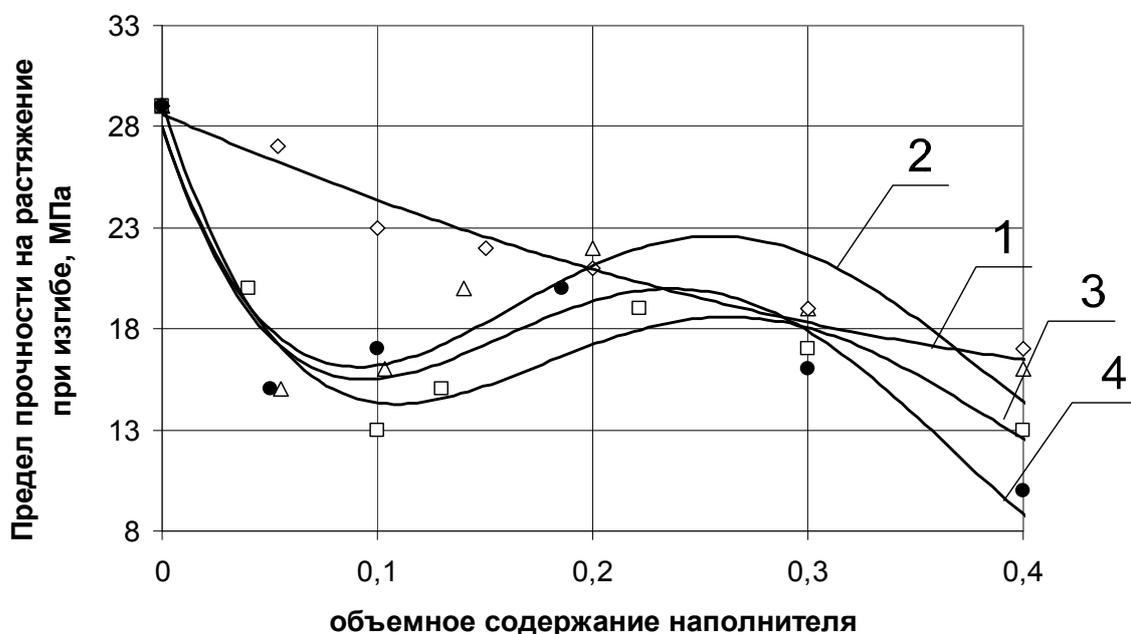


Рис. 3.25. Влияние объемного содержания наполнителей на прочностные свойства КМ:
 1 – составы 27-30; 2 – составы 23-26; 3 – составы 19-22; 4 – составы 31-34

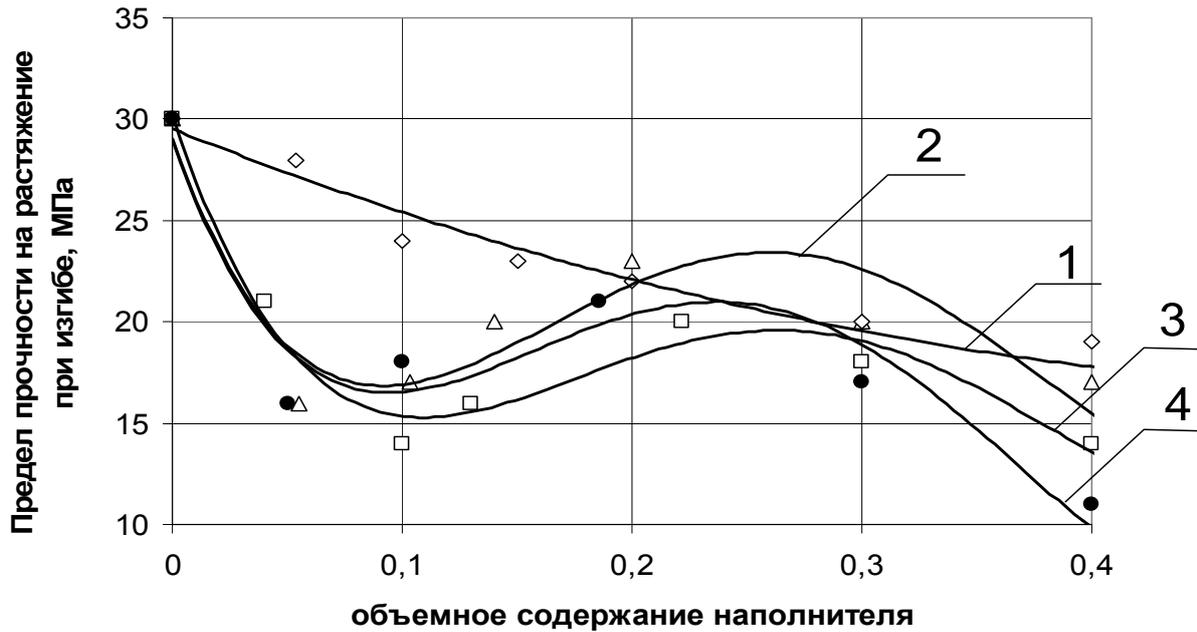


Рис. 3.26. Влияние объемного содержания наполнителей на прочностные свойства КМ: 1 – составы 44-47; 2 – составы 40-43; 3 – составы 36-39; 4 – составы 48-51

Сформировавшаяся трещина при взаимодействии с частицей усиливающего наполнителя распадается на несколько малых трещин (рис.3.29), которые также рассеиваются отдельными частицами наполнителя.

Согласно [4,5], ветвление наблюдается только в тех случаях, когда трещины встречаются с мощными полями сжимающих напряжений. Такое поведение характерно для малонаполненных композитов с объемным содержанием наполнителя менее 0,3.

Для высоконаполненных ($\varphi \geq 0,3$) композитов, эксплуатируемых в условиях сжимающих нагрузок, характерно снижение прочности, т.к. частицы, образующие кластеры, являются концентраторами внутренних напряжений на границе раздела с объемной фазой матрицы.

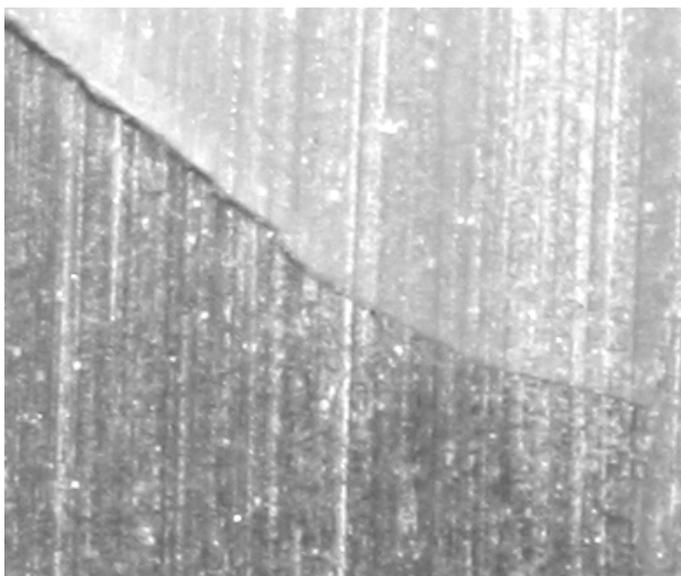


Рис. 3.27. Трещина в образце полимерного КМ (x200):
полиэфирная смола 540 М 888 – 100 мас.ч.; пероксид №1 – 2,5 мас.ч.;
диабаз $\vartheta=0,3$

Дисперсный наполнитель в этом случае является усиливающим, а основным эффектом здесь является наличие экстремума – максимума в показателе прочностных свойств полимерных наполненных КМ.

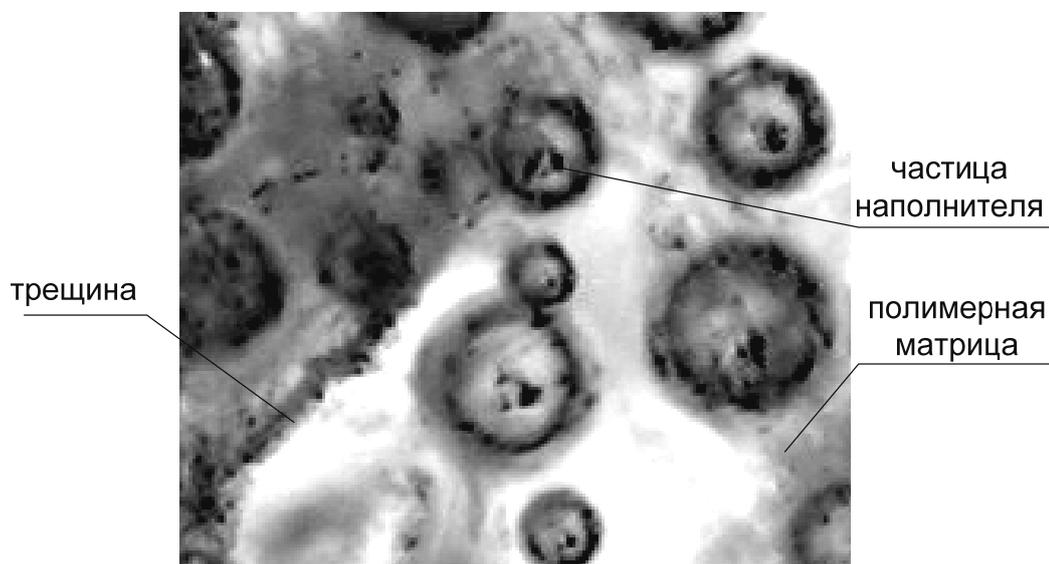


Рис. 3.28. Микроструктура образца,
подвергнутого механической обработке (x200):
ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; маршалит $\vartheta=0,3$

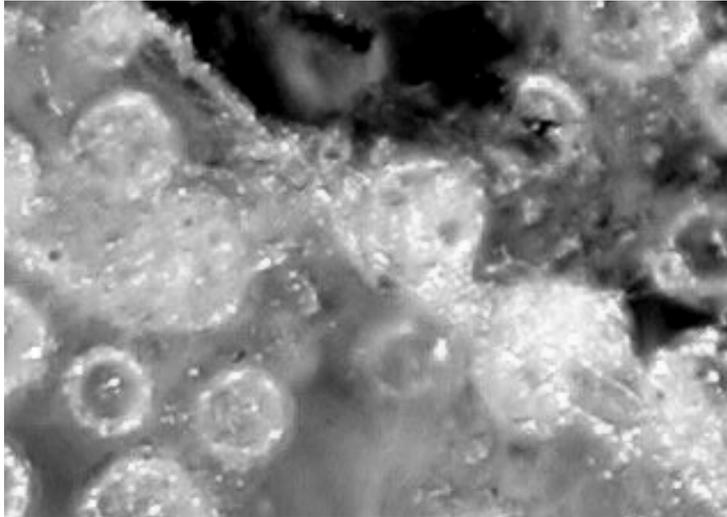


Рис. 3.29. Ветвление трещин в КМ (x200):
 ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; маршалит $\vartheta=0,2$

Максимум прочности при одноосном сжатии сдвигается в сторону больших концентраций при уменьшении дисперсности частиц наполнителя (от диабазов к аэросилу). Этот пик прочности соответствует примерно одинаковой суммарной поверхности раздела фаз, равной 200-250 м² на 1 кг композита (рис. 3.30-3.31).

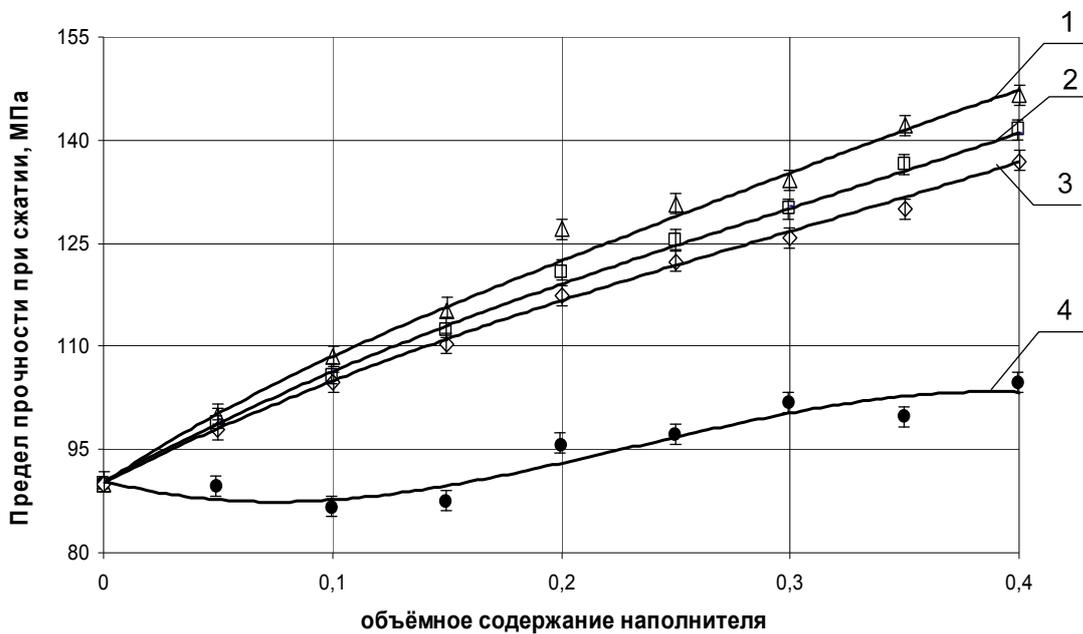


Рис. 3.30. Влияние объемного содержания наполнителей на прочностные свойства необработанных КМ:
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

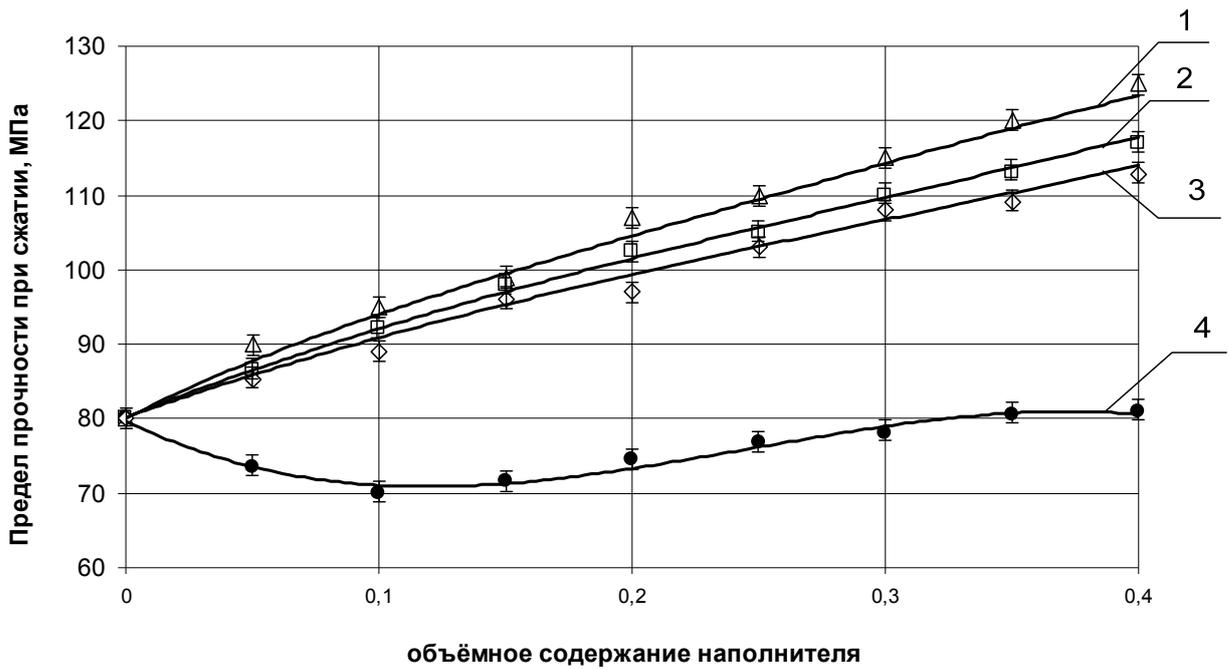


Рис. 3.31. Влияние объемного содержания наполнителей на прочностные свойства обработанных КМ:
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

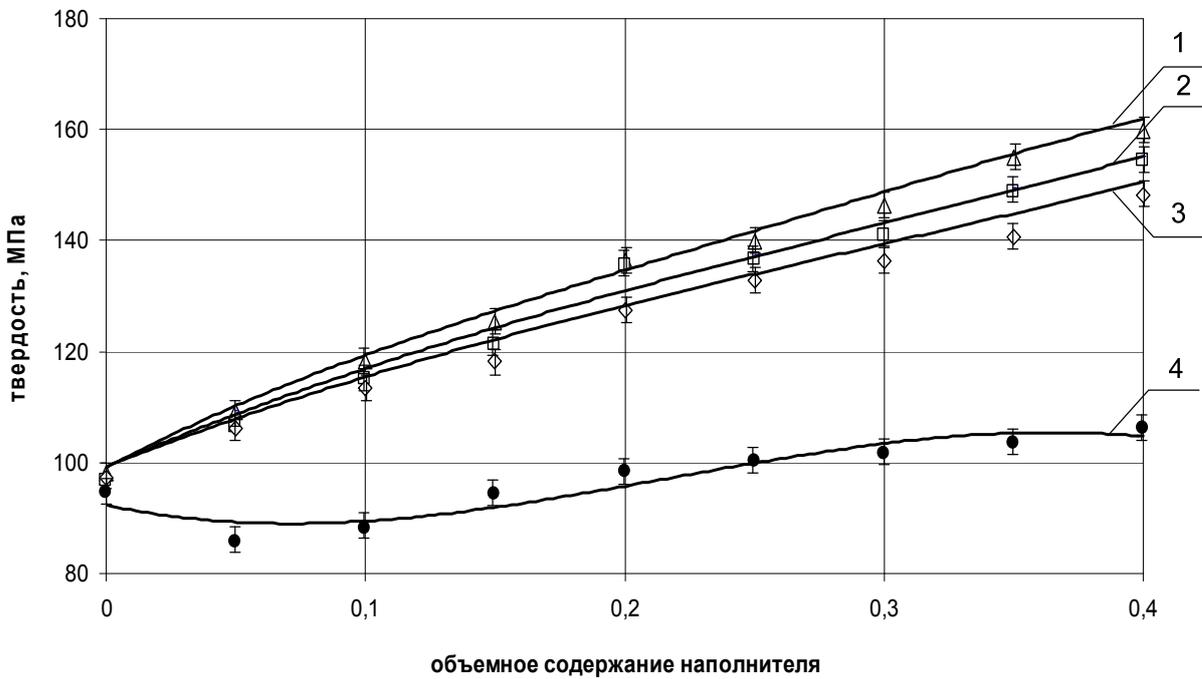


Рис. 3.32. Влияние объемного содержания наполнителей на твердость по Бринеллю необработанных КМ:
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

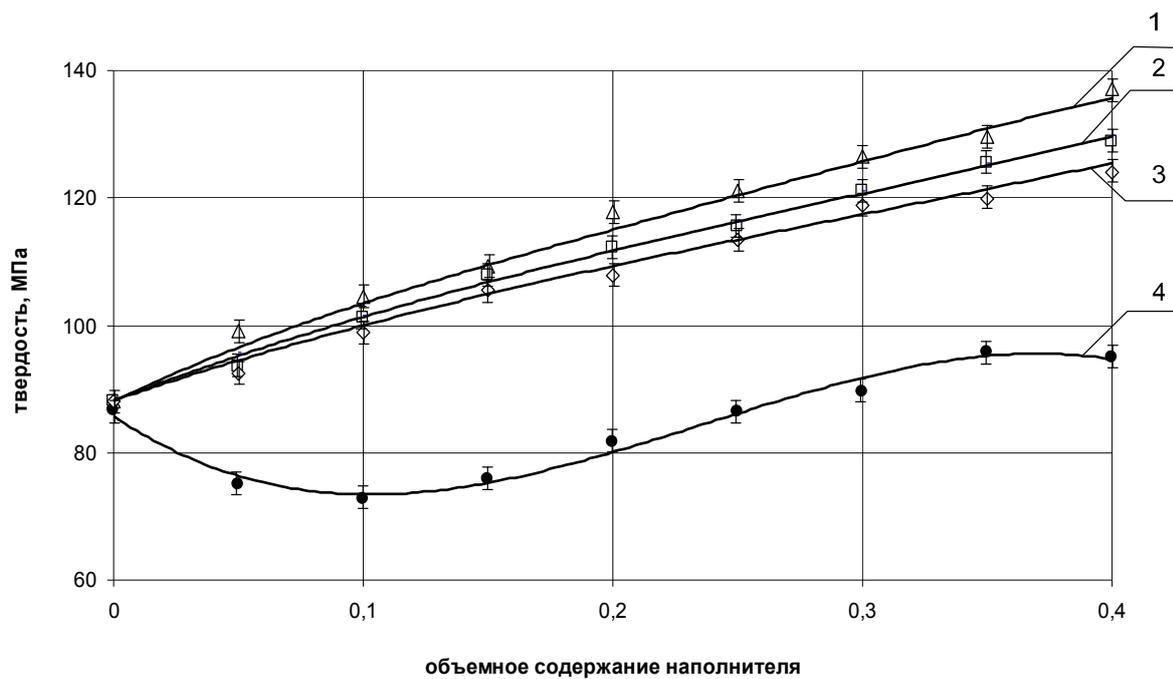


Рис. 3.33. Влияние объемного содержания наполнителей на твердость по Бринеллю обработанных КМ:
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

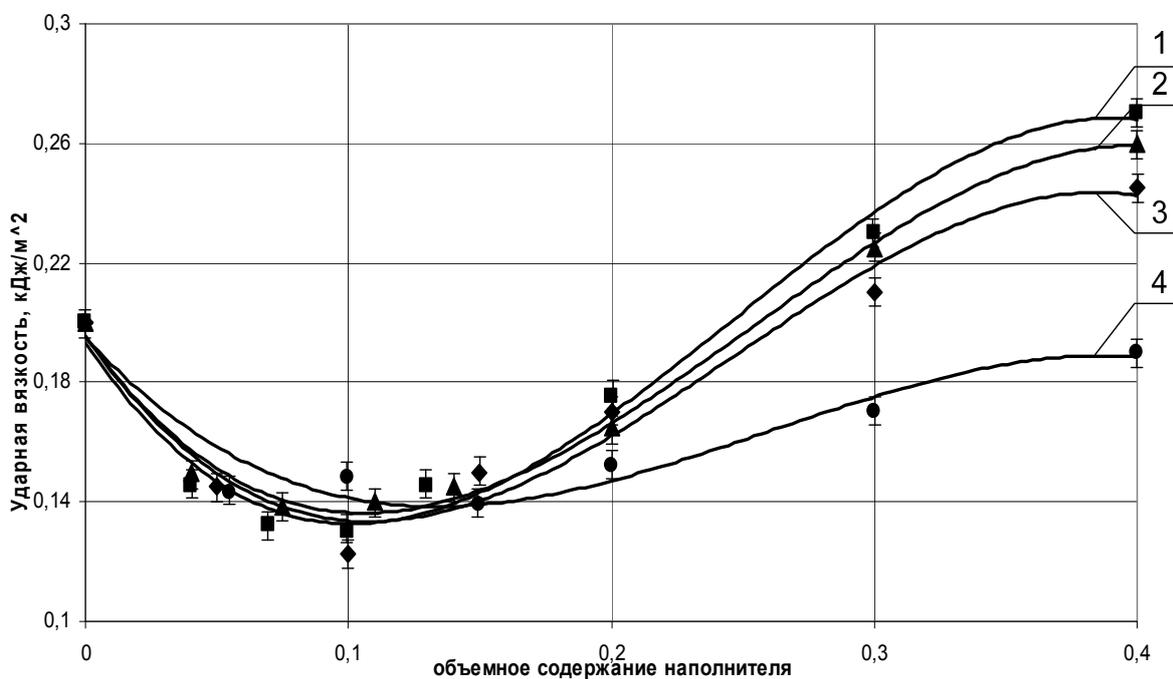


Рис. 3.34. Влияние объемного содержания наполнителей на ударную вязкость КМ:
 1 – составы 6-9; 2 – составы 2-5; 3 – составы 10-13; 4 – составы 14-17

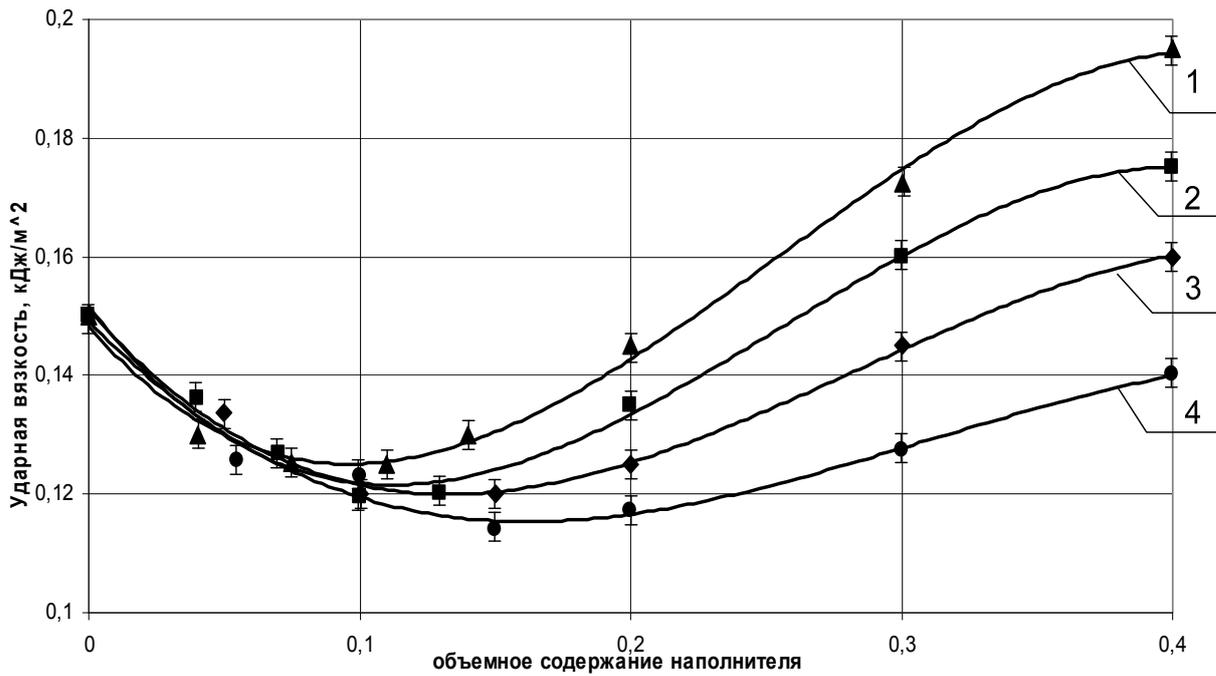


Рис. 3.35. Влияние объемного содержания наполнителей на ударную вязкость КМ:
 1 – составы 23-26; 2 – составы 19-22; 3 – составы 27-30; 4 – составы 31-34

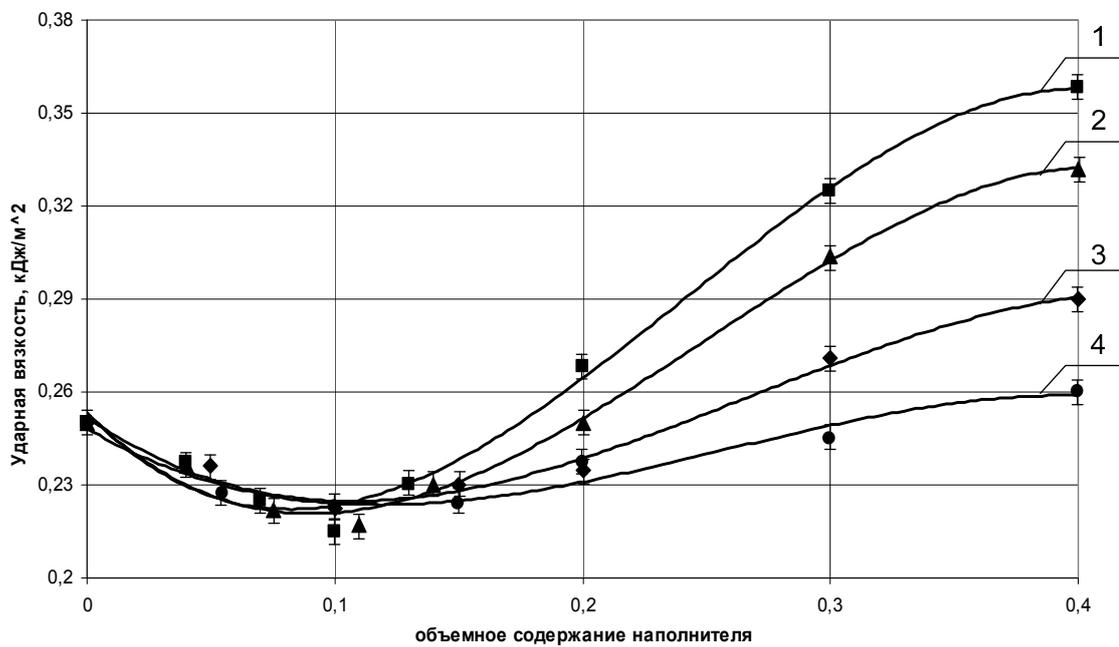


Рис. 3.36. Влияние объемного содержания наполнителей на ударную вязкость КМ:
 1 – составы 40-43; 2 – составы 36-39; 3 – составы 44-47; 4 – составы 48-51

Прочность полимерного композита зависит от общего количества цепочек, пересекающих поверхность разрушения. При механической обработке рассматриваются все цепочки, пересекающие поверхность разрушения, как входящие в состав жесткого структурного каркаса, так и свободно свисающие. В ходе экспериментальных исследований установлено, что у образцов, испытанных до и после механической обработки, наблюдается эквивалентный характер изменения показателей (рис. 3.30-3.33).

Идентифицирована зависимость между твердостью по Бринеллю и твердостью по Гепплеру машиностроительных полимерных наполненных КМ (рис.3.32-3.33).

Одной из важнейших характеристик полимерных КМ является ударная вязкость. Установлено, что при $\vartheta = 0 \div 0,15$ происходит снижение ударной вязкости, связанное с возникновением трещин на границе раздела наполнителя и полимерной матрицы [4]. В связи с различием коэффициентов линейного термического расширения наполнителя и полимерной матрицы, внутри композитного материала возникают остаточные напряжения, приводящие к снижению ударной вязкости полимерного КМ. Дальнейшее увеличение ϑ приводит к росту ударной вязкости, связанному с возникновением кластерных образований и ростом прочности КМ (рис.3.34-3.36).

Так как плотность сшивки термореактивных полимеров в граничных слоях у поверхности наполнителя ниже, чем в ненаполненном полимере, то происходит уменьшение степени отверждения полимерного КМ [33].

С увеличением содержания наполнителя толщина прослойки полимерной матрицы между зёрнами уменьшается. При начальных степенях наполнения в состоянии граничных слоев вовлекается все большее количество «объемного» полимера, но эффективная толщина граничного слоя, в котором заторможена сегментальная подвижность, при этом не меняется. Поскольку при $\vartheta = 0,34$ весь полимер переходит в состояние граничного слоя, то дальнейшее наполнение приводит к перекрыванию слоев и уменьшению их толщины. При этом наблюдается ограничение групповой и сегментальной подвижности в граничных слоях полимера, причем более интенсивно в случае высокомолекулярных наполнителей (диабаз, маршалит, гранитный порошок), что приводит к снижению прочностных показателей.

Одним из важных факторов, влияющих на свойства наполненных полимерных композитов, является дисперсность наполнителя [37, 51, 115-122].

С целью определения влияния удельной поверхности наполнителя на физико-механические свойства композитов, исследовали изменение динамического модуля упругости, твердости, предела прочности при одноосном сжатии и прочности на растяжение при изгибе в зависимости от дисперсности наполнителя. Произвели наполнение эпоксидного, полиэфирного, эпоксиполиуретанового композитов маршалитом, диабазом, цементом, аэросилом (составы № 2-17, 19-34, 36-51) с удельными

поверхностями: 96 м²/кг, 192 м²/кг, 384 м²/кг, 762 м²/кг. Объемное содержание наполнителей оставалось постоянной величиной, равной $\mathcal{G} = 0,4$.

Установлено, что введение наполнителя с различной дисперсностью существенно изменяет физико-механические свойства полимерного наполненного КМ. Из полученных графиков зависимостей следует, что с увеличением удельной поверхности наполнителей происходит линейный рост динамического модуля упругости, твердости и предела прочности при одноосном сжатии (рис. 3.37-3.39).

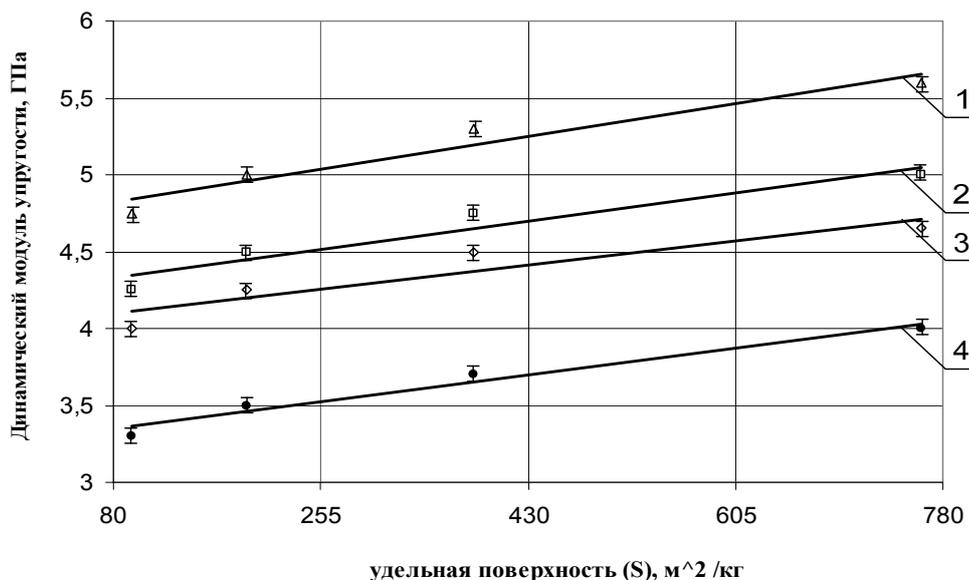


Рис. 3.37. Влияние дисперсности наполнителей на упругие свойства КМ: 1 – состав 9; 2 – состав 5; 3 – состав 13; 4 – состав 17

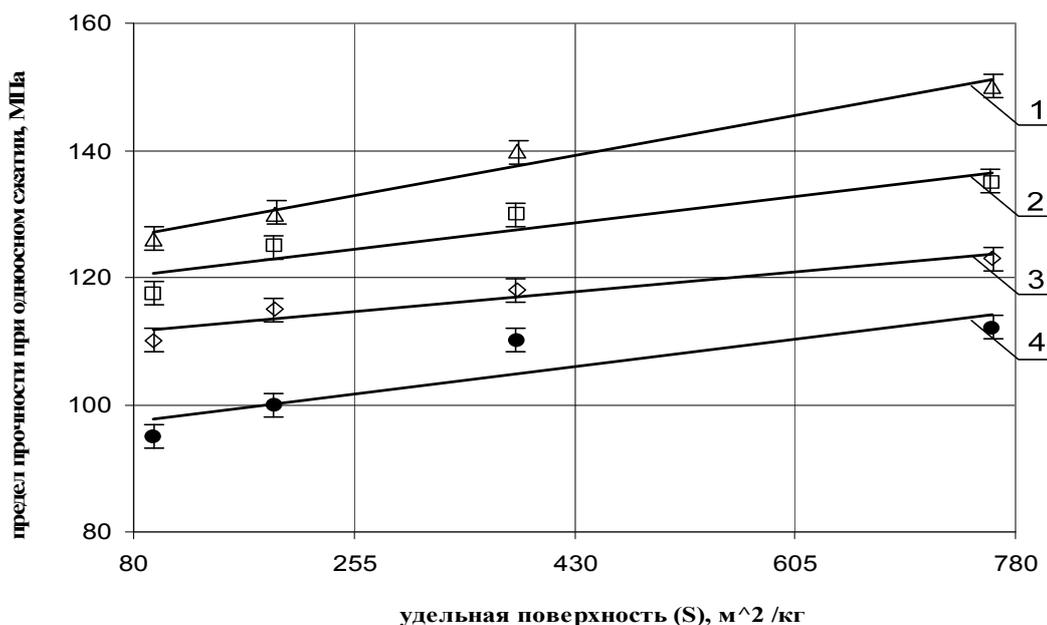


Рис. 3.38. Влияние дисперсности наполнителей на прочностные свойства КМ: 1 – состав 9; 2 – состав 5; 3 – состав 13; 4 – состав 17

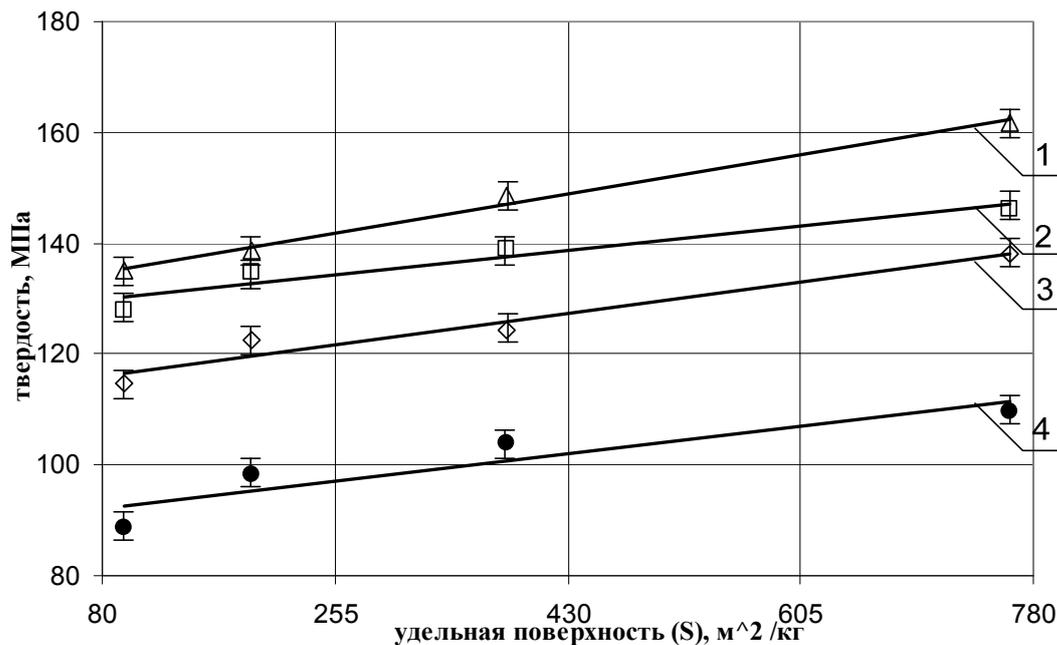


Рис. 3.39. Влияние дисперсности наполнителей на прочностные свойства КМ:
1 – состав 9; 2 – состав 5; 3 – состав 13; 4 – состав 17

Данный эффект объясняется тем, что по мере роста дисперсности наполнителя снижается пористость структуры композитного материала, соответственно усиливается упругость и ослабляется демпфируемость материала. Это свидетельствует о том, что тонкодисперсный наполнитель наиболее эффективен в усилении прочности эпоксидных, полиэфирных и эпоксиполиуретановых композитов.

Установлено, что внутренние напряжения напрямую не зависят от размеров частиц, но энергия деформации вокруг крупных частиц, обусловленная остаточными напряжениями, гораздо выше, чем около более мелких. Увеличение размеров частиц приводит к уменьшению их поверхностной энергии, что влечет за собой уменьшение энергии разрушения и тем самым приводит к снижению прочности полимерного КМ, что соответствует концепции Девиджа-Грина [4].

Определили влияние механической обработки на физико-механические свойства дисперсно-наполненных КМ, в соответствии с методами, приведенными в Главе 2 (рис.3.21, 3.31, 3.33; прил. 2).

Установлено, что физико-механические свойства необработанных образцов выше, чем обработанных. С увеличением технологических параметров механической обработки происходит снижение прочностных и упругих характеристик КМ.

В этой связи механическую обработку осевыми инструментами эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов следует

вести с такими геометрическими параметрами режущего инструмента и режимами резания (V , S , t), при которых $R_a=2-8$ мкм.

При механической обработке термореактивных наполненных композитов происходит деструкция полимерного вяжущего и разрушение дисперсного наполнителя (рис 3.40). В результате этих процессов образуется деструктировано-диспергированный слой, ухудшающий эксплуатационные характеристики изделий из полимерных композитов.

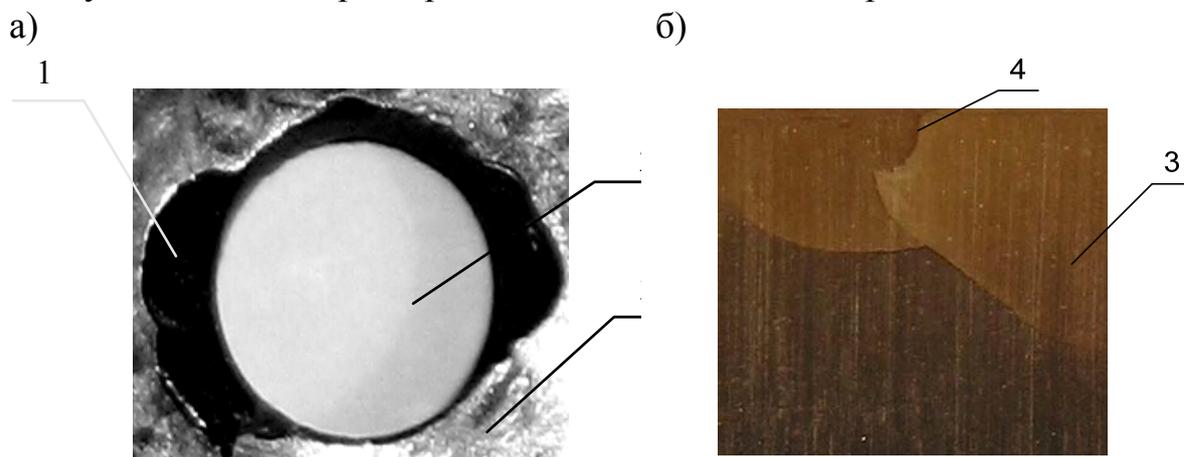


Рис. 3.40. Внешний вид поверхностей КМ, полученных механической обработкой (а) на входе сверла (x3) и (б) на внутренней поверхности (x20) (ЭД – 20 – 100 мас.ч., ПЭПА – 11 мас.ч., ДБФ – 5 мас.ч., маршалит $\mathcal{Q}=0,3$): 1 – сколы; 2 – отверстие $\square 15$; 3 – полимерный КМ; 4 – трещина

Деструктированный слой образуется под действием механических напряжений, теплоты и окислительных процессов поверхностного слоя, претерпевшего механохимические превращения полимера и диспергирование наполнителя.

При контактном взаимодействии полимера с металлом (инструментом) возбуждается механохимический процесс, повышающий кинетическую активность системы. Данный процесс протекает с массовым образованием свободных радикалов за счет разрыва ковалентных связей макромолекул.

В процессе механической обработки контакт ювенильных поверхностей металла и полимера, приводит, с одной стороны, к пластификации металлической поверхности, а с другой – к углублению процесса деструктирования макромолекул, вызываемого каталитическим действием металла.

Наличие кислорода резко изменяет механизм и скорость деструктивных процессов [123, 124]. Интенсивные окислительные процессы, происходящие в зоне обработки, углубляют процесс деструкции полимера.

В результате деструкции в зоне механической обработки образуются продукты деструкции – это метиленовая, гидроксильная, карбонильная и

альдегидная группы, углеводные комбинации, являющиеся поверхностно-активными веществами, вызывающие специфический вид износа инструмента. Также выделяются токсичные летучие вещества.

Изменение эксплуатационных характеристик поверхностного слоя эпоксидного, полиэфирного, эпоксиполиуретанового композита зависит от глубины деструкции. На величину и интенсивность деструктивных процессов влияет главным образом теплота, выделяемая в зоне резания и механическое воздействие, приводящее к разрыву молекулярных цепей полимера [125].

При механической обработке полимерных композитов под действием больших локальных механических напряжений, высокой температуры, превышающей теплостойкость органических составляющих материала, и интенсивных окислительных процессов происходит деструкция полимера, приводящая к ухудшению эксплуатационных свойств поверхностного слоя материала. Продукты деструкции, являющиеся ПАВ (поверхностно-активными веществами), ускоряют процесс изнашивания режущего инструмента.

На рис.3.41 представлена структура поверхностного слоя терморреактивного композита после механической обработки.

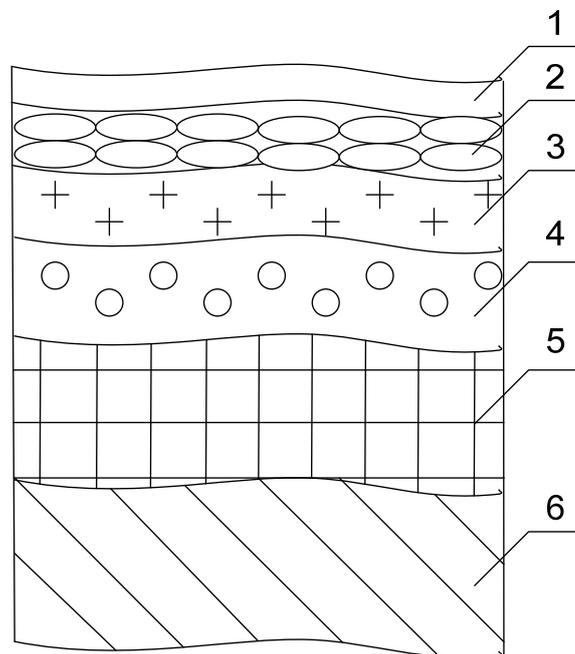


Рис.3.41. Схема деструктированного поверхностного слоя терморреактивного КМ: 1 – адсорбированная пленка; 2 – модифицированный слой; 3 – уплотненный, собственно деструктированный слой; 4 – раздробленный и разрыхленный слой; 5 – переходной слой; 6 – исходная структура материала

Установлено, что значительное влияние на качество получаемых изделий из терморезактивных композитов оказывает \mathcal{G} и $S_{уд}$.

При малом $\mathcal{G} \leq 0,1$ свойства эпоксидного, полиэфирного и эпоксиполиуретановых КМ, в основном, определяются матричным материалом, обладающим значительной хрупкостью. В связи со значительной механо-деструкцией низконаполненных КМ диапазон режимных параметров осевых инструментов варьируется в пределах: а) для операции фрезерования – $n = 750 \div 1500$ об/мин (n – частота вращения шпинделя) и $S_z = 0,1 \div 0,2$ мм/об (S_z – подача на зуб фрезы); б) для операции сверления – $n = 250 \div 1000$ об/мин и $S = 0,1 \div 0,2$ мм/об. Шероховатость получаемых поверхностей удовлетворительна ($R_a = 6,0 - 8,5$ мкм), а износ инструмента значителен.

При $\mathcal{G} = 0,1 \div 0,16$ вследствие неоднородности строения терморезактивных композитов и различной твердости их составных частей невозможно достижение низкой шероховатости ($R_a = 6,5 - 9,0$ мкм). При этом сужается диапазон режимных параметров: а) для операции фрезерования – $n = 750 \div 1000$ об/мин и $S_z = 0,1 \div 0,2$ мм/об; б) для операции сверления – $n = 250 \div 500$ об/мин и $S = 0,1 \div 0,2$ мм/об.

При $\mathcal{G} > 0,16$ образуется первичный перколяционный каркас, приводящий к росту прочности эпоксидных, полиэфирных и эпоксиполиуретановых композитов. Расширяется диапазон эффективных режимных параметров: а) для операции фрезерования – $n = 750 \div 2000$ об/мин и $S_z = 0,1 \div 0,4$ мм/об; б) для операции сверления – $n = 250 \div 1400$ об/мин и $S = 0,1 \div 0,28$ мм/об. Шероховатость поверхностей – $R_a = 5,5 - 8,0$ мкм. В связи с увеличением количества отводимой теплоты стружкой и непрерывного характера механической обработки износ инструмента уменьшается.

Большое влияние на качество получаемых изделий из полимерных композитов оказывает $S_{уд}$. С ростом удельной поверхности качество обработанных поверхностей улучшается (снижается шероховатость, уменьшается количество сколов и трещин), а также снижается износ инструмента. Данный эффект обусловлен увеличением прочностных и упругих свойств, снижением внутренних напряжений.

Установлено, что полученные механической обработкой эпоксиполиуретановые композиты обладают более высокими физико-механическими свойствами и качеством обработанных поверхностей, в отличие от эпоксидных и полиэфирных композитов (рис. 3.42-3.47). Данный эффект обусловлен более высокими прочностными, упругими и адгезионными свойствами эпоксиполиуретановых композитов.

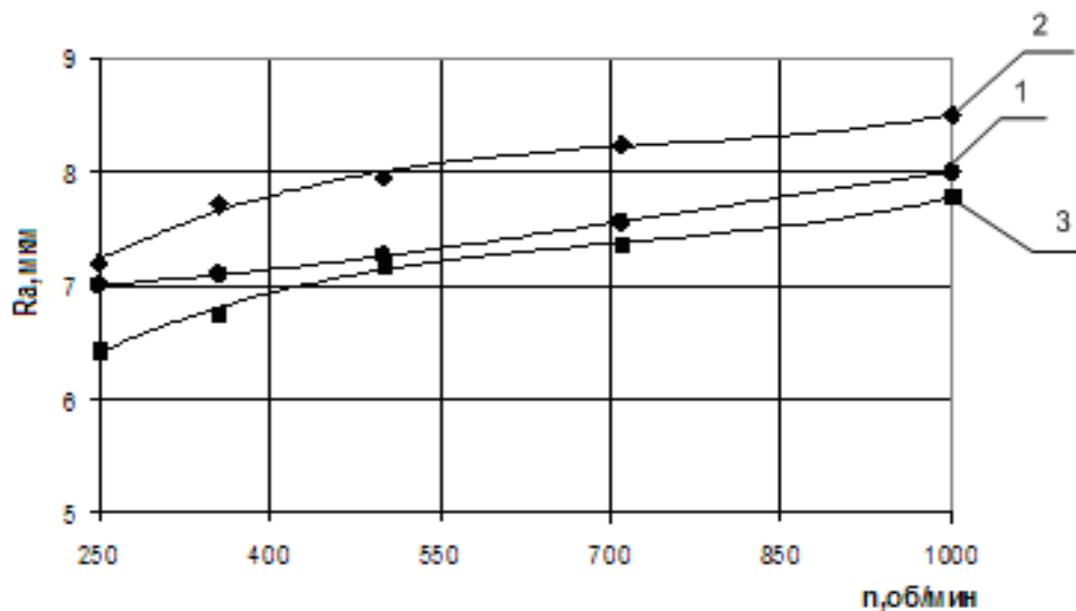


Рис.3.42. Влияние скорости резания при сверлении на качество полимерного КМ:
 1 – состав №2; 2 – составы №3; 3 – составы №4

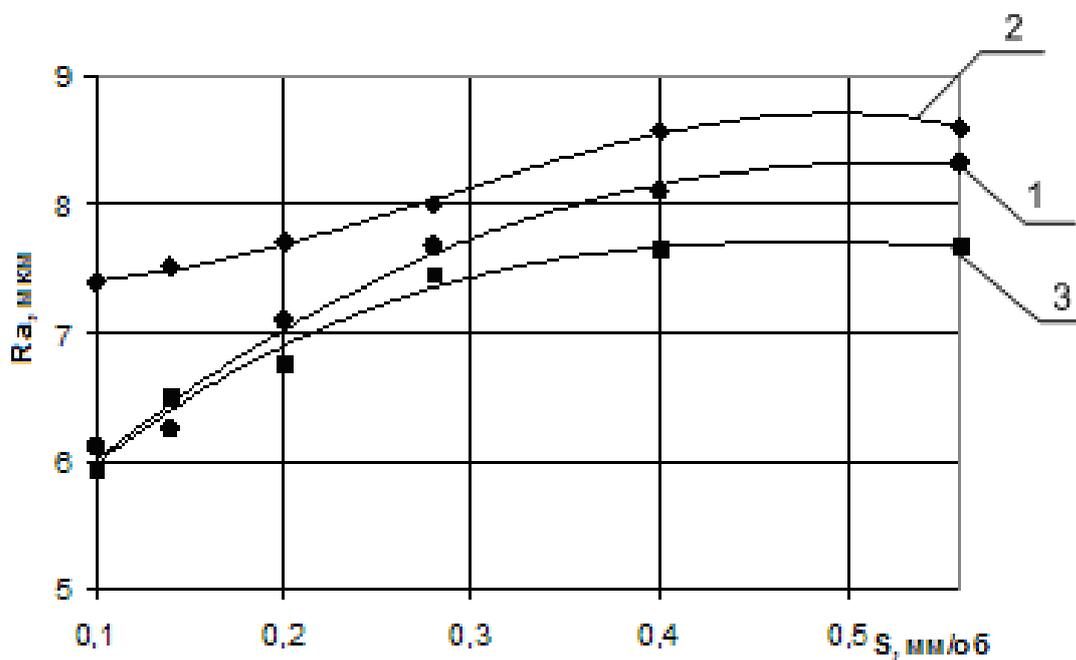


Рис. 3.43. Влияние подачи при сверлении на качество полимерного КМ:
 1 – состав №2; 2 – составы №3; 3 – составы №4

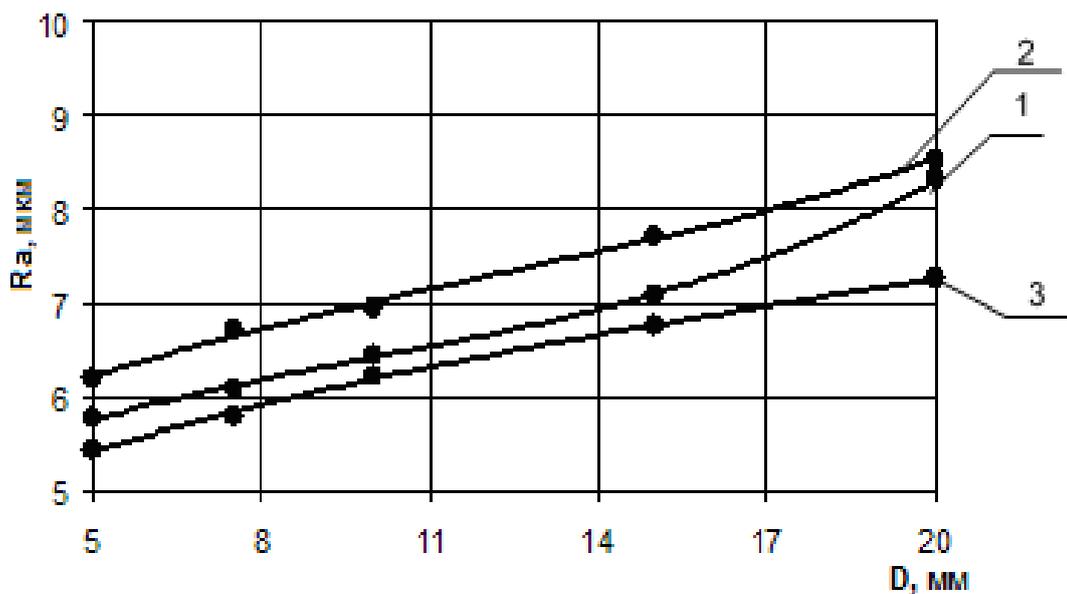


Рис.3.44. Влияние глубины резания при сверлении на качество полимерного КМ: 1 – состав №2; 2 – составы №3; 3 – составы №4

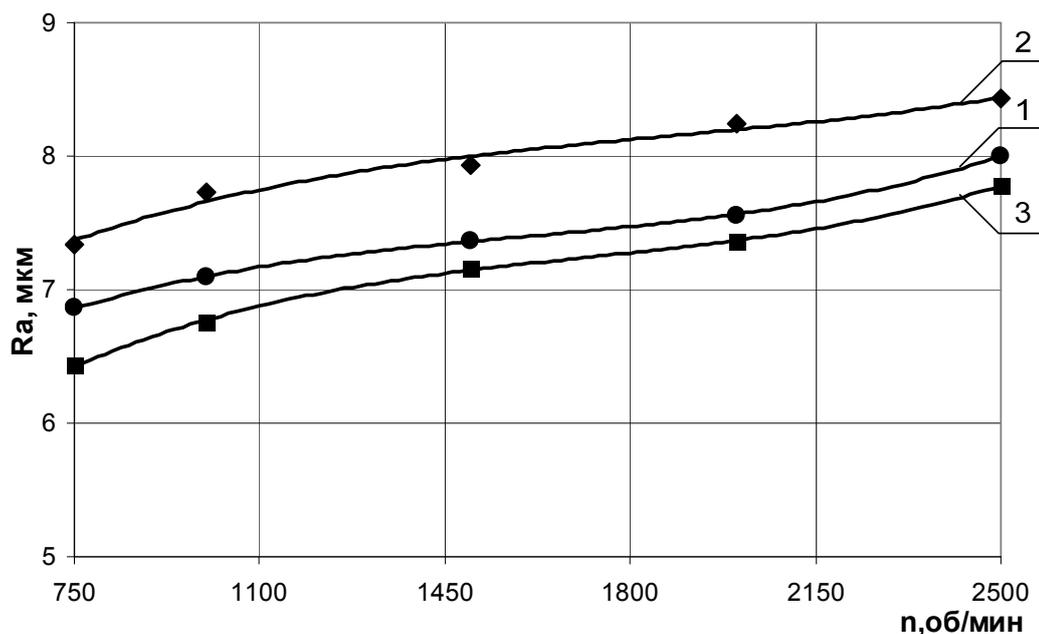


Рис.3.45. Влияние скорости резания при фрезеровании на качество полимерного КМ:
1 – состав №2; 2 – составы №3; 3 – составы №4

В этой связи механическую обработку эпоксидных и полиэфирных композитов следует вести при малых подачах и высоких скоростях резания, в отличие от эпоксиполиуретановых КМ.

В ходе теоретико-экспериментальных исследований установлено, что эпоксидные композиты, наполненные гранитным порошком ($\mathcal{G}=0,4$)

обладают высокими физико-механическими ($E_d=5,3$ ГПа, $R_{сж}=151,2$ МПа, $HB_{бр}=166,5$ МПа, $R_{изг}=23$ МПа, $A=0,297$ кДж/м²), технологическими свойствами ($n = 1500$ об/мин, $S_z = 0,20$ мм/об) и качеством обработанных поверхностей ($R_a = 7-8$ мкм). Введение в КМ полиамидного волокна ($\mathcal{S}=0,02$) повышает их упругие (E_d на 19%), прочностные ($R_{сж}$ на 8%, $HB_{бр}$ на 7%, A на 15%), технологические (S_z на 42%) свойства и качество обработанных поверхностей (снижение R_a на 9%).

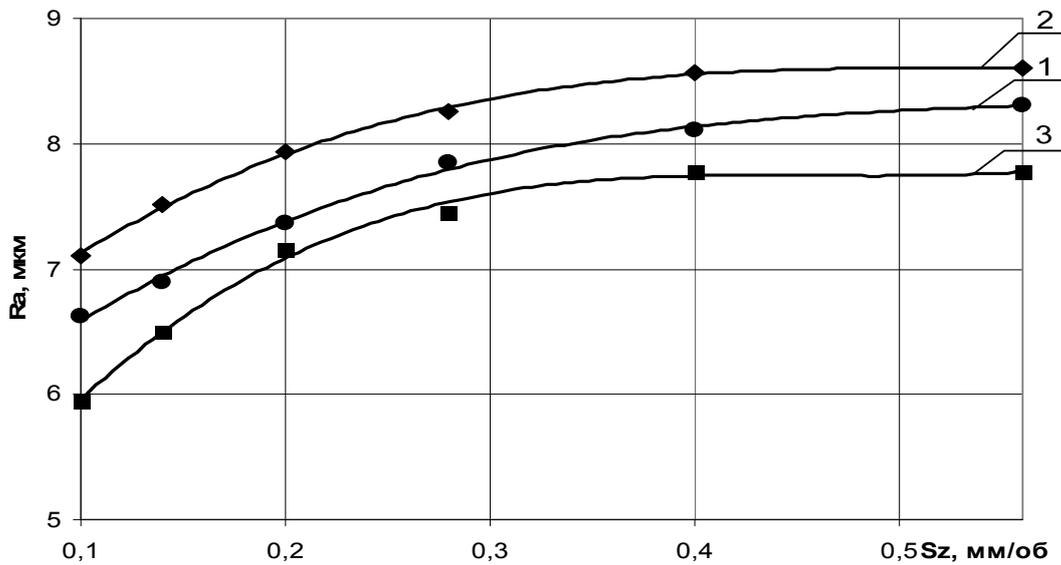


Рис.3.46. Влияние подачи при фрезеровании на качество полимерного КМ:
1 – состав №2; 2 – составы №3; 3 – составы №4

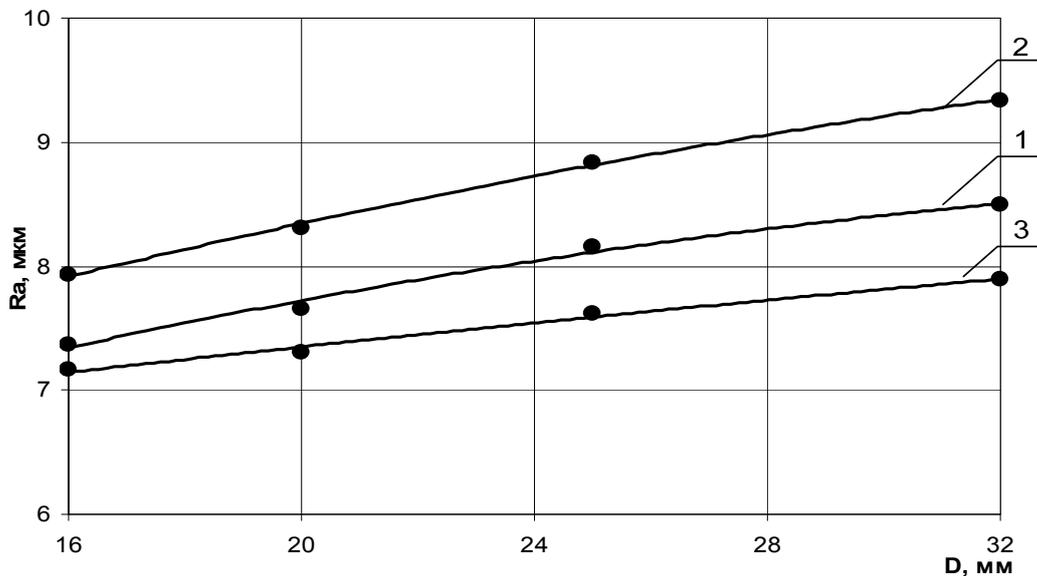


Рис.3.47. Влияние глубины резания при фрезеровании на качество полимерного КМ:
1 – состав №2; 2 – составы №3; 3 – составы №4

Таким образом, введение дисперсных наполнителей в КМ позволяет, с одной стороны, улучшить прочностные, упругие и технологические свойства полимерных КМ, увеличить термостойкость, снизить стоимость получаемых материалов, а с другой – ухудшает ряд показателей: ударную вязкость, предел прочности на растяжение при изгибе. Установлено, что эпоксиполиуретановые наполненные композиты обладают более высокими прочностными и технологическими показателями, в отличие от эпоксидных и полиэфирных композитов.

3.3. Влияние агрессивных сред на физико-механические, технологические свойства и качество полимерных композиционных материалов

Одним из специфических свойств терморезистивных композитов как конструкционных материалов является их водопоглощение, что приводит, в свою очередь, к изменению физико-механических и технологических свойств, а порой к изменению размеров и формы готовых изделий [126-128]. Водопоглощение полимерных композитов зависит от многих факторов: видов полимерного связующего и дисперсности наполнителя, степени наполнения, формы, размера и взаимного расположения частиц наполнителя, технологии изготовления, длительности увлажнения, состояния поверхности, остаточных напряжений.

Вода проникает в материал вследствие нарушения его структурной сплошности, за счет имеющихся дефектов, к числу которых следует отнести: микропоры, трещины, капилляры, полости, меж- и внутримолекулярные «дырки» [128]. Эти дефекты присущи терморезистивным композитам, обладающим гетерогенной структурой.

Микроскопический анализ показывает, что дисперсные частицы наполнителя окружены воздушными полостями и включениями, соединенными между собой и образующими непрерывные пути на поверхности раздела. В этой связи влага легко мигрирует по системе этих включений.

На процесс поглощения существенно влияет время. Вначале происходит заполнение водой свободных мест в материале, не заполненных связующим. На этом этапе преобладают капиллярные силы, и процесс водопоглощения происходит достаточно интенсивно. Далее поглощение воды происходит главным образом диффузионным путем и более медленно, чем при капиллярном поглощении.

Водопоглощение влияет на прочностные и упругие свойства материала, на изменение размеров и формы изделий, на диэлектрические характеристики. Степень влияния оценивается коэффициентами хими-

ческой стойкости КМ $k_{m.упр}$, $k_{m.сж}$, $k_{m.НВ}$ (степень сохранения упругости и прочности исследуемого материала).

$$k_{m.сж} = \frac{R_{сж.м}}{R_{сж.исх}}, \quad (3.1)$$

$$k_{m.НВ} = \frac{НВ_{бр.м}}{НВ_{бр.исх}}, \quad (3.2)$$

$$k_{m.упр} = \frac{E_{д.м}}{E_{д.исх}}, \quad (3.3)$$

где $R_{сж.м}$, $НВ_{бр.м}$, $E_{д.м}$ – предел прочности при одноосном сжатии, твердость и динамический модуль упругости после помещения КМ в агрессивную жидкость;
 $R_{сж.исх}$, $НВ_{бр.исх}$, $E_{д.исх}$ – предел прочности при одноосном сжатии, твердость и динамический модуль упругости исходного полимерного КМ.

Если длительность водопоглощения незначительна, то после высушивания прочностные характеристики материала практически восстанавливаются. Величина коэффициентов $k_{m.упр}$, $k_{m.сж}$, $k_{m.НВ}$ зависит от формы и размеров образцов, плотности структуры и характера распределения агрессивной среды по объему образца [129]. Также коэффициенты стойкости зависят от физико-химических характеристик исходного олигомера (эпоксидной и полиэфирной смолы), наполнителя и отвердителей, а также от способа их совмещения и механизма отверждения данных полимеров. Поэтому величины коэффициентов $k_{m.упр}$, $k_{m.сж}$, $k_{m.НВ}$ достаточно условны и пригодны только для сравнительной оценки химического сопротивления различных материалов.

Наиболее стойкими являются композиты, отвержденные по полимеризационному механизму. Коэффициенты стойкости антикоррозионных материалов и изделий равны 0,8-0,95. Они увеличиваются с ростом степени наполнения композитов минеральными наполнителями и с увеличением степени совместимости компонентов, что подтверждается результатами экспериментов [15].

Сравнительный анализ результатов экспериментов показал (рис. 3.48-3.53, табл. 3.1), что чем меньше продиффундировало агрессивной жидкости в образец (низкая степень массопоглощения), тем выше оказывается величина напряжения, которую способен выдержать образец до разрушения.

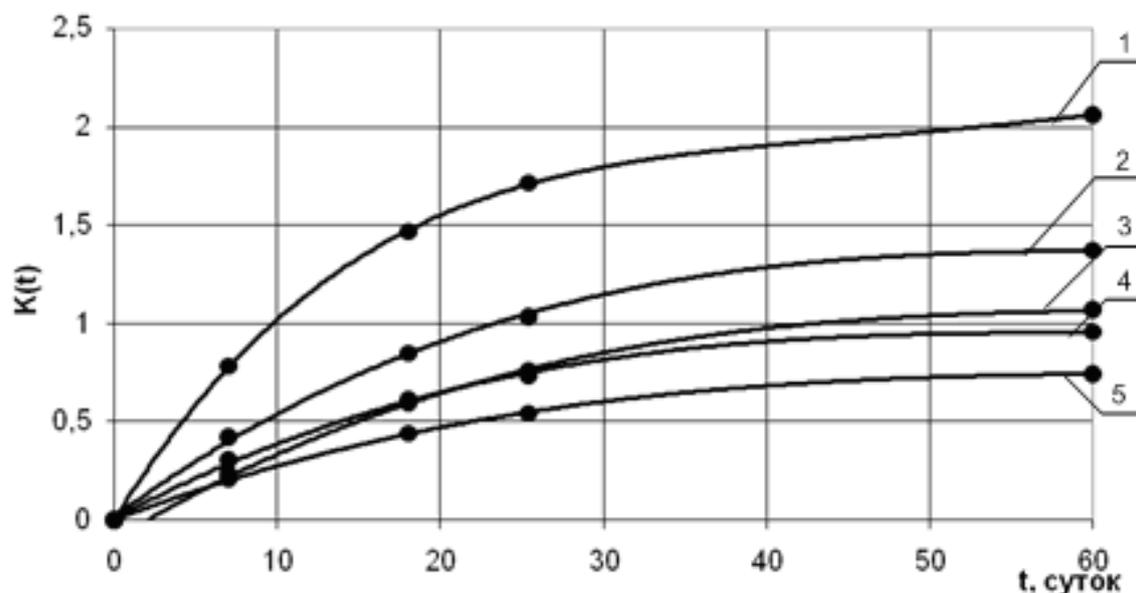


Рис.3.48. Кинетика массопоглощения необработанных КМ в воде:
 1 – состав №35; 2 – состав №47; 3 – состав №51; 4 – состав №39;
 5 – состав №43

Установлено, что модифицированный двухкомпонентной добавкой эпоксидный композит имеет массопоглощение на 5-15 % меньше, чем исходный КМ.

Кинетика процесса свидетельствует об ограниченном массопоглощении (рис.3.48-3.53), что видно по временной стабилизации и определенной глубине проникновения среды.

В случае применения СОЖ при механической обработке процесс водопоглощения усиливается (табл. 3.1). Несмотря на малое время контакта поверхности детали с СОЖ, процесс водопоглощения проходит активно, что потребует применения дополнительной операции: сушки изделия из термореактивного композита после механической обработки. При длительном контакте КМ с СОЖ происходит некоторое снижение (на 10-20%) их прочностных показателей, что связано с распадом химических связей матрицы и протеканием окислительных процессов деструкции. В дальнейшем наблюдается как межкристаллитная, так и межмолекулярная диффузия, в зависимости от диффузионной подвижности среды

Изменение массопоглощения полимерного КМ

Вид композита	Наполнитель	необработанные образцы				обработанные образцы (сверление)				обработанные образцы (фрезерование)			
		$g=0,1$	$g=0,2$	$g=0,3$	$g=0,4$	$g=0,1$	$g=0,2$	$g=0,3$	$g=0,4$	$g=0,1$	$g=0,2$	$g=0,3$	$g=0,4$
Эпоксиполиуретановый	маршалит	1,45	1,20	1,00	0,80	1,74	1,44	1,20	0,96	1,54	1,24	1,00	0,76
	диабаз	1,55	1,32	1,20	1,00	1,86	1,59	1,44	1,20	1,66	1,39	1,24	1,00
	аэросил	1,70	1,50	1,3	1,15	2,13	1,88	1,63	1,44	1,93	1,68	1,43	1,24
	цемент	1,80	1,70	1,55	1,45	2,25	2,13	1,94	1,81	2,05	1,93	1,74	1,61
	маршалит	1,80	1,55	1,35	1,15	2,16	1,86	1,62	1,38	1,96	1,66	1,42	1,18
Полиэфирный	диабаз	1,90	1,67	1,55	1,35	2,28	2,00	1,86	1,62	2,08	1,80	1,66	1,42
	аэросил	2,05	1,85	1,65	1,5	2,56	2,31	2,06	1,88	2,36	2,11	1,86	1,68
	цемент	2,15	2,05	1,90	1,80	2,69	2,56	2,38	2,25	2,49	2,36	2,18	2,05
Эпоксидный	маршалит	1,70	1,45	1,25	1,05	2,04	1,74	1,50	1,26	1,84	1,54	1,30	1,06
	диабаз	1,80	1,57	1,45	1,25	2,16	1,88	1,74	1,50	1,96	1,68	1,54	1,30
	аэросил	1,95	1,75	1,55	1,40	2,40	2,15	1,91	1,72	2,20	1,95	1,71	1,52
	цемент	2,05	1,95	1,80	1,70	2,52	2,40	2,22	2,09	2,32	2,20	2,02	1,89
В СОЖ													
Эпоксиполиуретановый	маршалит	1,70	1,45	1,31	1,18	2,13	1,81	1,64	1,48	1,93	1,61	1,44	1,28
	диабаз	1,79	1,51	1,42	1,28	2,24	1,89	1,78	1,60	2,04	1,69	1,58	1,40
	аэросил	1,85	1,69	1,51	1,40	2,41	2,20	1,96	1,82	2,21	2,00	1,76	1,62
	цемент	2,00	1,91	1,80	1,68	2,60	2,48	2,34	2,18	2,40	2,28	2,14	1,98
Полиэфирный	маршалит	2,20	1,95	1,81	1,68	2,75	2,44	2,26	2,10	2,55	2,24	2,06	1,90
	диабаз	2,29	2,01	1,92	1,78	2,86	2,51	2,40	2,23	2,66	2,31	2,20	2,03
	аэросил	2,35	2,19	2,01	1,90	3,06	2,85	2,61	2,47	2,86	2,65	2,41	2,27
Эпоксидный	цемент	2,50	2,41	2,30	2,18	3,25	3,13	2,99	2,83	3,05	2,93	2,79	2,63
	маршалит	1,95	1,70	1,56	1,43	2,44	2,13	1,95	1,79	2,24	1,93	1,75	1,59
	диабаз	2,04	1,76	1,67	1,53	2,55	2,20	2,09	1,91	2,35	2,00	1,89	1,71
	аэросил	2,10	1,94	1,76	1,65	2,63	2,43	2,20	2,06	2,43	2,23	2,00	1,86
цемент	2,25	2,16	2,05	1,93	2,93	2,81	2,67	2,51	2,73	2,61	2,47	2,31	

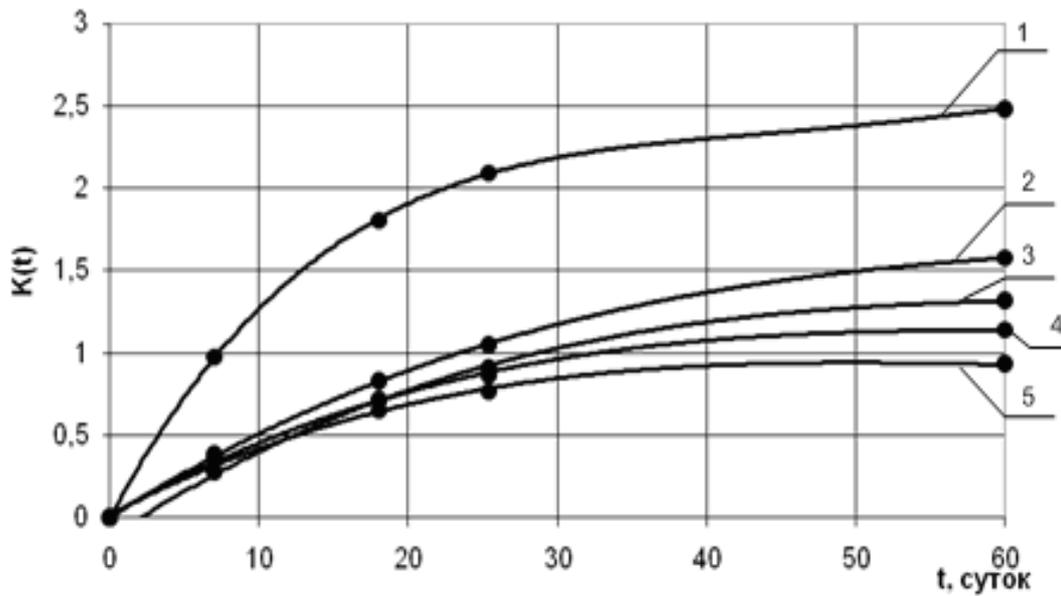


Рис.3.49. Кинетика массопоглощения обработанных сверлением КМ в воде ($n=1000$ об/мин, $S=0,2$ мм/об):
 1 – состав №35; 2 – состав №47; 3 – состав №51; 4 – состав №39; 5 – состав №43

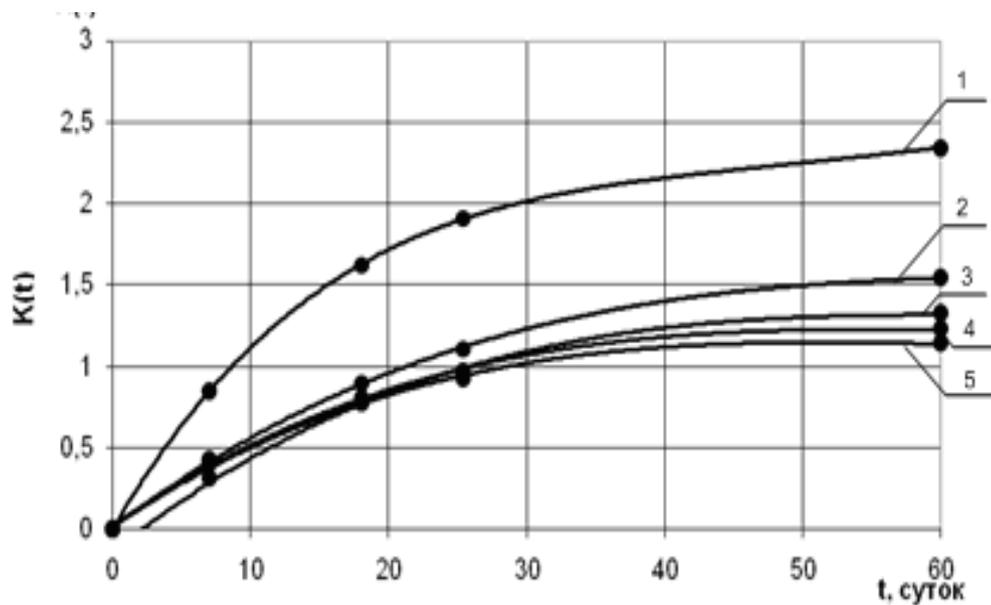


Рис. 3.50. Кинетика массопоглощения необработанных КМ в СОЖ:
 1 – состав №35; 2 – состав №47; 3 – состав №51; 4 – состав №39;
 5 – состав №43

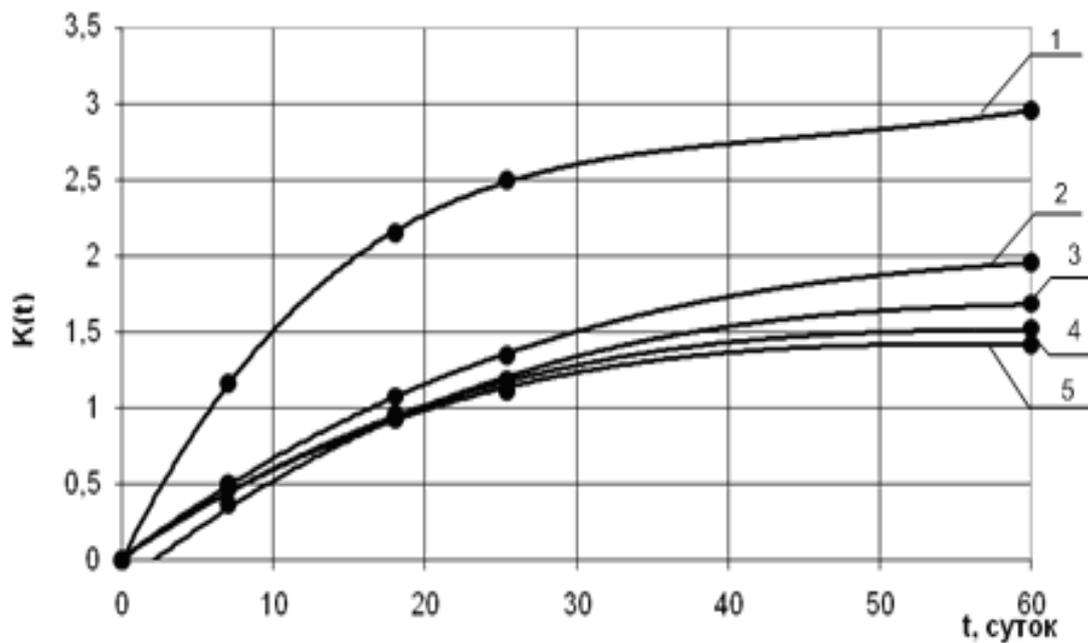


Рис.3.51. Кинетика массопоглощения обработанных сверлением КМ в СОЖ ($n=1000$ об/мин, $S_z=0,2$ мм/об): 1 – состав №35; 2 – состав №47; 3 – состав №51; 4 – состав №39; 5 – состав №43

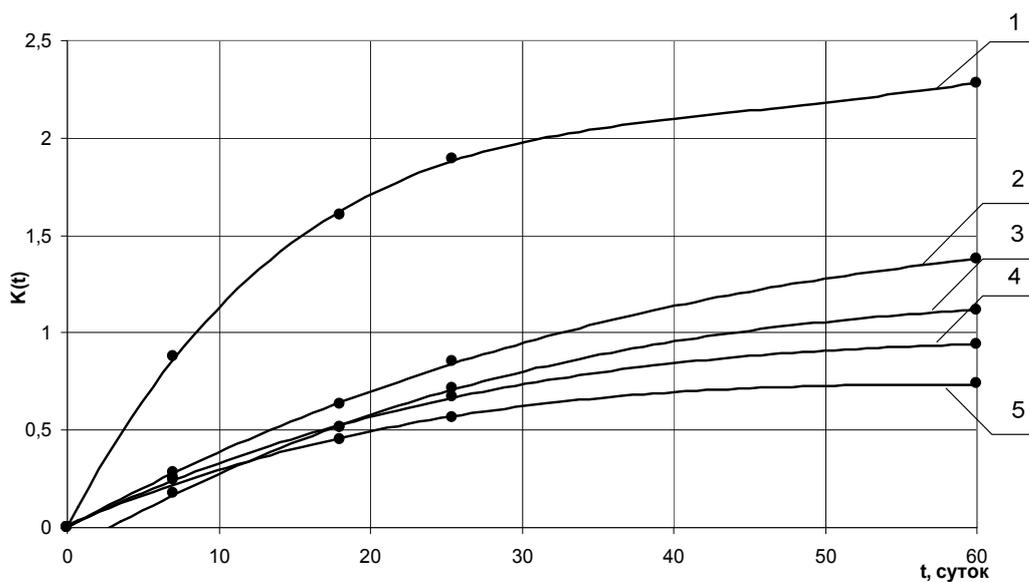


Рис. 3.52. Кинетика массопоглощения обработанных фрезерованием КМ в воде ($n=1000$ об/мин, $S_z=0,2$ мм/об): 1 – состав №35; 2 – состав №47; 3 – состав №51; 4 – состав №39; 5 – состав №43

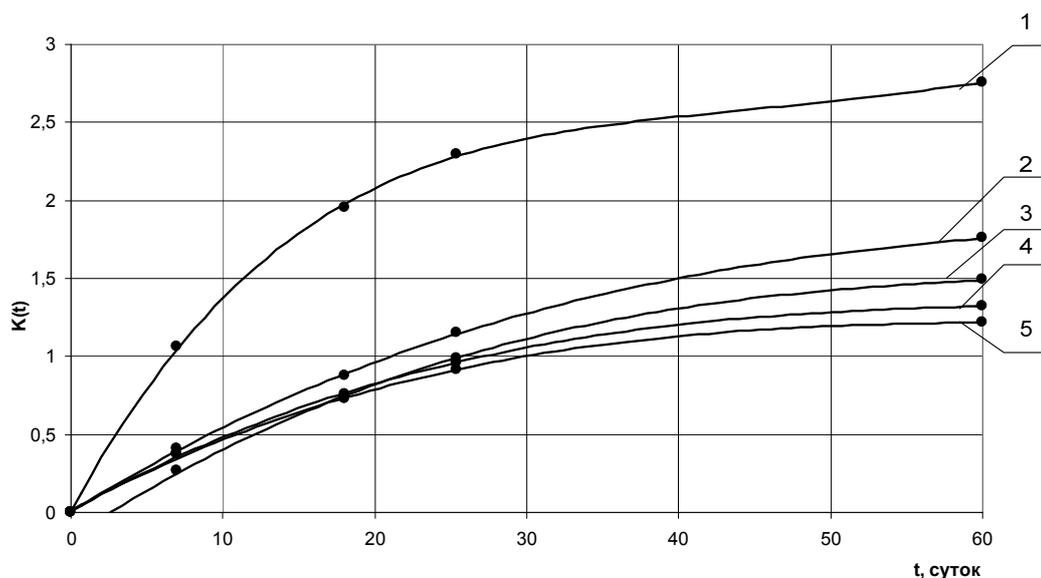


Рис.3.53. Кинетика массопоглощения обработанных фрезерованием КМ в СОЖ ($n=1000$ об/мин, $S_z=0,2$ мм/об): 1 – состав №35; 2 – состав №47; 3 – состав №51; 4 – состав №39; 5 – состав №43

Установлено, что для получения высококачественных образцов с низким водопоглощением необходимо назначать технологические параметры механической обработки осевым инструментом, обеспечивающие получение поверхностей с $R_a < 9$ мкм. Обработку резанием термореактивного КМ необходимо проводить без охлаждения СОЖ или с охлаждением сжатым воздухом. Если по условиям эксплуатации, либо исходя из возможностей технологического процесса обработки $R_a > 9$ мкм, то для уменьшения активности водопоглощения необходимо покрывать изделия водоотталкивающими покрытиями.

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что данные по стойкости, оцениваемые по изменению степени массопоглощения, не всегда совпадают с данными по стойкости, оцениваемыми по изменению механической прочности и упругости. Чаще всего получается, что по изменению степени массопоглощения образцы оказываются более стойкими по сравнению с изменением механической прочности и упругости.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Топологическая модель дисперсно-наполненных композиционных материалов

Формирование упруго-прочностных свойств дисперсно-наполненных КМ рассматривается на уровне микроструктуры, присущей полимерным связующим, и макроструктуры, характерной для композита в целом [2, 8, 130-132].

Микроструктура формируется при совмещении связующего и дисперсного наполнителя. Упруго-прочностные свойства полимерных КМ на уровне микроструктуры определяются явлениями, протекающими в контакте между жидкой и твердой фазами, и зависят от степени наполнения, дисперсности и поверхностной активности наполнителя [96, 133-136].

Формирование макроструктуры обуславливается иными факторами: объемным содержанием полимерных компонентов и наполнителей, пространственной топологией их распределения, соотношением упруго-прочностных свойств, а также интенсивностью взаимодействия между полимерной матрицей и наполнителем.

Микроструктуру полимерного композитного материала можно представить в виде непрерывной фазы (полимерное связующее), в которой расположены частицы наполнителя.

Композитная система, с равномерным распределением наполнителя, не равновесна и её свободная энергия выше своего минимума. Граничные слои отдельных частиц начинают взаимодействовать, что приводит к неравномерному распределению частиц, но способствует компенсации энергетического избытка. Частицы начинают группироваться таким образом, чтобы полимер в пространстве между ними полностью переходил в ориентационно-упорядоченное упрочненное пленочное строение граничного слоя. Таким образом, в композите самопроизвольно возникают кластерные образования частиц (рис.4.1) [137-140].

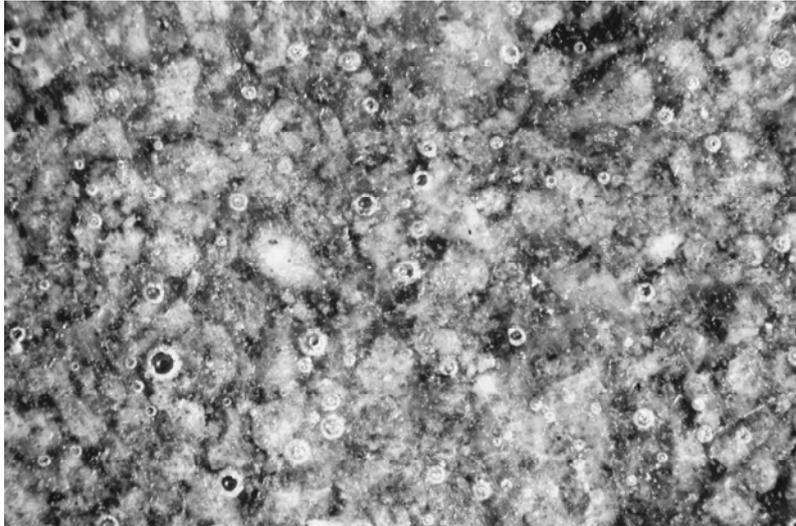


Рис. 4.1. Кластеры из частиц наполнителя в полимерной матрице (x200):
 ЭД – 20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; маршалит – $\varphi=0,3$

В данном случае под кластером подразумевается совокупность частиц наполнителя, разделенных прослойками полимера, находящихся полностью в пленочной фазе (рис.4.2) [4].

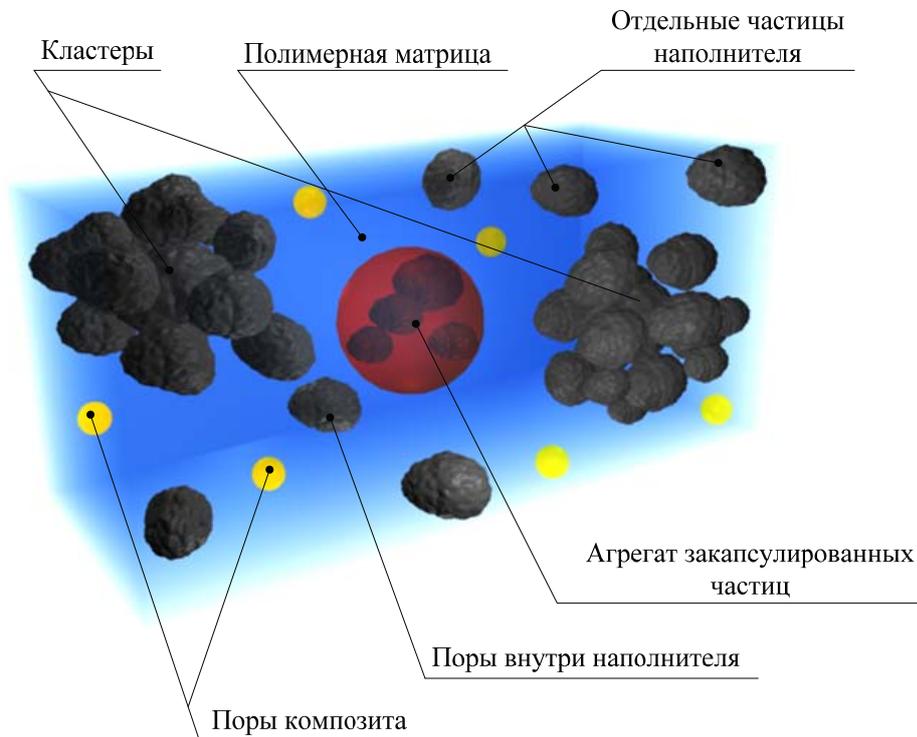


Рис. 4.2. Модель композита с пористым дисперсным наполнителем

Кластеры не следует путать с агрегатами закапсулированных частиц (группа частиц, не смоченных полимерным связующим). Кластерообразование происходит вследствие эффективных соударений и сближений частиц наполнителя в полимерном связующем при смешивании и седиментации. Также кластерообразование является результатом теплового движения частиц наполнителя и различных релаксационных явлений в отвердевшем композите. Для усиления упруго-прочностных свойств КМ переход полимера в пленочную фазу является необходимым условием.

Пленочная фаза матрицы в пределах объема кластера занимает сравнительно протяженные непрерывные области. Взаимодействие наполнителя и тонкопленочной структуры матрицы в кластерах приводит к росту прочностных свойств композита (рис.3.30-3.33). Однако когда в композите образуется пространственный каркас из частиц наполнителя и пленочной фазы матрицы, пронизывающей объем композита, прочность такой системы становится еще более высокой (рис.4.3).

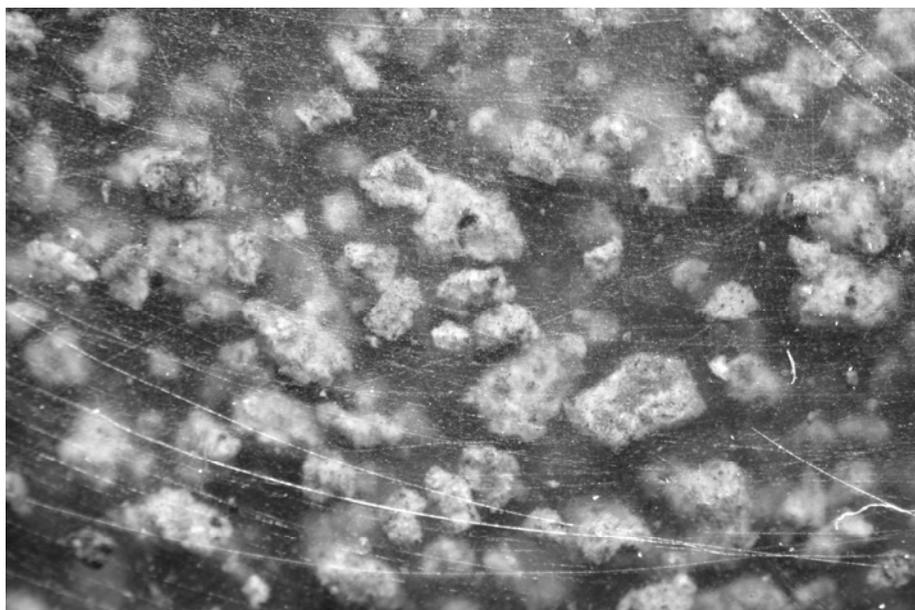


Рис.4.3. Бесконечный (перколяционный) кластер в полимерной матрице (x70):
ЭД – 20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.;
маршалит – $\varphi=0,4$

Процесс перехода структуры наполненного полимерного композита к бесконечному кластеру, а затем к решетчатым упаковкам частиц непосредственно связан с проблемой перколяции (протекания) [130-133].

Установлено, что на поверхности наполнителя образуется граничный слой матричного связующего, свойства которого отличаются от свойств матрицы в массиве. Взаимодействие граничных слоев отдельных частиц при кластерообразовании приводит к формированию пленочной фазы матрицы в свободном пространстве между плотноупакованными частицами. При наполнении композитов происходит значительное изменение

соотношения объемной и пленочной фаз матрицы, приводящее к эффектам экстремального усиления прочности и других физико-механических показателей (рис.3.20-3.23, 3.30-3.33).

При малом \mathcal{V} в композите граничные слои удаленных друг от друга частиц не представляют собой выделенной в объеме материала самостоятельной фазы, способной оказывать влияние на его свойства.

С повышением \mathcal{V} протекает кластерообразование, когда отдельные частицы в композите сближаются и взаимодействуют между собой, образуя в зазорах пленочную структуру матрицы, которая отличается упорядоченностью структуры, повышенной плотностью, кристаллическостью, что придает ей повышенные упругие свойства (рис.3.20-3.23).

В результате образования протяженной пленочной матрицы композит начинает проявлять присущие ему неаддитивные специфические свойства: экстремальное изменение упругости при наполнении, увеличение прочности и т. п.

При определенном \mathcal{V} осуществляется структурно-фазовый переход матрицы из ее объемного состояния в пленочное, затрагивающий весь объем материала. Если и далее продолжать наполнение, происходит уменьшение толщины пленки.

В связи с изложенным можно сделать заключение, что состояние матрицы является важным, но не единственным фактором, определяющим изменение свойств композитов. Другим и не менее значительным фактором является наличие в объеме композита пространственного структурного каркаса, сформированного из частиц наполнителя, связанных пленочными прослойками матрицы.

Установлено, что для композитов с $\mathcal{V} \approx 0,16$ образуется первичный перколяционный каркас, а оптимальная структура композита формируется в том случае, если редкий каркас бесконечного кластера переходит к пространственным решетчатым упаковкам ($0,16 < \mathcal{V} < 0,86$). Структура такого каркаса с пленочной матрицей оказывает существенное влияние на прочность композита.

Пленочная фаза матрицы, характеризующаяся параметром h_0 , и структурная решетка, показателем которой служит величина \mathcal{V} , неразрывно связаны между собой, что в целом определяется пространственным взаимодействием граничных слоев соседних частиц наполнителя.

При анализе сложных систем, поведение которых объясняется с позиции теории перколяции, большое значение имеют критические индексы, которые для различных задач в пространстве с одной и той же размерностью одинаковы [4, 110, 134].

В КМ можно выделить четыре основных структурных элемента, которыми являются – цепочка из частиц наполнителя, связанных между собой упорядоченными пленочными прослойками полимерной матрицы;

ячейка, образованная цепочечными элементами; структурный каркас, сформированный из цепочечных и ячеистых элементов; структурный каркас, сформированный в основном из ячеистых элементов. Каждый из четырех элементов характеризуется определённым универсальным критическим индексом.

Индекс β_3 характеризует цепочное строение перколяционного кластера. Индекс ν_3 отвечает за ячеистое строение перколяционного кластера. Индекс t_3 в фрактальном рассмотрении определяет крупноячеистый состав фрактального перколяционного каркаса. Индекс γ_3 отвечает за тупиковые ветви структурного каркаса перколяционного кластера.

В этой связи при изучении физико-механических показателей композита необходимо предварительно определить, какой из четырех основных структурных элементов отвечает за изменение контролируемого показателя.

В результате проведенного анализа установлено, что перколяционный кластер, состоящий из неупорядоченно-распределенных в матрице дисперсных частиц наполнителя, имеет фрактальную структуру с размерностью $d = 2,44$.

Критические индексы связаны с фрактальной размерностью зависимостями:

$$\nu_3 = \frac{2}{d} = 0,82;$$

$$t_3 = \frac{4}{d} = 1,64.$$

Критические индексы имеют важное значение при анализе упруго-прочностных физико-механических свойств наполненных полимерных композитов, так как они выступают в роли интегральных универсальных показателей состояний этих специфических систем и могут эффективно использоваться при прогнозировании свойств КМ.

В работах [2, 4, 6, 110] установлено, что за изменение упругих свойств отвечает жесткий структурный каркас, так как упругие деформации способен передавать лишь жесткий структурный каркас, пронизывающий весь объём композита. В свою очередь свободно свисающие структурные цепочки не способны передавать деформацию упругости. Таким образом, за изменение модуля упругости полимерного композита отвечает индекс t .

Прочность композита, в отличие от упругих свойств полимерного материала, зависит от общего количества цепочек, пересекающих предполагаемую поверхность разрушения. Для данного случая должны рассматриваться все цепочки, пересекающие поверхность разрушения, как входящие в состав жесткого структурного каркаса, так и свободно свисающие. Поэтому изменение прочности в процессе наполнения композита зависит от индекса ν .

Также было установлено, что при механической обработке осевыми инструментами эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов источником возникновения трещин и больших значений микронеровностей являются значительные силы резания, приводящие к механо- и термодеструкции (рис.3.41). Внутренние напряжения, возникающие при деформации под действием внешней силы, приводят к разрыву молекулярных цепочек, связанным преимущественно с измельчением полимера [125, 141].

Разрушение эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов при механической обработке на молекулярном уровне происходит в результате разрыва ковалентных связей углеродного скелета макромолекул и относительного сдвига полимерных цепей.

В общем случае прочность композита определяется силами межмолекулярного взаимодействия и силами главных химических валентностей. Когда макромолекулы матрицы неориентированы ($\vartheta < 0,16$), связи расположены под большими углами к направлению приложенной нагрузки. Макромолекулы в таком композите обладают достаточной гибкостью. Вследствие подвижности макромолекул и неоднородности их цепочек в направлении приложенной нагрузки, разрушение малонаполненных композитов в большей мере определяется отделением звеньев или сегментов макромолекул матрицы в результате их относительного проскальзывания. При этом нарушаются слабые силы межмолекулярного взаимодействия. Сдвиговые явления сопровождаются образованием микротрещин и пустот, являющихся инициаторами разрушения [135].

При превышении порога перколяции ($\vartheta > 0,16$) увеличивается число сшивок в пространственной сетке матрицы и число поперечных сшивок в структуре композита, связывающих макромолекулами матрицы соседние частицы наполнителя. Разрушение такой трехмерной жесткой структуры композита возможно лишь за счет разрыва связей главных химических валентностей [134]. Макрочастицы полимера разрушаются как хрупкие тела за счет развития микротрещин по направлениям, наиболее ослабленным различными дефектами [4, 136].

Полимерные КМ разрушаются вследствие развития начальных дефектов. Введение наполнителя в композит приводит к увеличению в полимерной матрице различных начальных дефектов (трещин, пор) и остаточных напряжений, обусловленных различием в термическом расширении матрицы и наполнителя [137].

Расположение начальных трещин и геометрия их распространения во многом зависят от соотношения предела прочности при одноосном сжатии матрицы R_m и наполнителя R_f . Также начальные дефекты зависят от соотношения коэффициентов термического расширения матрицы α_m и наполнителя α_f . При $\alpha_f > \alpha_m$ вокруг частиц наполнителя образуются либо

полусферические трещины, если $R_f > R_m$, либо трещины, проходящие сквозь частицы, если $R_m > R_f$. Образование трещин происходит на поверхности раздела между частицами наполнителя и матрицей, если прочность сцепления наполнителя с матрицей меньше прочности наполнителя и матрицы. Если $\alpha_m > \alpha_f$, происходит развитие радиальных трещин. Впоследствии такие трещины объединяются между собой, образуя сетку трещин.

При разрушении машиностроительных КМ происходит взаимодействие развивающихся трещин с частицами наполнителями и порами (рис. 4.4–4.5).

При встрече трещины с частицей наполнителя часть энергии трещины поглощается деформацией области матрицы, прилегающей к частице. Такая деформация обеспечивается высокими значениями локальных напряжений фронта трещин.

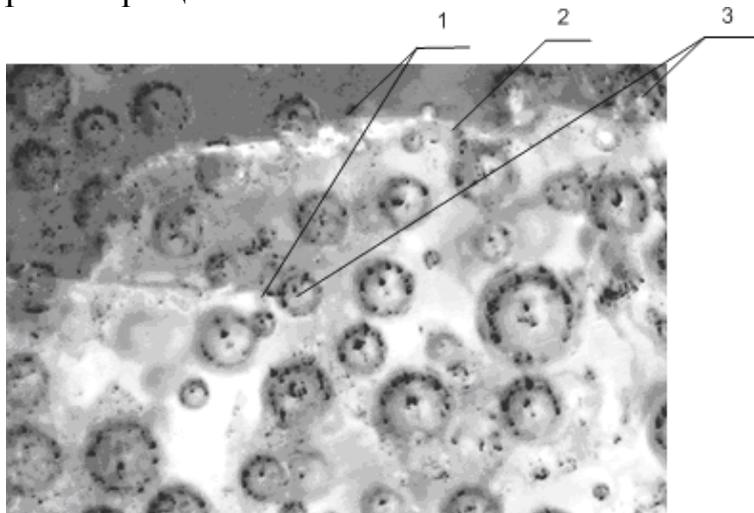


Рис. 4.4. Микроструктура образца, подвергнутого одноосному сжатию (ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; Маршалит – $\mathcal{G}=0,4$) (x200): 1 – трещина; 2 – частица наполнителя; 3 – полимерная матрица

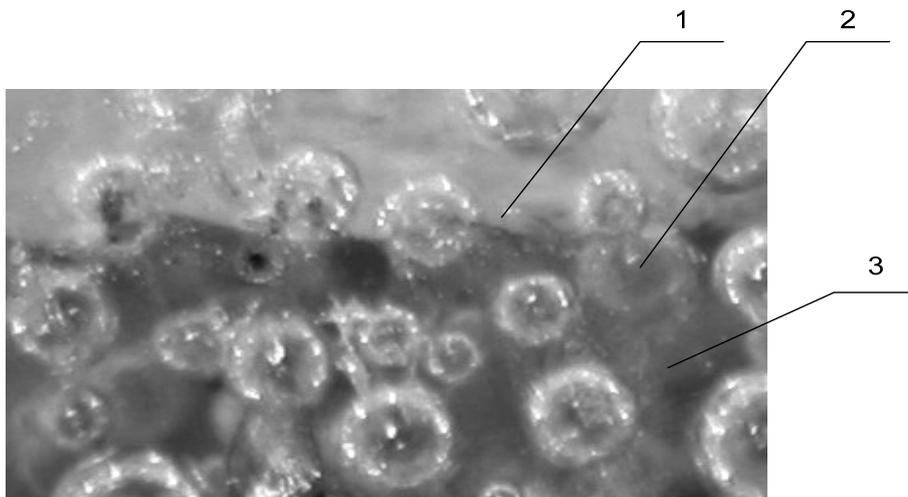


Рис. 4.5. Микроструктура образца, подвергнутого одноосному сжатию (ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.) (x200): 1 – трещина; 2 – пора; 3 – полимерная матрица

В эпоксидном, полиэфирном, эпоксиполиуретановом КМ с дисперсными наполнителями происходит увеличение шероховатости поверхности разрушения, связанное с искривлением фронта растущей трещины, вызванным локальными полями напряжений у частиц наполнителя. При этом развитие разрушения замедляется благодаря ветвлению трещины и увеличению ее длины траектории вокруг частиц наполнителя (рис.4.4). Частицы наполнителя в хрупкой матрице действуют на распространяющуюся трещину как препятствие, затрудняющее ее продвижение. Фронт трещины при ее продвижении распространяется в одной плоскости до тех пор, пока энергия активации в этой плоскости не превышает энергию активации продвижения трещины в параллельной, рядом расположенной плоскости. При этом фронт трещины скачкообразно перемещается на соседнюю плоскость, энергетически более выгодную для дальнейшего ее распространения. Ступеньки на поверхности разрушения образуются в тех случаях, когда фронт трещины обвивает ряд частиц наполнителя с соседними с ними плоскостями.

Поры являются эффективными поглотителями колебательной энергии и основными источниками эффекта усиления демпфируемости. В процессе механической обработки эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых КМ происходит интегральное рассеяние колебательной энергии в порах, образующихся на границе раздела матричной фазы и фазы наполнителя. Чем выше концентрация наполнителя, тем больше площадь раздела фаз, что сопровождается эффектом усиления демпфируемости композита и уменьшением количества трещин (рис. 4.5) [142].

С учетом вышесказанного разработана топологическая модель высокотехнологичного дисперсно-наполненного КМ машиностроительного назначения, позволяющая оценить характер разрушения материала в процессе механической обработки осевыми инструментами (рис. 4.6).

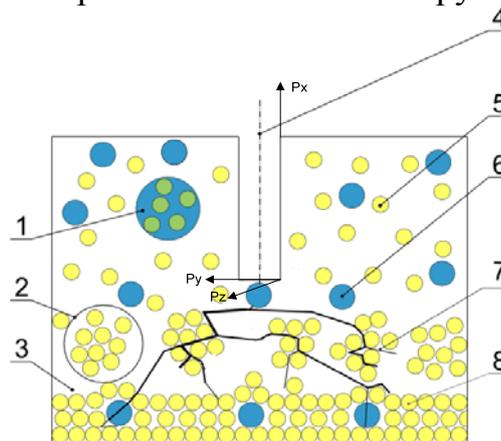


Рис. 4.6. Топологическая модель КМ при механической обработке осевыми инструментами:
 1 – агрегаты закапсулированных частиц; 2 – кластерные образования;
 3 – полимерная матрица; 4 – осевой инструмент; 5 – отдельные частицы наполнителя; 6 – поры; 7 – трещина; 8 – наполнитель; P_x – осевая составляющая силы резания, P_y – радиальная составляющая силы резания, P_z – главная составляющая силы резания

При введении наполнителя в композит происходит снижение скорости роста трещин вследствие их ветвления у частиц наполнителя и торможения на дефектах материала, уменьшение внутренних напряжений.

4.2. Прогнозирование и оптимизация физико-механических свойств КМ

При формировании структуры полимерных КМ протекают два процесса: 1) упрочнения за счет перевода матричного материала в контактном пространстве между частицами наполнителя из его объемного состояния в пленочное, с более высокой прочностью и структурированностью; 2) разупрочнения, вследствие различия упругих постоянных, а также коэффициентов линейного термического расширения материалов наполнителя и матрицы [2, 7].

С увеличением \mathcal{V} наполнителя в композитном материале развиваются два одновременных альтернативных процесса, в большей мере обусловленных возникновением границы раздела между фазами в композите и поэтому обязанных проявлению комплексных свойств, не присущих компонентам в отдельности [143, 144].

С одной стороны, протекает процесс упрочнения композита за счет введения в матрицу дисперсных частиц. Такое упрочнение преимущественно осуществляется в результате близкодействующего взаимодействия отдельных частиц наполнителя, способствующего переводу матричного материала в контактном пространстве между частицами наполнителя из его объемного состояния в пленочное, с более высокой прочностью и направленной структурированностью. В условиях стесненности частиц в композите пленочная фаза матрицы занимает все больший объем, вплоть до формирования пространственной жесткой упрочняющей решеточной структуры, которая образуется из частиц наполнителя и упрочненных пленочных прослоек матрицы, вследствие своей непрерывности, имеет в объеме композита самостоятельную связность.

С другой стороны, в композите проявляется процесс разупрочнения, развивающийся с повышением содержания наполнителя в композите. Прежде всего, источником дефектов является поверхность раздела фаз. Из-за неполной лиофилизации поверхности частиц матричным материалом образуются пустоты и поры. Вследствие различия упругих постоянных, а также коэффициентов термического линейного расширения материалов наполнителя и матрицы, на границе раздела возникают значительные напряжения, вызывающие растрескивание. Кроме того, с повышением содержания наполнителя в композите проявляется пустотность, вызванная дефицитом связующего.

При малом наполнении ($0 < \vartheta \leq 0,17$), не достигающем порога перколяции, когда отдельные кластеры разобщены (рис. 4.7), прочность полимерного КМ ниже, чем у ненаполненного матричного материала, и определяется прочностью слабой дефектной зоны матрицы в массиве. С ростом наполнения происходит коалесценция и укрупнение отдельных кластеров. В результате в объеме наполненного КМ ($0,34 > \vartheta > 0,17$) возникает перколяционный каркас из цепочек частиц наполнителя, связанных между собой пленочными прослойками матрицы. В КМ с перколяционным каркасом упрочнение незначительно. При дальнейшем наполнении ($\vartheta > 0,34$) связи через пленочную матрицу охватывают преимущественное количество частиц наполнителя. Редкий перколяционный каркас трансформируется в жесткую решетку (рис.4.7), обеспечивающую повышенный эффект упрочнения [107].

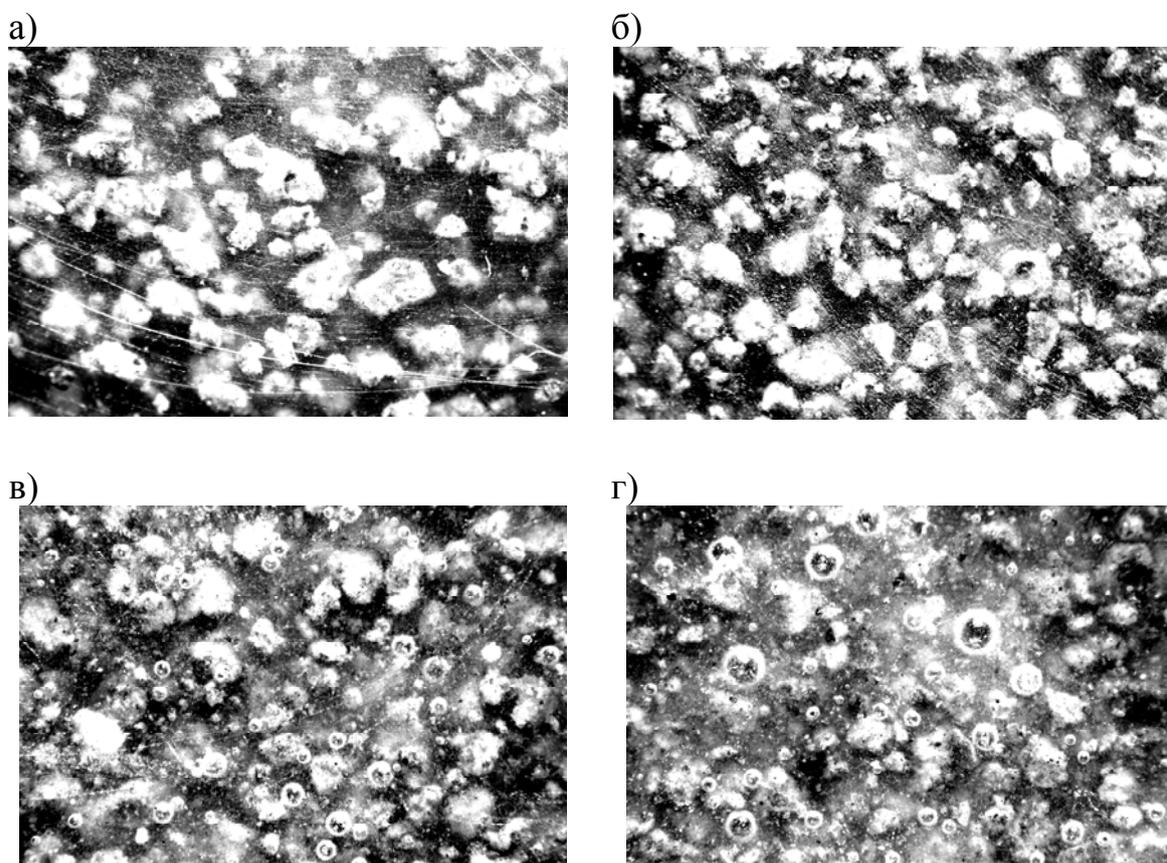


Рис.4.7. Моделирование распределения наполнителя в полимерном КМ: а – образование изолированных кластеров; б – рост изолированных кластеров; в – образование перколяционного каркаса; г – переход перколяционного каркаса в решетчатую упаковку

При описании упругих свойств композитов с усиливающим наполнителем в зависимости от \mathcal{G} используется множество уравнений [4]. При прогнозировании упругих свойств усиливающих наполнителей использовали:

– уравнение нижнего предела модуля упругости (случай равных напряжений):

$$E_c = \frac{E_m E_f}{E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})};$$

– уравнение, полученное с помощью методов теории протекания:

$$E_c = E_m (1 + \alpha_E \mathcal{G}^t);$$

где E_m – модуль упругости матричного материала;

E_f – модуль упругости материала наполнителя;

$\alpha_E = \frac{E_1}{E_m}$ – модуль упругости единичного цепочечного элемента перколяционного фрактального каркаса структуры композита.

В работах [1, 2, 4, 6] установлено, что за изменение упругих свойств отвечает жесткий структурный каркас, пронизывающий весь объем композита. В свою очередь свободно свисающие структурные цепочки не способны передавать деформацию упругости.

При механической обработке термореактивного композита вследствие механодеструкции материала происходит нарушение целостности жесткого структурного каркаса, в результате чего КМ теряет способность передавать деформацию упругости. Таким образом, использование классической перколяционной зависимости, содержащей критический индекс t , для описания модуля упругости КМ невозможно. Данный эффект подтверждается экспериментальными исследованиями (рис.3.20–3.21).

В результате проведенных экспериментально-теоретических исследований установлено, что динамический модуль упругости низконаполненных необработанных и обработанных образцов из ПКМ эффективно описывается уравнением нижнего предела (рис.3.20–3.21; прил. 2).

С учетом параметров удельной поверхности наполнителя указанная зависимость преобразуется к виду:

$$E_c = \frac{E_m E_f + [E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})] \cdot b_{\text{упр}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k_{\text{уд}}}{E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})}, \quad (4.1)$$

где $b_{\text{упр}}$ – постоянный коэффициент, равный тангенсу угла наклона зависимости $E_c = f(S_{\text{уд}})$ (аналогично определяется коэффициент $b_{\text{сж}}$);

$k_{\text{уд}}$ – поправочный коэффициент: $k_{\text{уд}} = \left(1 - \frac{S_{\text{уд}0}}{S_{\text{уд}}} \right)$.

Значения постоянных, входящих в уравнение (4.1) для полимерных КМ, приведены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Динамический модуль упругости полимерных КМ

Вид композита	Наполнитель	E_m	E_f	E_m	E_f
		до механической обработки		после механической обработки	
Эпоксидный	маршалит	3,4	20,0	3,0	20,0
	диабаз		10,6		10,6
	цемент		6,2		6,2
	аэросил		4,4		4,4
Полиэфирный	маршалит	1,8	20,0	1,6	20,0
	диабаз		10,6		10,6
	цемент		6,2		6,2
	аэросил		4,4		4,4
Эпоксиполиуретановый	маршалит	5,0	20,0	4,5	20,0
	диабаз		10,6		10,6
	цемент		6,2		6,2
	аэросил		4,4		4,4

Прочность термореактивного композита зависит от общего количества цепочек, пересекающих поверхность разрушения. Для случая механической обработки рассматриваются все цепочки, пересекающие поверхность разрушения, как входящие в состав жесткого структурного каркаса, так и свободно свисающие. В результате проведения экспериментально-теоретических исследований установлено, что предел прочности при одноосном сжатии эффективно описывается перколяционной зависимостью: $R_{сж.с} = R_{сж.с}(1 + \alpha_{сж} \vartheta^v)$, где $R_{сж.с}$ и $R_{сж.м}$ – предел прочности при одноосном сжатии КМ и матричного материала; $\alpha_{сж} = \frac{R_{сж.1}}{R_{сж.м}}$ – предел прочности при одноосном сжатии единичного элемента КМ.

Установлено, что у образцов из КМ, испытанных до и после механической обработки, наблюдается эквивалентный характер изменения показателей (рис.3.30-3.31; прил. 2). С учетом перколяционной зависимости получены параметры моделей расчета предела прочности при одноосном сжатии для анализируемых КМ (табл. 4.2).

Предел прочности при одноосном сжатии полимерных КМ

Вид композита	Наполнитель	$R_{сж.с}$	$\alpha_{сж}$	ν	$R_{сж.с}$	$\alpha_{сж}$	ν
		до механической обработки			после механической обработки		
Эпоксидный	маршалит	90	1,35	0,82	80	1,15	0,82
	диабаз		1,20			1,00	
	цемент		1,10			0,90	
Полиэфирный	маршалит	70	1,30	0,82	60	1,10	0,82
	диабаз		1,15			0,90	
	цемент		1,05			0,80	
Эпоксиполиуретановый	маршалит	120	1,25	0,82	100	1,00	0,82
	диабаз		1,10			0,80	
	цемент		1,00			0,70	

Важным показателем футеровочных плит, влияющим на выбор КМ и технологических параметров обработки, является твердость. В ходе теоретико-экспериментальных исследований установлено, что характер и природа изменения твердости от \mathcal{G} аналогична изменению пределу прочности при одноосном сжатии КМ (рис.3.32-3.33).

С использованием методики, предложенной Лийвом [82], получены зависимости:

– для маршалита, диабаза, цемента

$$HB_{бр.с}(\mathcal{G}) = \frac{R_{сж.с}(\mathcal{G})}{K_{сж}} = \frac{R_{сж.м} \cdot (1 + \alpha_{сж} \cdot \mathcal{G}^\nu) + b_{сж} \cdot S_{уд} \cdot k}{K_{сж}}, \quad (4.2)$$

– для аэросила

$$HB_{бр.с}(\mathcal{G}) = \frac{R_{сж.с}(\mathcal{G})}{K_{сж}} = \frac{P^n(\mathcal{G}) + b_{сж} \cdot S_{уд} \cdot k}{K_{сж}}, \quad (4.3)$$

где $HB_{бр.с}(\mathcal{G})$ – твердость КМ;

$HB_{бр.м}(\mathcal{G})$ – твердость матричного материала;

$K_{сж}$ – коэффициент пропорциональности между $R_{сж.с}(\mathcal{G})$ и $HB_{бр.с}(\mathcal{G})$, характеризующий зависимость между объемными и поверхностными свойствами материала КМ:

$$K_{сж} = \frac{R_{сж.м}}{HB_{бр.м}};$$

$P^n(\mathcal{G})$ – полином n -степени, описывающий изменение предела прочности при одноосном сжатии от объемного содержания наполнителя.

Установлено, что у образцов из КМ, испытанных до и после механической обработки, наблюдается эквивалентный характер изменения твердости (рис.3.32–3.33). Получены параметры моделей расчета твердости для анализируемых наполненных КМ (табл. 4.3).

Т а б л и ц а 4.3

Твердость полимерных КМ

Вид компози- пози- та	Наполни- тель	$R_{сж.с}/K_{сж}$	$\alpha_{сж}$	ν	$R_{сж.с}/K_{сж}$	$\alpha_{сж}$	ν
		до механической обработки			после механической обработки		
Эпоксидный	маршалит	99	1,35	0,82	88	1,15	0,82
	диабаз		1,20			1,00	
	цемент		1,10			0,90	
	аэросил	$HB_{бр.с}(\rho) = -1300,7 \cdot \rho^3 + 850,27 \cdot \rho^2 - 101,21 \cdot \rho + 92,376$			$HB_{бр.с}(\rho) = -23081 \cdot \rho^3 + 16378 \cdot \rho^2 - 26341 \cdot \rho + 85,695$		
Полиэфирный	маршалит	78,75	1,30	0,82	67,5	1,10	0,82
	диабаз		1,15			0,90	
	цемент		1,05			0,80	
	аэросил	$HB_{бр.с}(\rho) = -1009,7 \cdot \rho^3 + 724,57 \cdot \rho^2 - 102,16 \cdot \rho + 74,617$			$HB_{бр.с}(\rho) = -1998,5 \cdot \rho^3 + 1476,5 \cdot \rho^2 - 263,46 \cdot \rho + 67,039$		
Эпоксипо- лиуретановый	маршалит	133	1,25	0,82	112,5	1,00	0,82
	диабаз		1,10			0,80	
	цемент		1,00			0,70	
	аэросил	$HB_{бр.с}(\rho) = -2241,5 \cdot \rho^3 + 1559,3 \cdot \rho^2 - 222,74 \cdot \rho + 130,96$			$HB_{бр.с}(\rho) = -1592,7 \cdot \rho^3 + 1165,6 \cdot \rho^2 - 183,52 \cdot \rho + 112,34$		

В результате экспериментальных исследований установлено увеличение упругих и прочностных свойств полимерных КМ с ростом дисперсности наполнителя (рис.3.3–3.39).

В первом приближении зависимости изменения предела прочности при одноосном сжатии, динамического модуля упругости, твердости КМ от удельной поверхности наполнителя имеют линейный характер (рис. 3.37–3.39).

В этой связи для описания данных зависимостей используем уравнение прямой: $y = bx + a$, где b тангенс угла наклона прямой; a начальное смещение. Используя зависимости $E_d = f(S_{уд})$, $R_{сж} = f(S_{уд})$, $HB_{бр} = f(S_{уд})$ определили значения коэффициентов $b_{упр}$, $b_{сж}$, $b_{НВ}$:

$$b_{сж} = tg\beta_{сж} = \left| \frac{R_{сж2} - R_{сж1}}{S_{уд2} - S_{уд1}} \right|, \quad (4.4)$$

$$b_{\text{HB}} = \text{tg}\beta_{\text{HB}} = \left| \frac{HB_{\text{бр.2}} - HB_{\text{бр.1}}}{(S_{\text{уд}2} - S_{\text{уд}1})} \right| \approx \frac{b_{\text{сж}}}{K_{\text{сж}}} = \left| \frac{R_{\text{сж}2} - R_{\text{сж}1}}{(S_{\text{уд}2} - S_{\text{уд}1}) \cdot K_{\text{сж}}} \right|, \quad (4.5)$$

$$b_{\text{упр}} = \text{tg}\beta_{\text{упр}} = \left| \frac{E_{\text{д}2} - E_{\text{д}1}}{S_{\text{уд}2} - S_{\text{уд}1}} \right|. \quad (4.6)$$

где $\text{tg}\beta_{\text{сж}}, \text{tg}\beta_{\text{HB}}, \text{tg}\beta_{\text{упр}}$ – тангенсы угла наклона зависимостей $E_{\text{д}}=f(S_{\text{уд}})$,
 $R_{\text{сж}}=f(S_{\text{уд}})$, $HB_{\text{бр}}=f(S_{\text{уд}})$;

$R_{\text{сж}2}, R_{\text{сж}1}$ – предел прочности при одноосном сжатии КМ;

$HB_{\text{бр.2}}, HB_{\text{бр.1}}$ – твердость КМ;

$E_{\text{д}2}, E_{\text{д}1}$ – динамический модуль упругости КМ;

$S_{\text{уд}2}, S_{\text{уд}1}$ – удельная поверхность.

В результате теоретико-экспериментальных исследований (рис. 3.22-3.23, 3.34-3.36), в соответствии с методами обработки данных, приведенными во второй главе монографии, получены концентрационные зависимости, описывающие изменение условно-мгновенного и равновесного модулей упругости, ударной вязкости полимерных наполненных КМ (табл. 4.4).

При производстве изделий в машиностроении из ПКМ необходимо обеспечение противоречивых физико-технических показателей (высокие значения предела прочности при одноосном сжатии, твердости и динамического модуля упругости; низкое значение массопоглощения, высокая коррозионная стойкость) при минимальной себестоимости полученного изделия.

Для решения данных задач используют методы многокритериальной оптимизации, описание которых представлено в первой главе. В качестве метода оптимизации выбран метод линейной свертки.

Задачу оптимизации эксплуатационных свойств композитов сводили к двум последовательным задачам одномерного поиска экстремума. На первом этапе оптимизируется состав полимерной матрицы, находится экстремум целевой функции $F(x)$:

$$F(x) = c_1 \cdot \frac{f_1(x)}{f_{n1}(x)} + c_2 \cdot \frac{f_2(x)}{f_{n2}(x)}, \quad (4.7)$$

где x – массовое содержание матричных компонентов;

$f_1(x)$ – функция, определяемая эксплуатационными показателями;

$f_2(x)$ – функция, определяемая стоимостью компонентов композиционных материалов;

$f_{n1}(x), f_{n2}(x)$ – нормирующие значения соответствующих показателей;

c_1, c_2 – весовые коэффициенты ($\sum_{i=1}^2 c_i = 1$), которые определяются

условиями эксплуатации композиционных материалов.

Т а б л и ц а 4.4

Концентрационные зависимости физико-механических свойств ПКМ

Вид композита	Наполнитель	Концентрационные зависимости					
		Условно-мгновенный модуль упругости	R ²	Равновесный модуль упругости	R ²	Ударная вязкость	R ²
Эпоксидный	маршалит	$E_0 = 8,333 \cdot \vartheta^3 - 9,285 \cdot \vartheta^2 + 4,369 \cdot \vartheta + 4,495$	0,984	$E_{\text{вр}} = 66,66 \cdot \vartheta^3 - 30 \cdot \vartheta^2 - 6,666 \cdot \vartheta + 4,66$	0,999	$A = -11,162 \cdot \vartheta^3 + 3,2389 \cdot \vartheta^2 - 1,3194 \cdot \vartheta + 0,1933$	0,984
	диабаз	$E_0 = 16,66 \cdot \vartheta^3 - 16,78 \cdot \vartheta^2 + 2,202 \cdot \vartheta + 4,495$	0,983	$E_{\text{вр}} = 75 \cdot \vartheta^3 - 40,71 \cdot \vartheta^2 + 2,464 \cdot \vartheta + 4,664$	0,999	$A = -0,7347 \cdot \vartheta^3 + 7,3722 \cdot \vartheta^2 - 1,2319 \cdot \vartheta + 0,1956$	0,992
	цемент	$E_0 = 33,33 \cdot \vartheta^3 - 27,85 \cdot \vartheta^2 - 0,309 \cdot \vartheta + 4,497$	0,971	$E_{\text{вр}} = 83,33 \cdot \vartheta^3 - 47,85 \cdot \vartheta^2 - 0,190 \cdot \vartheta + 4,657$	0,999	$A = -10,297 \cdot \vartheta^3 + 7,6034 \cdot \vartheta^2 - 1,2774 \cdot \vartheta + 0,1937$	0,963
	аэросил	$E_0 = -25 \cdot \vartheta^3 + 24,28 \cdot \vartheta^2 - 0,964 \cdot \vartheta + 4,495$	0,964	$E_{\text{вр}} = 75 \cdot \vartheta^3 + 43,57 \cdot \vartheta^2 - 0,678 \cdot \vartheta + 4,661$	0,999	$A = -6,1933 \cdot \vartheta^3 + 4,8345 \cdot \vartheta^2 - 0,9593 \cdot \vartheta + 0,1951$	0,916
Полиэфирный	маршалит	$E_0 = 125 \cdot \vartheta^4 - 108,3 \cdot \vartheta^3 + 33,75 \cdot \vartheta^2 - 0,583 \cdot \vartheta + 2,2$	0,984	$E_{\text{вр}} = 66,66 \cdot \vartheta^3 + 30 \cdot \vartheta^2 + 6,666 \cdot \vartheta + 2,16$	1	$A = -4,4065 \cdot \vartheta^3 + 3,3534 \cdot \vartheta^2 - 0,5229 \cdot \vartheta + 0,1482$	0,995
	диабаз	$E_0 = 16,66 \cdot \vartheta^3 + 16,78 \cdot \vartheta^2 + 2,202 \cdot \vartheta + 2,195$	0,999	$E_{\text{вр}} = 75 \cdot \vartheta^3 + 40,71 \cdot \vartheta^2 + 2,464 \cdot \vartheta + 2,164$	0,999	$A = -4,4268 \cdot \vartheta^3 + 3,4045 \cdot \vartheta^2 - 0,595 \cdot \vartheta + 0,1517$	0,991
	цемент	$E_0 = 33,33 \cdot \vartheta^3 - 27,85 \cdot \vartheta^2 - 0,309 \cdot \vartheta + 2,197$	0,971	$E_{\text{вр}} = 83,33 \cdot \vartheta^3 - 47,85 \cdot \vartheta^2 - 0,190 \cdot \vartheta + 2,157$	0,999	$A = -3,0375 \cdot \vartheta^3 + 2,332 \cdot \vartheta^2 - 0,3241 \cdot \vartheta + 0,1511$	0,992
	аэросил	$E_0 = -25 \cdot \vartheta^3 + 24,28 \cdot \vartheta^2 - 0,964 \cdot \vartheta + 2,195$	0,964	$E_{\text{вр}} = 75 \cdot \vartheta^3 + 43,57 \cdot \vartheta^2 - 0,678 \cdot \vartheta + 2,161$	0,999	$A = -2,1419 \cdot \vartheta^3 + 1,983 \cdot \vartheta^2 - 0,4736 \cdot \vartheta + 0,1492$	0,974
Эпоксиполиуретановый	маршалит	$E_0 = 125 \cdot \vartheta^4 - 108,3 \cdot \vartheta^3 + 33,75 \cdot \vartheta^2 - 2,583 \cdot \vartheta + 3,5$	0,984	$E_{\text{вр}} = 66,66 \cdot \vartheta^3 + 30 \cdot \vartheta^2 + 6,666 \cdot \vartheta + 5,96$	1	$A = -3,3737 \cdot \vartheta^3 + 6,0547 \cdot \vartheta^2 - 0,8207 \cdot \vartheta + 0,2533$	0,992
	диабаз	$E_0 = 16,66 \cdot \vartheta^3 - 16,78 \cdot \vartheta^2 + 2,202 \cdot \vartheta + 3,495$	0,983	$E_{\text{вр}} = 75 \cdot \vartheta^3 + 40,71 \cdot \vartheta^2 + 2,464 \cdot \vartheta + 5,964$	0,999	$A = -6,9317 \cdot \vartheta^3 + 5,1932 \cdot \vartheta^2 - 0,7695 \cdot \vartheta + 0,253$	0,994
	цемент	$E_0 = 33,33 \cdot \vartheta^3 - 27,85 \cdot \vartheta^2 - 0,309 \cdot \vartheta + 3,497$	0,971	$E_{\text{вр}} = 83,33 \cdot \vartheta^3 - 47,85 \cdot \vartheta^2 - 0,190 \cdot \vartheta + 5,957$	0,999	$A = -4,0351 \cdot \vartheta^3 + 3,2503 \cdot \vartheta^2 - 0,5543 \cdot \vartheta + 0,2519$	0,986
	аэросил	$E_0 = -25 \cdot \vartheta^3 + 24,28 \cdot \vartheta^2 - 0,964 \cdot \vartheta + 3,495$	0,964	$E_{\text{вр}} = 75 \cdot \vartheta^3 + 43,57 \cdot \vartheta^2 - 0,678 \cdot \vartheta + 5,961$	0,999	$A = -3,3036 \cdot \vartheta^3 + 2,5465 \cdot \vartheta^2 - 0,4633 \cdot \vartheta + 0,2482$	0,943

Второй этап оптимизации служит для определения объёмного содержания наполнителя. Необходимо выбрать функциональный наполнитель и определить оптимальное содержание из условия максимума целевой функции $F(\mathcal{G})$:

$$F(\mathcal{G}) = c_1 \cdot \frac{f_1(\mathcal{G})}{f_{n1}(\mathcal{G})} + c_2 \cdot \frac{f_2(\mathcal{G})}{f_{n2}(\mathcal{G})}. \quad (4.8)$$

Для решения одномерных задач оптимизации используют методы одномерного поиска экстремума, описание которых представлено в первой главе.

4.3. Кинетические модели коррозионной стойкости полимерных композиционных материалов

Для всесторонней оценки кинетических процессов в композиционных материалах необходимо проанализировать классическую кинетическую модель. Кинетические изменения физико-механических параметров проявляются как самопроизвольные процессы, в результате совместной реализации химических, диффузионных и релаксационных механизмов.

Подобные явления описываются с позиции единой физической модели, в основе которой заложены эмпирические сведения о скорости изменения контролируемого параметра [145-147].

Для кинетических процессов, протекающих в гомогенных системах, скорость изменения контролируемого параметра (x) пропорциональна величине самого параметра:

$$\frac{dx}{dt} = -kx, \quad (4.9)$$

где k – постоянная величина.

Знак «минус» указывает на то, что с течением времени параметр x уменьшается до равновесного значения. Такое поведение характеризует самозатухающие процессы, которые часто наблюдаются в кинетических закономерностях.

Произведем разделение переменных в приведенном уравнении:

$$\frac{dx}{x} = -kdt.$$

В результате преобразований получим

$$d \ln x = -d(kt).$$

Последнее равенство можно записать в виде

$$\ln x = -kt.$$

Окончательно полученное выражение принимает форму:

$$x = x_0 \cdot e^{-kt}, \quad (4.10)$$

где x_0 – величина параметра x , соответствующая началу процесса, когда $t = 0$;

k – константа скорости процесса: $k = \frac{1}{T}$;

T – время, за которое параметр x изменяется в e раз.

Из (4.8) следует, что с течением времени параметр x экспоненциально понижается от начального значения x_0 до нуля. Такое поведение композитной системы характеризует процессы релаксации.

Из общих положений кинетики известно, что изучаемый параметр приближается к эксплуатационному значению в течение времени, приблизительно равному T . Таким образом, величина T является временным критерием, по которому можно производить оценку степени массопоглощения композита в агрессивных средах. Значение данного параметра является весьма важным при прогнозировании химической стойкости КМ, поскольку позволяет определять время выхода кинетики массопоглощения на стабилизированные значения.

В ходе теоретико-экспериментальных исследований (рис. 3.48–3.53) установлено, что кинетика массопоглощения дисперсно-наполненных КМ, с высокомолекулярным наполнителем, чаще всего имеет вид кривой, изображенной на рис. 4.8,а. Характерной особенностью этой зависимости является наличие асимптотического предела (x_m), к которому с течением времени стремится величина x .

Произведем модельный анализ процессов кинетики с асимптотическим приближением. Для этого используем метод возмущений, который заключается в следующем. Если стабилизированный параметр x_m изменить на величину $\Delta x = x - x_m$, за счет внешнего возмущающего воздействия, а затем снять это возмущение, то параметр x с течением времени самопроизвольно вернется к своему асимптотическому пределу, соответствующему кинетически стабилизированному значению x_m . В соответствии с этой моделью уравнение (4.10) запишется в виде

$$\frac{dx}{dt} = -k(x - x_m). \quad (4.11)$$

С целью упрощения расчетов введем новую переменную $z = x - x_m$. В начальный момент времени выполняется условие $t_0 = 0$, $x_0 = 0$, $z_0 = -x_m$. Значение x_m является величиной постоянной, поскольку соответствует пределу кинетической асимптотики $x = f(t)$. Согласно этому,

имеем $dz = dx$. Произведенные упрощения позволяют записать зависимость (4.7) в классической форме $\frac{dz}{dx} = -kz$. В результате разделения переменных получим $d \ln z = -kdt$.

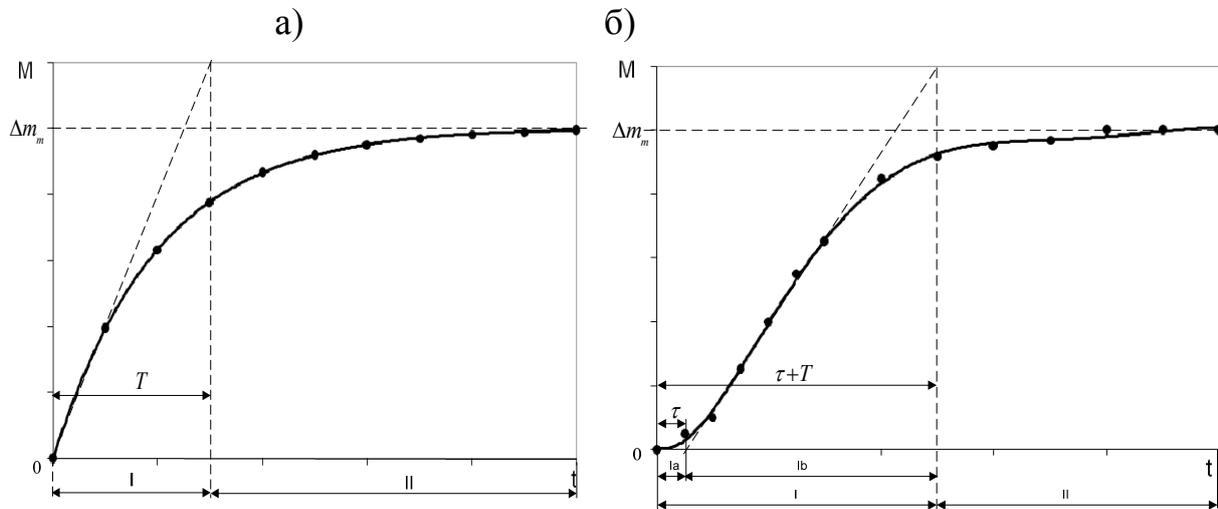


Рис. 4.8. Кинетика массопоглощения полимерного КМ:
а) без запаздывания; б) с запаздыванием

Интегрируя найденной уравнение в пределах $(t_0 \dots t)$ и $(z_0 \dots z)$, находим

$$\int_{z_0}^z d \ln z = -k \int_{t_0}^t dt; \ln \left[\frac{(x - x_m)}{(-x_m)} \right] = -kt.$$

После несложных преобразований имеем

$$x = x_m \cdot (1 - e^{-kt}). \quad (4.12)$$

Полученное уравнение является общеизвестной формой кинетических закономерностей с асимптотическим приближением исследуемого параметра и правомерно для однородных (гомогенных) систем.

Чаще всего в композитах наблюдается ограниченное массопоглощение, когда количество массы m продиффундировавшей среды в композит стабилизируется на некотором значении m_m . В дальнейшем, с течением времени, величина m_m остается неизменной. В данном случае преимущественно осуществляется физическое взаимодействие среды с композитом. Кинетика неограниченного массопоглощения связана с реализацией физического и химического механизмов. При химическом взаимодействии происходит активная деструкция, обусловленная растворением композита в химически активной среде. Массопоглощение, достигнув определенного максимума, с течением времени начинает снижаться. Уменьшение массы определяется переходом композита в раствор.

В процессе ограниченного массопоглощения в начальный период среда интенсивно диффундирует в композит через поверхностные трещины, поры и другие дефекты. Наблюдается снижение внутренних напряжений, в

дальнейшем наблюдается как межкристаллитная, так и межмолекулярная диффузия, в зависимости от диффузионной подвижности среды. В определенный период процесс массопоглощения затухает и стабилизируется. Так как в эпоксидном, полиэфирном, эпоксиполиуретановом КМ наполнители обладают химической инертностью к внешней воздействующей среде, то диффузия среды осуществляется преимущественно по матричному объему, о чем свидетельствует эффект набухания, присущий полимерам [42].

Заменив x на массопоглощение, получим:

$$\Delta m = \Delta m_m [1 - e^{-kt}]. \quad (4.13)$$

В результате экспериментально-теоретических исследований установлено, что для дисперсно-наполненных КМ, с низкомолекулярным наполнителем, характерен участок с медленным нарастанием выходной переменной в первые моменты времени (рис. 4.9, б, участок Ia) (рис.3.48-3.55). В этой связи внесем коррективы в уравнение (4.13):

$$\Delta m = \Delta m_m [1 - e^{-k(t-\tau)}], \quad (4.14)$$

где τ – время переходного запаздывания.

После шести месяцев экспозиции образцов в агрессивных средах данные результатов испытаний были обработаны по зависимостям (4.13-4.14). Сопоставление результатов прогнозирования кинетики массопоглощения по уравнениям (4.13–4.14) и данных экспериментов после шести месяцев экспозиции показали, что ошибка прогноза составляет не более 5%.

4.4. Оптимизационные модели технологических параметров механической обработки полимерных композиционных материалов

Для расчета режимов обработки при сверлении и фрезеровании эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых КМ в настоящее время используют стойкостные модели тейлоровского типа: 1) для операции

сверления – $V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v}{T^m \cdot S^{y_v}}$ (C_v – коэффициент факторов, не входящих в

уравнение в явном виде (физико-технические свойства обрабатываемого материала и осевого инструмента); D – диаметр инструмента; K_v – коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу; T – лимитируемое время работы инструмента; x_v , y_v , m – коэффициенты технологических параметров обработки); 2) для

операции фрезерования – $V = \frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}}$ (S_z – подача на зуб

фрезы; B – ширина срезаемого слоя; z – количество режущих кромок инструмента; w_v , g_v , n_v – коэффициенты технологических параметров обработки).

Технологические параметры обработки КМ, полученные по тейлоровской модели, плохо коррелируют с экспериментальными данными в области низких подач (рис. 4.9) Данный эффект наблюдается при различных операциях механической обработки осевыми инструментами, в том числе при фрезеровании.

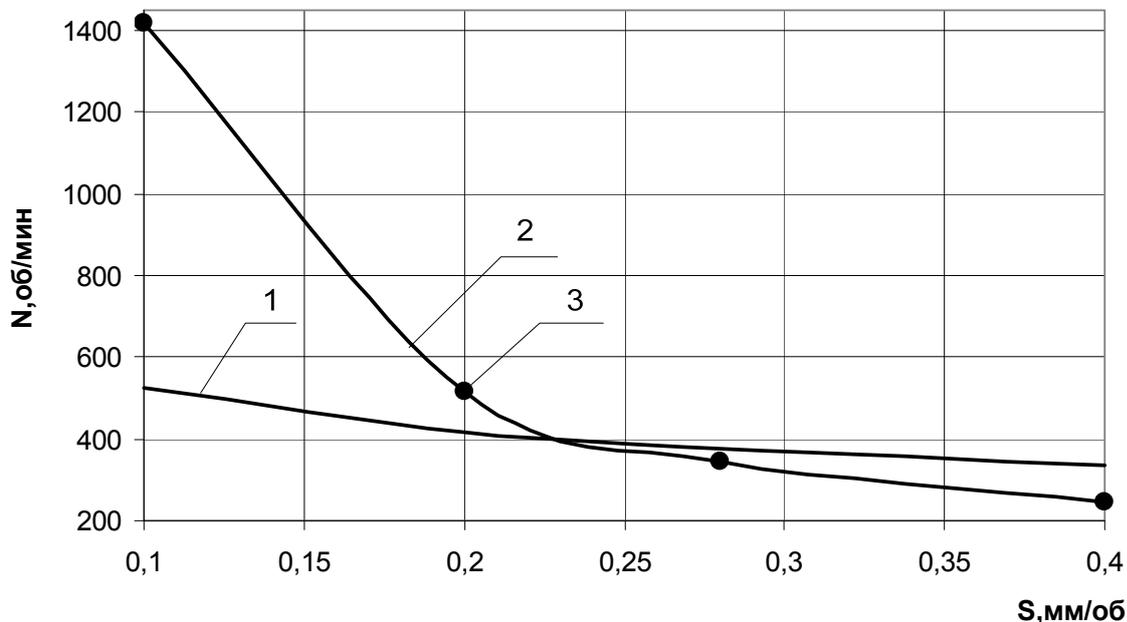


Рис. 4.9. Технологические параметры механической обработки КМ для операции сверления (ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; Маршалит $\varphi=0,3$): 1 – тейлоровская модель; 2 – по модели (4.22); 3 – экспериментальные данные

Твердость КМ характеризует поверхностные свойства и не учитывает внутренние дефекты машиностроительного материала. Условно-мгновенный, равновесный, динамический модули упругости и предел прочности при одноосном сжатии являются объемными свойствами полимерного КМ. С целью получения высококачественных машиностроительных изделий механической обработкой необходимо учитывать поверхностные и объемные свойства КМ.

Значительное влияние на качество получаемых поверхностей оказывает наличие внутренних дефектов (трещины, поры) в обрабатываемом материале. Внутренние поры КМ служат источниками возникновения микротрещин. С ростом приложенной нагрузки и длительности ее воздействия происходит рост микротрещин и их объединение в магистральную трещину, приводящую к разрушению образца. Таким образом, наличие внутренних дефектов приводит к значительному снижению прочности КМ, которая становится значительно ниже, чем теоретическая.

С целью увеличения точности аппроксимации экспериментальных данных, уменьшения погрешности расчета режимов обработки в стойкостные

модели технологических параметров механической обработки полимерных композитов необходимо внести безразмерный экспоненциальный член e^W . Значение показателя степени определяется на основе экспериментальных данных, в соответствии с методологией, предложенной Грановским И.И. [148].

Для расчета технологических параметров КМ в стойкостные тейлоровские модели внесем ряд поправочных коэффициентов:

$$K_{\text{упр.с}} = \left(\frac{E_c}{E_m} \right)^{z1} = \left(\frac{E_m E_f + [E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})] \cdot b_{\text{упр}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k_{\text{уд}}}{(E_m \mathcal{G} + E_f (1 - \mathcal{G})) \cdot E_m} \right)^{z1}, \quad (4.15)$$

где $K_{\text{упр.с}}$ – коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ динамического модуля упругости обрабатываемого материала;

$z1$ – показатель степени.

$$K_{\text{сж.с}} = \left(\frac{R_{\text{сж.с}}}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z2} = \left(\frac{R_{\text{сж.м}} \cdot (1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \mathcal{G}') + b_{\text{сж}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z2} = \left[(1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \mathcal{G}') + \frac{b_{\text{сж}}}{R_{\text{сж.м}}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k \right]^{z2}, \quad (4.16)$$

где $K_{\text{сж.с}}$ – коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ предела прочности при одноосном сжатии обрабатываемого материала;

$z2$ – показатель степени.

$$K_{\text{нв}} = \left(\frac{HB_{\text{пр.с}}}{HB_{\text{пр.м}}} \right)^{z3} = \left(\frac{\frac{R_{\text{сж.м}} \cdot (1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \mathcal{G}^v) + b_{\text{сж}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k}{K_{\text{сж}}} \cdot K_{\text{сж}}}{\frac{R_{\text{сж.м}}}{K_{\text{сж}}}} \right)^{z3} = \left[(1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \mathcal{G}^v) + \frac{b_{\text{сж}}}{R_{\text{сж.м}}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k \right]^{z3}, \quad (4.17)$$

где $K_{\text{нв}}$ – коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ твердости обрабатываемого материала;

$z3$ – показатель степени.

$$K_0 = \left(\frac{E_{0c}}{E_{0m}} \right)^{z4}, \quad (4.18)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ условно-мгновенного модуля упругости обрабатываемого материала;

$z4$ – показатель степени.

$$K_{ув} = \left(\frac{E_{увс}}{E_{уем}} \right)^{z5}, \quad (4.19)$$

где $K_{ув}$ – коэффициент, учитывающий влияние на технологические параметры КМ равновесного модуля упругости обрабатываемого материала;

$z5$ – показатель степени.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что, чем выше прочностные и упругие свойства КМ, тем выше технологические параметры обработки осевыми инструментами. Таким образом, зависимость между коэффициентами $K_{упр.с}$, $K_{сж.с}$, $K_{нв}$, K_0 , $K_{ув}$ и скоростью механической обработки прямо пропорциональна.

Установлено, что ростом внутренних дефектов происходит снижение прочности эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов. Следовательно, обработку данных КМ следует ввести при более низких режимных параметрах.

С учетом вышесказанного получены экспоненциальные модели стойкости, учитывающие прочность, твердость, динамический, условно-мгновенный и равновесный модули упругости обрабатываемых материалов (рис. 4.9):

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot [(1 + \alpha_{сж} \cdot \mathcal{G}^v) + b_{сж1} \cdot (S_{уд2} - S_{уд1})]^{E^{2+z3}} \cdot e^w}{T^m \cdot S^{y_v}} \times \left(\frac{E_m E_f + [E_m \mathcal{G} + E_f(1 - \mathcal{G})] \cdot b_{упр} \cdot S_{уд} \cdot k_{уд}}{(E_m \mathcal{G} + E_f(1 - \mathcal{G})) \cdot E_m} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{E_{0с}}{E_{ом}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{уем}} \right)^{z5}, \quad (4.20)$$

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot [(1 + \alpha_{сж} \cdot \mathcal{G}^v) + b_{сж1} \cdot (S_{уд2} - S_{уд1})]^{E^{2+z3}} \cdot e^w}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \times \left(\frac{E_m E_f + [E_m \mathcal{G} + E_f(1 - \mathcal{G})] \cdot b_{упр} \cdot S_{уд} \cdot k_{уд}}{(E_m \mathcal{G} + E_f(1 - \mathcal{G})) \cdot E_m} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{E_{0с}}{E_{ом}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{уем}} \right)^{z5}, \quad (4.21)$$

где $b_{сж.1} = \frac{b_{сж}}{\sigma_{сж.m}}$ – постоянная; w – показатель степени зависящий, от D, S, T .

Учитывая коэффициенты коррозионной стойкости, получим:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot S^{y_v}} \cdot \left(\frac{E_c \cdot k_{m.упр}}{E_m} \right)^{z1} \times \left(\frac{R_{сж.с} \cdot k_{m.сж}}{R_{сж.m}} \right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{сж.с} \cdot k_{m.нв}}{R_{сж.m}} \right)^{z3} \cdot k_0^{z4} \cdot k_{ув}^{z5}, \quad (4.22)$$

$$V = \frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp} \right)^{z1} \times$$

$$\times \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.м}} \cdot k_{m.сж} \right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.м}} \cdot k_{m.HB} \right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{yв}^{z5}, \quad (4.23)$$

Эффективность механической обработки осевым инструментом во многом зависит от уровня технологической подготовки производства. В связи со значительным количеством нормативной информации по назначению технологических параметров и нормам расхода инструмента существует проблема выбора оптимальных условий обработки.

Задача выбора режимов работы инструмента в этом случае заключается в получении таких искомых параметров процесса, которые обеспечили бы его максимальную эффективность в заданных конкретных производственных условиях при выполнении всех требований к нему. Последние накладывают определенные технические ограничения на возможные технологические параметры [149].

Модель оптимизации технологических параметров обработки высокотехнологичных полимерных КМ строится по двум связанным между собой функциональным группам, включающим целевой критерий (критерий оптимизации) и область граничных условий в виде неравенств, образующих область возможных решений. Целевая функция представляет собой аналитическую зависимость между целевым критерием и параметрами оптимизации процесса механической обработки. Параметрами оптимизации выступают скорость обработки и подача.

Целевые критерии делят на две группы: технологические и обобщенные. Технологические – максимальная производительность обработки ($F_{от}(n, S)$): $F_{от}(n, S) = \frac{L}{n \cdot S} \rightarrow \min$ (L – длина рабочего хода осевого инструмента, мм).

Данный критерий обеспечивает достижение максимальной выработки рабочего. Он применяется при ликвидации узких мест, когда экономия «живого» труда имеет наибольшее значение. Однако данный критерий может оказаться экономически неоправданным, поэтому предпочтительным является критерий, ориентированный на комплексные показатели – минимальную себестоимость процесса обработки и высокий коэффициент загрузки оборудования ($F_{ок}(n, S)$):

$$F_{ок}(n, S) = \frac{L}{n \cdot S} \cdot (k_{cm} + k_{зн}) + \frac{k_{ин} \cdot (318 \cdot D^{x_v-1} \cdot C_v)^{1/m}}{(n \cdot S^{y_v})^{1/m}} \rightarrow \min, \quad (4.24)$$

где k_{cm} – стоимость одной минуты работы станка;

$k_{зн}$ – стоимость одной минуты рабочего времени работника;

$k_{ин}$ – стоимость инструмента.

Однако данная форма записи обобщенного критерия, приведенного в справочной литературе [149], является неадекватной для современного машиностроительного производства, так как не учитывает ряд показателей, а именно: физико-технологические свойства обрабатываемого материала, стойкость осевого инструмента.

Определим стойкость инструментов, используя уравнения (4.22–4.23):
– для сверла

$$T = \left(\frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot e^w}{V \cdot S^{y_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{m.сжс} \right)^{z2} \times \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{m.НВ} \right)^{z3} \cdot \left(\frac{E_{0с}}{E_{от}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{увт}} \right)^{z5} \right)^{1/m}, \quad (4.25)$$

– для фрезы

$$T = \left(\frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v \cdot e^w}{V \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{m.сжс} \right)^{z2} \times \left(\frac{R_{сжс.с}}{R_{сжс.т}} \cdot k_{m.НВ} \right)^{z3} \cdot \left(\frac{E_{0с}}{E_{от}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{увс}}{E_{увт}} \right)^{z5} \right)^{1/m}. \quad (4.26)$$

Суммарная стойкость инструмента $\sum T$, мин, до полного изнашивания, с учетом числа переточек:

$$\sum T = (K + 1) \cdot T, \quad (4.27)$$

где K – число переточек режущего инструмента, зависящее от марки инструментального материала и конструкции инструмента.

Если инструмент не перетачиваемый, то $K=1$ и $\sum T = T$.

Основное технологическое время равно:

$$t_0 = \frac{L}{n \cdot S}.$$

Взяв отношение между t_0 и $\sum T$, определим долю износа инструмента, приходящую на одну обработанную деталь.

Подставив последнее отношение в уравнение (4.25) и вынося t_0 за скобки, получим:

– для операции сверления

$$F_{ок}(n, S) = \frac{L}{n \cdot S} \cdot [k_{ст} + k_{зи} + \frac{k_{ин} \cdot (n \cdot S^{y_v})^{1/m}}{(k+1)(318C_v \cdot D^{x_v-1} \cdot e^w \cdot K_v \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сжс}}{R_{сжт}} \cdot k_{m.сжс} \right)^{z2} \cdot \left(\frac{R_{сжс}}{R_{сжт}} \cdot k_{m.НВ} \right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{ув}^{z5})^{1/m}}] \quad (4.28)$$

– для операции фрезерования

$$F_{ок}(n, S_z) = \frac{L}{n \cdot S_z} \cdot [k_{ст} + k_{зп} + \frac{k_{ин} \cdot (n \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v} \cdot t^{x_v})^{1/m}}{(k+1)(318C_v \cdot D^{w_v-1} \cdot e^w \cdot K_v \cdot (\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp})^{z1} \cdot (\frac{R_{сжс}}{R_{сжт}} \cdot k_{m.сжс})^{z2} \cdot (\frac{R_{сжс}}{R_{сжт}} \cdot k_{m.HB})^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{yB}^{z5})^{1/m}}] \quad (4.29)$$

Выбор ограничений представляет аналитическую взаимосвязь между технологическими условиями обработки и подлежащими оптимизации рабочими режимами резания. Дополнительные условия образуются элементами системы (станок, приспособление, инструмент, деталь) или совокупностью физических переменных процесса резания (силы резания, период стойкости, качество обработанной поверхности).

Ограничения, влияние которых на оптимизацию технологических параметров проявляется наиболее значительно, могут быть разделены на группы. Ограничения, отнесенные к станку:

- 1) минимальная (S_{min}) и максимальная подача станка (S_{max});
- 2) предельные скорости обработки, зависящие от минимальных (n_{min}) и максимальных (n_{max}) чисел оборотов шпинделя станка;
- 3) максимально допустимые нагрузки, ограниченные мощностью электродвигателя привода главного движения

$$S^{y_z} n^{n_z} \leq \frac{N_H \cdot \eta}{C_z \cdot D^{z_z} \cdot \pi^{n_z} \cdot K_z}, \quad (4.30)$$

- где N_H – мощность электродвигателя главного привода станка, кВт;
 η – коэффициент полезного действия механизма передачи от электродвигателя к инструменту;
 C_z – постоянный коэффициент, характеризующий условия обработки;
 K_z – общий поправочный коэффициент на мощность, учитывающий измененные условия обработки против нормативных;
 y_z, n_z, z_z – показатели степени;

- 4) максимально допустимые нагрузки механизма подачи станка

$$n^{n_s} \cdot S^{y_s} \geq \frac{10^{3 \cdot n_s} \cdot P_{s.дон}}{C_s \cdot D^{n_s + z_s} \cdot \pi^{n_s} \cdot K_s}, \quad (4.31)$$

- где n_s, z_s – показатели степени;
 $P_{s.дон}$ – сила подачи станка, допускаемая прочностью механизмов станка;
 K_s – поправочный коэффициент на подачу резания;

C_s – постоянный коэффициент, характеризующий условия обработки;

5) производительность станка

$$n \cdot S \geq \frac{L \cdot R}{60 \cdot K_3 \cdot r_R - T_{B.H.} \cdot R}, \quad (4.32)$$

где R – заданная производительность станка, шт.ч.;

K_3 – коэффициент загрузки станка;

r_R – число деталей, обрабатываемых одновременно на одной позиции;

$T_{B.H.}$ – вспомогательное неперекрываемое время, мин.

Механическая обработка полимерных композитов требует введения дополнительных ограничений, характеризующих особенности получения данной группы материалов. С учетом моделей (4.22–4.23), получены ограничения, устанавливающие взаимосвязь между технологическими параметрами обработки и физико-технологическими свойствами обрабатываемого материала:

– для операции сверления

$$S^{y_v} n \leq \frac{318 \cdot C_v \cdot D^{x_v-1} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.сж} \right)^{z2} \times \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.HB} \right)^{z3} \cdot \left(\frac{E_{0c}}{E_{от}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{yвс}}{E_{yвт}} \right)^{z5}. \quad (4.33)$$

– для операции фрезерования

$$S_z^{y_v} n \leq \frac{318 \cdot C_v \cdot D^{w_v-1} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left(\frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m.ynp} \right)^{z1} \cdot \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.сж} \right)^{z2} \times \left(\frac{R_{сж.с}}{R_{сж.т}} \cdot k_{m.HB} \right)^{z3} \cdot \left(\frac{E_{0c}}{E_{от}} \right)^{z4} \cdot \left(\frac{E_{yвс}}{E_{yвт}} \right)^{z5}. \quad (4.34)$$

Сумма ограничений образует “комплекс ограничений”, а область совместности ограничений, выраженная неравенствами, – “поле решений” (рис. 4.10). В полученном “поле решений” возможно нахождение оптимальных режимов обработки.

На основе неравенств и уравнений ограничений выбирается рациональные технологические параметры обработки в рамках заданных ограничений. Для решения задачи оптимизации используются методы линейного программирования [150].

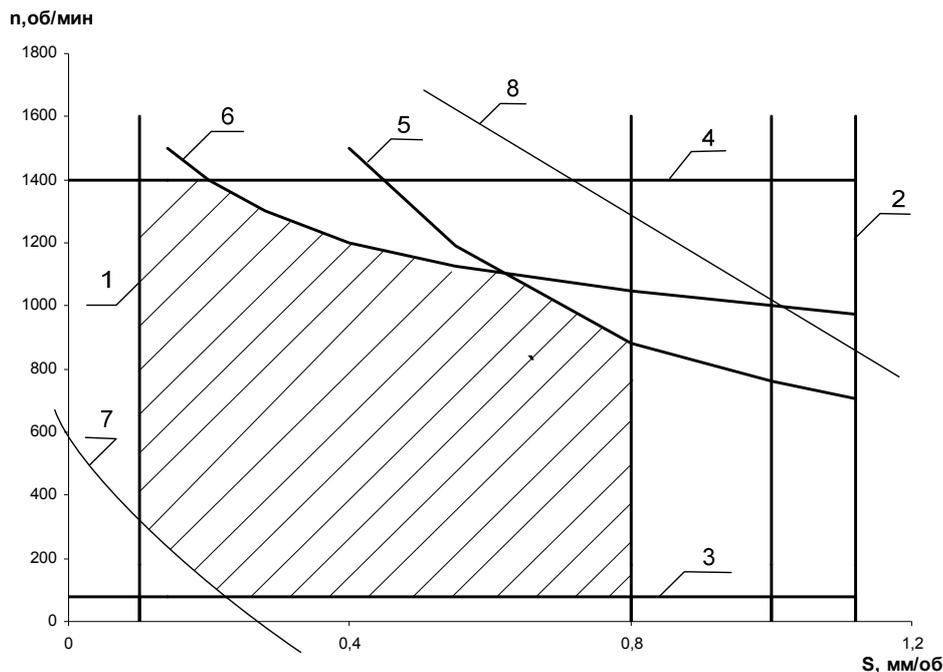


Рис. 4.10. Графическая модель определения оптимального режима обработки КМ (ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; маршалит $\vartheta=0,3$):
 1,2,3,4 – ограничения связанные с кинематикой станка;
 5 – со стойкостью инструмента; 6 – максимально допустимые нагрузки привода главного движения; 7 – по производительности обработки;
 8 – максимально допустимые нагрузки механизма подачи станка

Для анализа математической модели процесса механической обработки с использованием методов линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнения оценочных функций преобразовать в линейные формы.

Прологарифмировав систему ограничений и уравнения оценочной функции, введя обозначения $\lg n = X_1$ и $\lg S = X_2$, получим систему линейных неравенств и линейные функции, подлежащие оптимизации, которые в совокупности и представляют собой математическую модель процесса механической обработки [149]:

$$\begin{cases} z_1 \cdot X_1 + y_1 \cdot X_2 \leq b_1; \\ z_2 \cdot X_1 + y_2 \cdot X_2 \leq b_2; \\ \dots\dots\dots; \\ z_n \cdot X_1 + y_n \cdot X_2 \leq b_n; \\ X_1 \geq 0; X_2 \geq 0; \end{cases} \quad (4.35)$$

$$f_i = C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2 \rightarrow \max(\min),$$

где C_1, C_2 – весовые коэффициенты скорости и подачи соответственно.

Определение оптимальных технологических параметров методами линейного программирования математически сводится к тому, чтобы среди всевозможных неотрицательных значений X_1 и X_2 системы найти такие значения $X_{1\text{ опт}}$ и $X_{2\text{ опт}}$, при которых линейная форма целевой функции принимает экстремальное значение.

Для решения системы неравенств (4.33) используем симплекс метод. Сущность данного метода заключается в нахождении экстремального значения последовательным переходом, от одной вершины многоугольника решений к другой, при этом значение целевой функции на каждом последующем шаге принимает лучшее (по крайней мере, не худшее) значение до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение – вершина, где достигается оптимальное значение функции цели. Симплекс метод позволяет вводить новые технические ограничения, минимизировать количество шагов для нахождения экстремума, легко алгоритмируется и используется в компьютерных расчетах [149, 150].

При решении практических задач нередко приходится иметь дело с ситуациями, когда необходимо одновременно выполнение нескольких критериев, зачастую противоречивых. При оптимизации режимов механической обработки осевыми инструментами необходимо обеспечение максимальной производительности, минимальной себестоимости процесса резания и высокого коэффициента загрузки оборудования.

Для решения данных задач используют методы многокритериальной оптимизации, представленные в первой главе. Для решения ЗМКО используем множество Парето (рис. 4.11) ($U = -F_{ot}(n; S)$; $V = -F_{ok}(n; S)$).

В общем случае U_{max} и V_{max} достигаются в разных точках, а точка $(U_{\text{max}}; V_{\text{max}})$ лежит вне плоскости Парето. Для решения поставленной задачи необходимо нахождение компромиссного решения, используя метод уступок или метод идеальной точки.

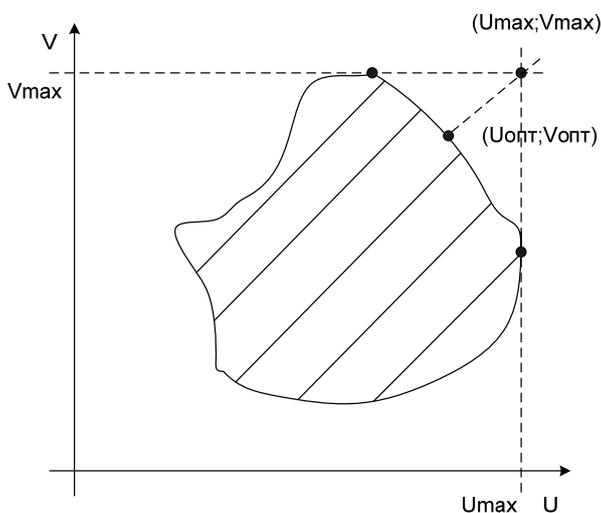


Рис. 4.11. Множество Парето

Метод уступок заключается в том, что лицо принимающее решение, работая в режиме диалога со специалистом, анализирует точки на границе Парето и соглашается остановиться на некоторой компромиссной точке.

Метод идеальной точки состоит в отыскании на границе Парето точки, ближайшей к точке утопии, задаваемой лицом, принимающим решение. Формулируется цель в виде желаемых значений показателей, и в качестве координат целевой точки выбирается сочетание наилучших значений всех критериев.

Метод уступок использует базу прецедентов, экспертные системы, элементы искусственного интеллекта для нахождения оптимального решения. Метод идеальной точки не требует разработки сложных интеллектуальных систем, а компромиссное решение получают посредством логических алгоритмов. В этой связи для решения ЗМКО используем метод идеальной точки.

С применением $F(x)$, $F(g)$, $F_i(n,S)$, $F_i(n,S_z)$, $F_{ok.ca}(n,S)$ и $F_{ok.fp}(n,S_z)$ установлены режимы обработки и определены высокотехнологичные составы для получения полимерных КМ, используемых для производства фасонных изделий и футеровочных плит (табл.4.5).

Как видно из табл. 4.5, полученные полимерные композиты по комплексным показателям качества (шероховатость поверхности, наличие сколов и трещин, других дефектов) превосходят изделия, изготовленные по справочным классическим моделям. На обработанной поверхности отсутствуют выкрашивания материала на входе и выходе инструмента, риски, трещины, сколы, оплавления, задиры, прижоги и другие дефекты, связанные с механической обработкой (рис. 4.12).

Таким образом, шероховатость полученных поверхностей ниже, чем при заводских режимах (табл.4.5). Следовательно, стойкость инструмента и производительность механической обработки оказались выше.

Т а б л и ц а 4.5

Оптимизированные высокотехнологичные составы ПКМ

№	Состав					Рекомендуемые режимы обработки			Справочные режимы обработки		
	Полимерная смола	Отверди-гель мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Модификатор мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Пластификатор мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Объемное содержание наполнителя	n , об/мин	S , мм/об	R_a , мкм	n , об/мин	S , мм/об	R_a , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Операция сверления											
Фитинги											
1	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,3$	500	0,20	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
2	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,3$	500	0,20	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
3	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,3$	500	0,20	6,5-7,5	500	0,20	6,5-7,5
4	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,3$	355	0,14	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
Футеровочные плиты											
5	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\nu=0,4$	355	0,28	6,5-7,5	500	0,20	6,5-7,5
6	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\nu=0,4$	355	0,28	6,0-7,0	500	0,20	6,5-7,5
7	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент $\nu=0,4$	355	0,28	6,5-7,5	500	0,20	6,5-7,5
8	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,4$	355	0,20	6,5-7,5	500	0,20	7,0-8,0
9	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,4$	355	0,20	6,5-7,5	500	0,20	7,0-8,0
10	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,4$	355	0,28	6,5-7,5	500	0,20	7,0-8,0
11	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,4$	250	0,20	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
12	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Гранитный порошок $\nu=0,4$	500	0,28	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0

Продолжение табл. 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Гранитный порошок $\nu=0,4$ Полиамидное волокно $\nu=0,02$	710	0,28	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
14	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил $\nu=0,4$	250	0,20	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
15	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз $\nu=0,3$	500	0,28	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
16	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз $\nu=0,4$	355	0,28	6,5-7,5	500	0,20	6,5-7,5
17	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит $\nu=0,3$	500	0,28	7,0-8,0	500	0,20	7,0-8,0
18	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит $\nu=0,4$	355	0,28	6,5-7,5	500	0,20	6,5-7,5
19	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент $\nu=0,3$	500	0,28	6,5-7,5	500	0,20	6,5-7,5
20	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент $\nu=0,4$	355	0,28	6,0-7,0	500	0,20	6,0-7,0
21	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Аэросил $\nu=0,4$	250	0,20	7,0-8,0	500	0,20	7,5-8,5
Операция фрезерования											
Фитинги											
1	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,3$	1500	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
2	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,3$	1500	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
3	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,3$	1500	0,20	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
4	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,3$	1000	0,14	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
Футеровочные плитки											
5	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\nu=0,4$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
6	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\nu=0,4$	1000	0,28	6,0-7,0	1500	0,20	6,5-7,5
7	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент $\nu=0,4$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
8	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,4$	1000	0,20	6,5-7,5	1500	0,20	7,0-8,0
9	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,4$	1000	0,20	6,5-7,5	1500	0,20	7,0-8,0

Окончание табл. 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,4$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	7,0-8,0
11	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,4$	750	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
12	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Гранитный порошок $\nu=0,4$	1500	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
13	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Гранитный порошок $\nu=0,4$ Полиамидное волокно $\nu=0,02$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	7,0-8,0
14	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил $\nu=0,4$	750	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
15	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз $\nu=0,3$	1500	0,28	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
16	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Диабаз $\nu=0,4$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
17	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит $\nu=0,3$	1500	0,28	7,0-8,0	1500	0,20	7,0-8,0
18	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Маршалит $\nu=0,4$	1000	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
19	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент $\nu=0,3$	1500	0,28	6,5-7,5	1500	0,20	6,5-7,5
20	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Цемент $\nu=0,4$	1000	0,28	6,0-7,0	1500	0,20	6,0-7,0
21	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	-	Аэросил $\nu=0,4$	750	0,20	7,0-8,0	1500	0,20	7,5-8,5

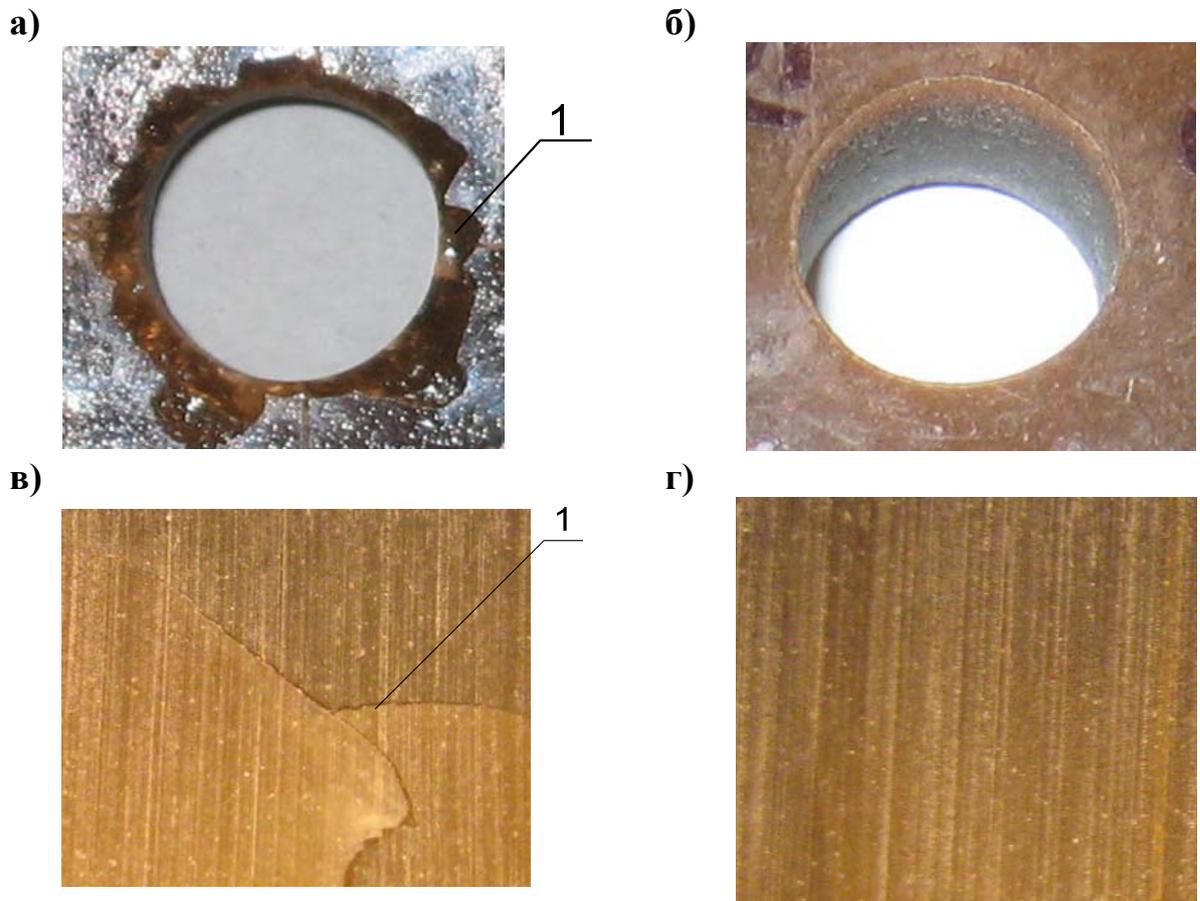


Рис. 4.12. Внешний вид поверхностей КМ, полученных механической обработкой сверлением (а, б) и фрезерованием (в, г) (ЭЛ-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; маршалит $\mathcal{G}=0,3$):
а) и в) справочные режимы (x3);
б) и г) по математическим моделям (4.22; 4.23) (x3); 1 – сколы

5. СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Система автоматизированного проектирования и создания полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами

С целью сокращения времени на подготовку высокотехнологичных составов КМ, повышения качества изделий из КМ, полученных механической обработкой, создана система автоматизированного проектирования и создания полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами (САПС ПКМ).

Объектами расчета САПС ПКМ являются: физико-механические свойства КМ; технологические параметры механической обработки КМ.

На рис. 5.1 показана структурная модель программного обеспечения САПС ПКМ. САПС ПКМ интегрирована в общую систему автоматизации производства машиностроительных материалов через единую сеть, связывающую, также, автоматизированную систему научных исследований [1].

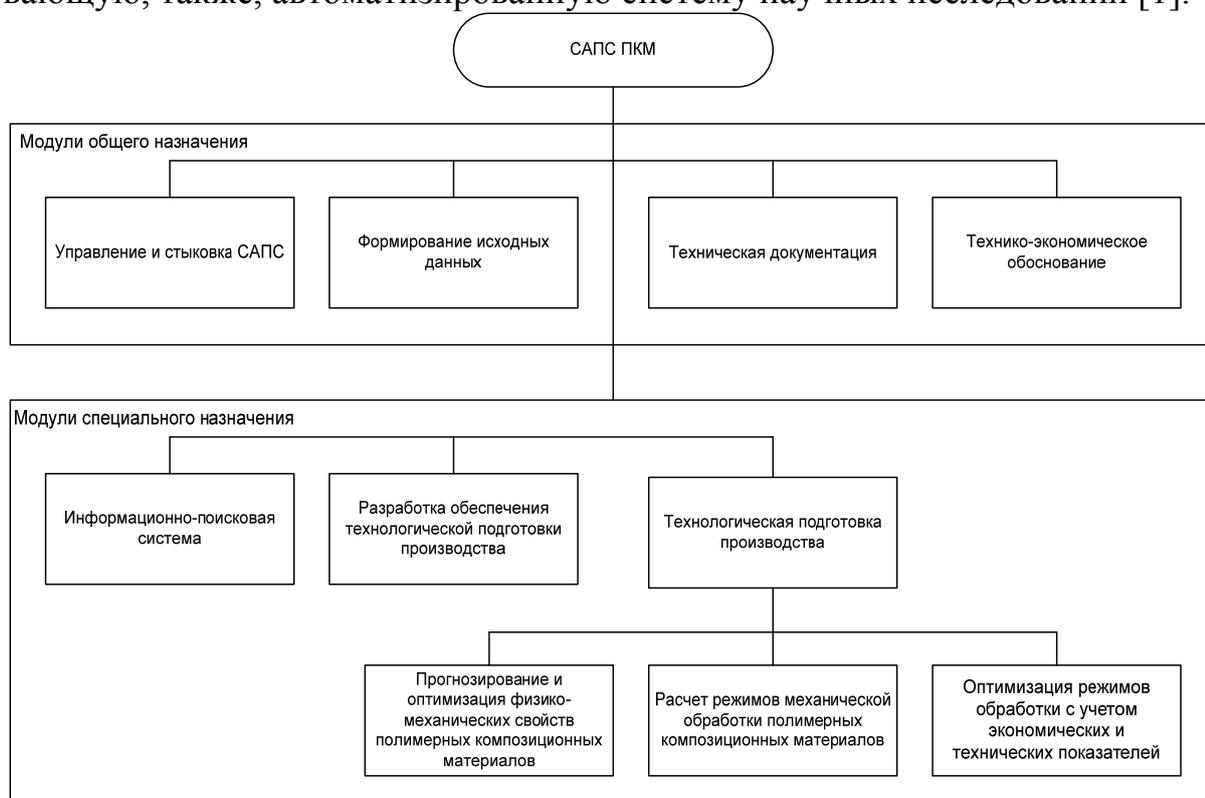


Рис.5.1. Структурная модель САПС ПКМ

Эффективность производства изделий и материалов в машиностроении из полимерных КМ во многом зависит от уровня технологической

подготовки производства. При значительном количестве нормативной информации затруднителен выбор оптимальных составов и условий производства. Для решения задачи оптимизации режимов обработки КМ разработана система информационного обеспечения, позволяющая идентифицировать различные альтернативные решения при механической обработке эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов. Разработанная система отражает совокупность интегрированного потока научной и производственной информации, условия данного производства.

На основе представленных моделей прогнозирования физико-технологических свойств, расчета режимов механической обработки осевыми инструментами разработан общий алгоритм работы САПС ПКМ, представленный на рис. 5.2.

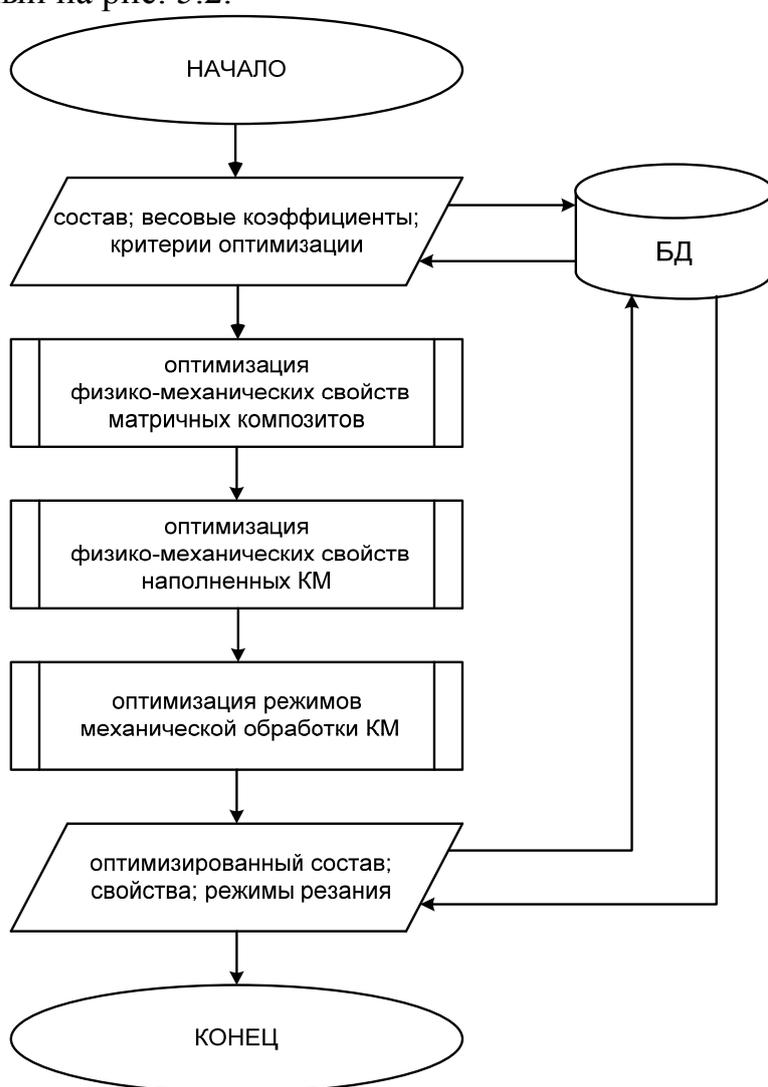


Рис. 5.2. Общий алгоритм работы САПС ПКМ

В САПС использованы принципы оптимизации, учитывающие значительное количество функциональных, технологических и экономических факторов, и организации структуры программ и подпрограмм,

облегчающих работу пользователя. Предлагаемая программа предусматривает возможность накопления информации в базе данных (БД) по прогнозным моделям, по процессам обработки, оборудованию, инструменту, отражающим условия работы предприятия. Алгоритм работы САПС может быть дополнена другими элементами, в частности, по составлению управляющих программ для станков с числовым программным управлением.

Построение САПС ПКМ осуществлено в рамках *CALS-технологии* (*Continuous Acquisition and Life Cycle Support*), предметом которой является создание единой интегрированной модели машиностроительного изделия или конструкции в рамках их жизненного цикла.

Международные стандарты в этой области определяют формат и содержание:

1) информационных моделей продукта (конструкторская, производственная и эксплуатационная модели);

2) информационных моделей жизненного цикла (функциональное моделирование жизненного цикла и выполняемых в его ходе бизнес процессов);

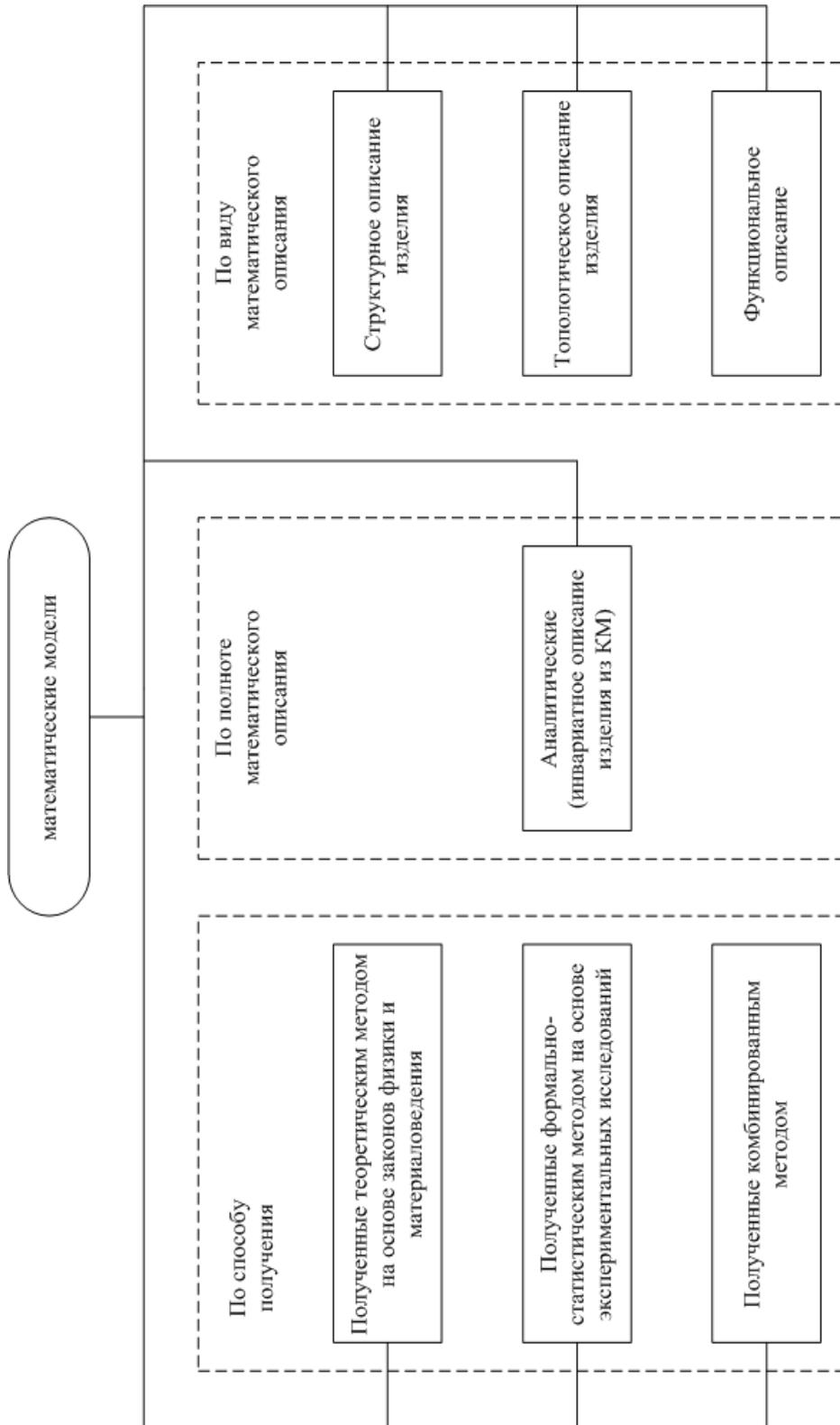
3) информационных моделей среды (форма представления и методы использования информации о производстве и используемых производственных ресурсах, их характеристиках и ограничениях с точки зрения управления производством).

Разработанная САПС ПКМ обеспечивает высокое качество проектирования композитов в системе поддержки жизненного цикла путем электронного документирования всех выполняемых процессов и процедур.

В рамках САПС ПКМ созданы модули «Расчет режимов механической обработки ПКМ», «Прогнозирование и оптимизация физико-механических свойств ПКМ» и «Оптимизация режимов обработки с учетом экономических и технических показателей», реализуемые как экспертные системы (рис.5.1).

Экспертные системы (ЭС) разработаны как прикладные информационные системы, база знаний которых представляет собой формализованные эмпирические знания высококвалифицированных специалистов (экспертов) в области разработки, проектирования и изготовления изделий из полимерных КМ [151–156]. ЭС требует разработки математических моделей прогнозирования физико-механических свойств полимерных наполненных КМ, расчета технологических параметров механической обработки и их оптимизации.

На рис.5.3 представлена классификация математических моделей, позволяющая систематизировать основные типы задач САПС ПКМ по степени формализуемости и выдать практические рекомендации для применения того или иного вида математической модели и способа решения поставленной задачи.



5.3. Классификация математических моделей

На рис.5.4 изображена обобщенная структура экспертных систем. Машина логического вывода - механизм рассуждений, оперирующий знаниями и данными с целью получения новых данных из знаний и других данных, имеющих в рабочей памяти. Для этого использовали программно реализованный механизм дедуктивного логического вывода (механизм поиска решения). Подсистема общения служит для ведения диалога с пользователем, в ходе которого ЭС запрашивает у пользователя необходимые факты для процесса рассуждения, а также, дающая возможность пользователю контролировать и корректировать ход рассуждений экспертной системы. Подсистема объяснений необходима для того, чтобы дать возможность пользователю контролировать ход рассуждений и учиться у экспертной системы. Подсистема приобретения знаний служит для корректировки и пополнения базы, в более сложных экспертных системах - средства для извлечения знаний из баз данных, неструктурированного текста, графической информации и т.д. (рис. 5.4). Алгоритмы подсистем, входящих в данные модули, представлены на рис. 5.6–5.8

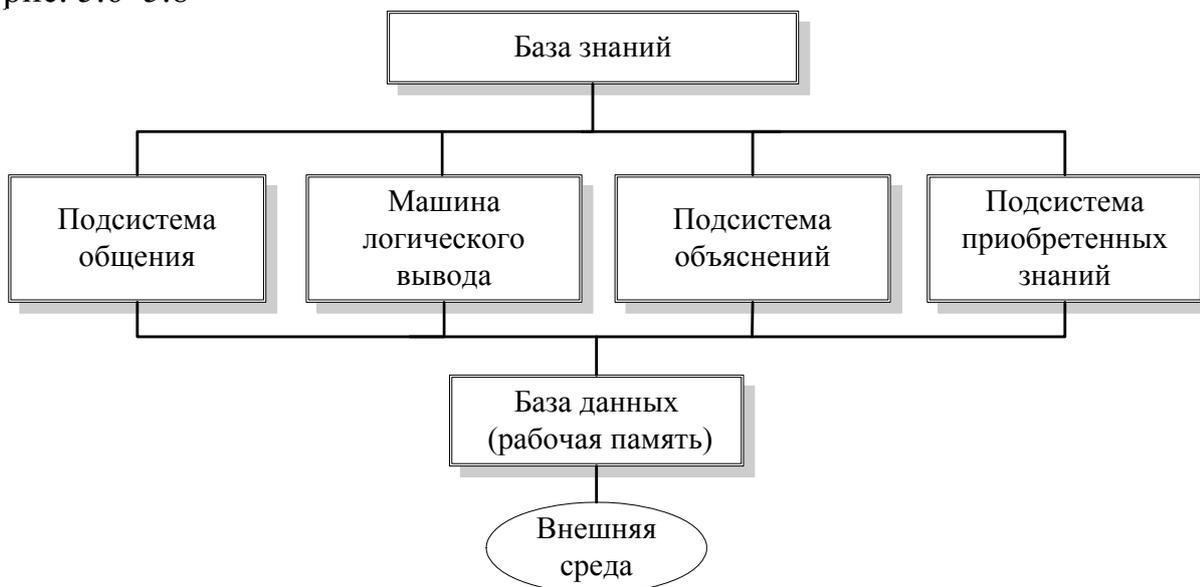


Рис. 5.4. Обобщенная структура ЭС

На рис.5.5. показана общая схема программного обеспечения САПС ПКМ, представляющую собой двухуровневую систему, построенную на основе IBM PC со штатным набором периферийных устройств. При необходимости данную систему могут обеспечивать несколько автоматизированных рабочих мест (АРМ) на основе персональных компьютеров. САПС ПКМ может быть интегрирована в общую систему автоматизации производства машиностроительных материалов через единую сеть, связывающую, также, автоматизированную систему научных исследований. Информационное обеспечение единой интегрированной системы позволит межотраслевое использование глобальных информационных систем по материаловедению.

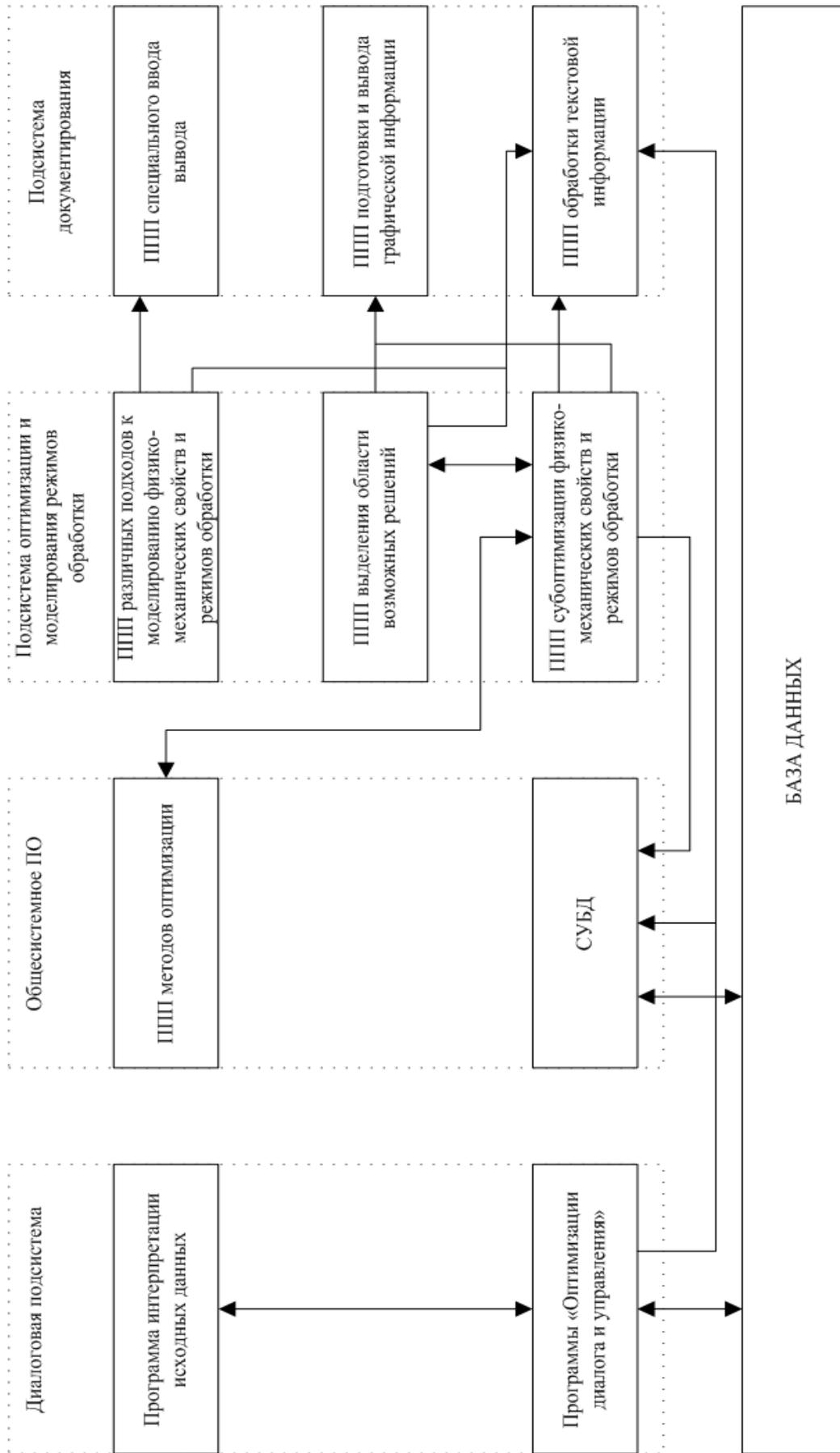


Рис.5.5. Общая схема программного обеспечения САПС КМ

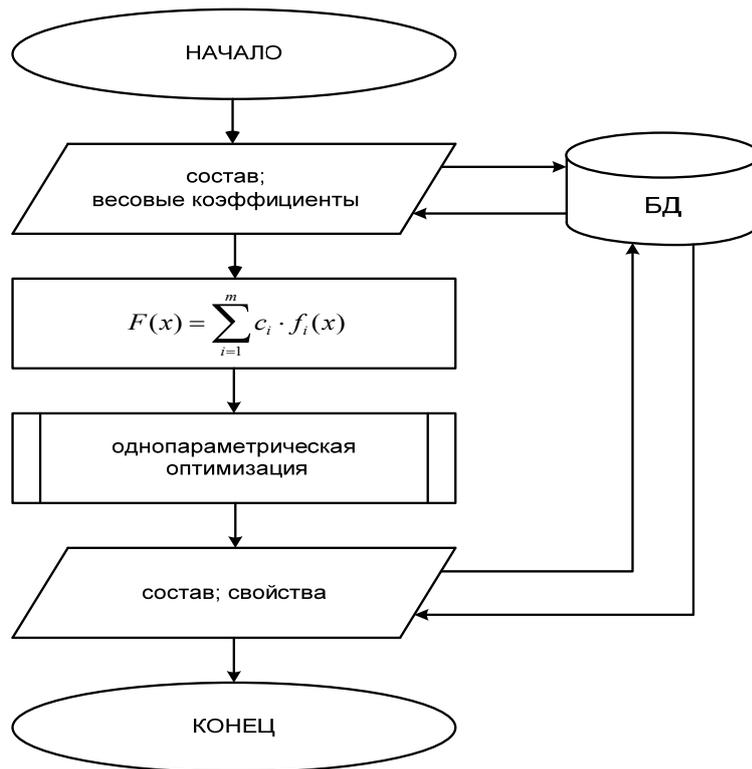


Рис. 5.6. Алгоритм прогнозирования физико-механических свойств высокотехнологичных полимерных наполненных КМ

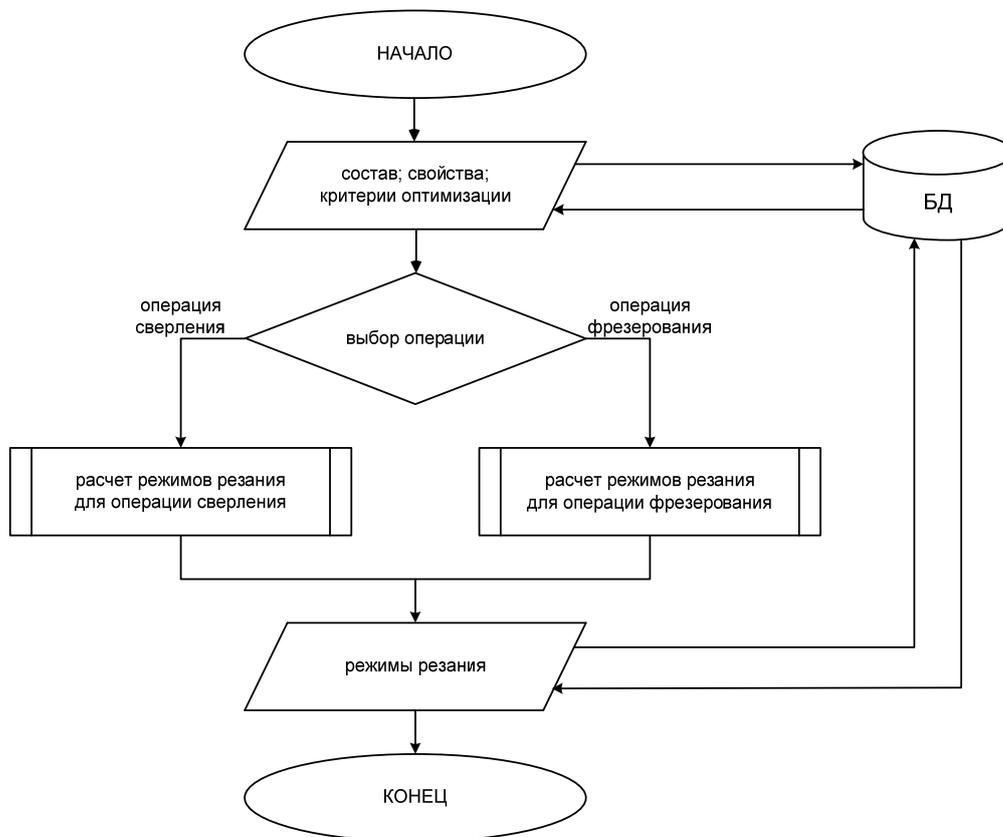


Рис. 5.7. Алгоритм расчета режимов механической обработки высокотехнологичных полимерных наполненных КМ

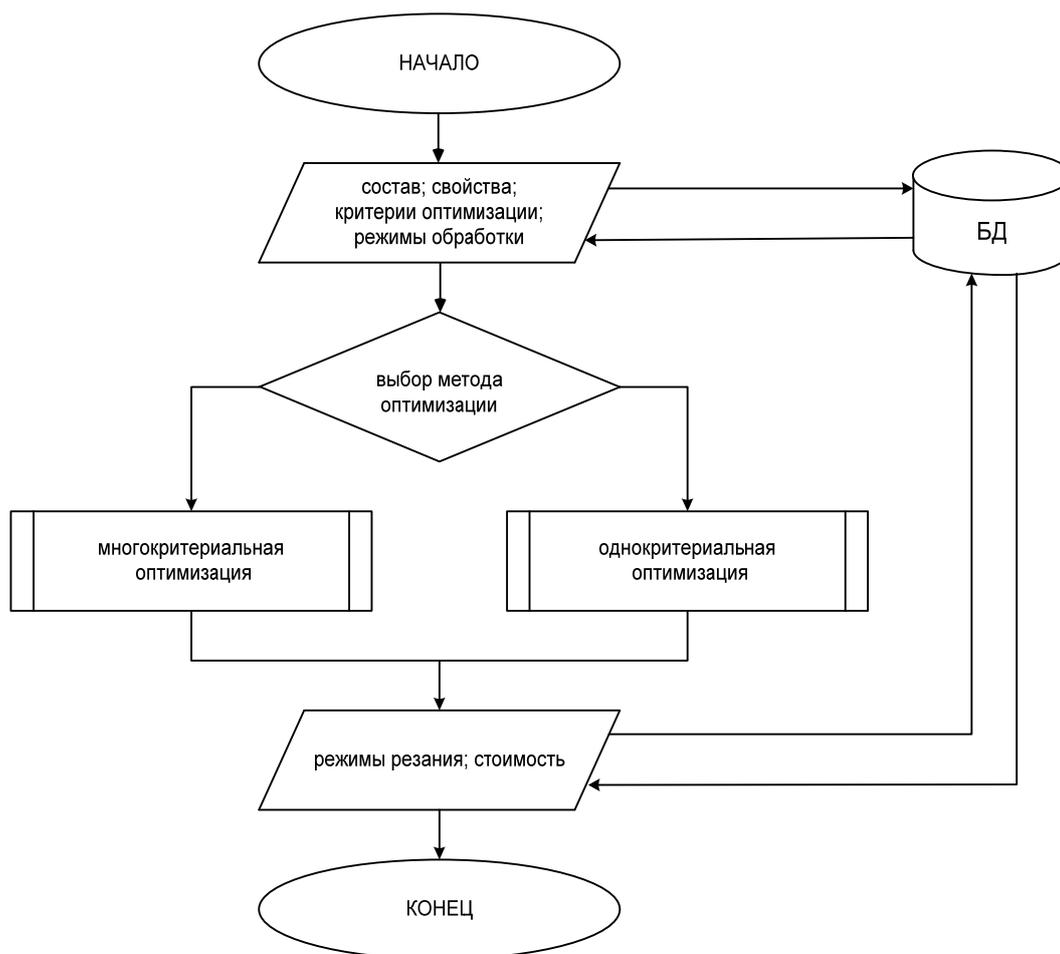


Рис. 5.8. Алгоритм оптимизации режимов обработки с учетом экономических и технических показателей

Таким образом, экспертная система может решать следующие задачи: диагностики; прогнозирования; идентификации; управления; проектирования; мониторинга.

ЭС предназначены для решения практических задач, связанных с расчетом оптимальных технологических параметров механической обработки осевыми инструментами и физико-технологических свойств эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов в различных условиях эксплуатации.

Разработанные экспертные системы позволяют решить поставленные задачи на основе неполных входных данных, что приводит соответственно к модификации (переформулирование понятий и требований, переконструирование представления знаний в системе и усовершенствования прототипа) большинства алгоритмов функционирования ЭС.

В общем случае основными компонентами информационной технологии, используемой в ЭС, являются: интерфейс пользователя, база знаний, интерпретатор, модуль создания системы (рис.5.9).

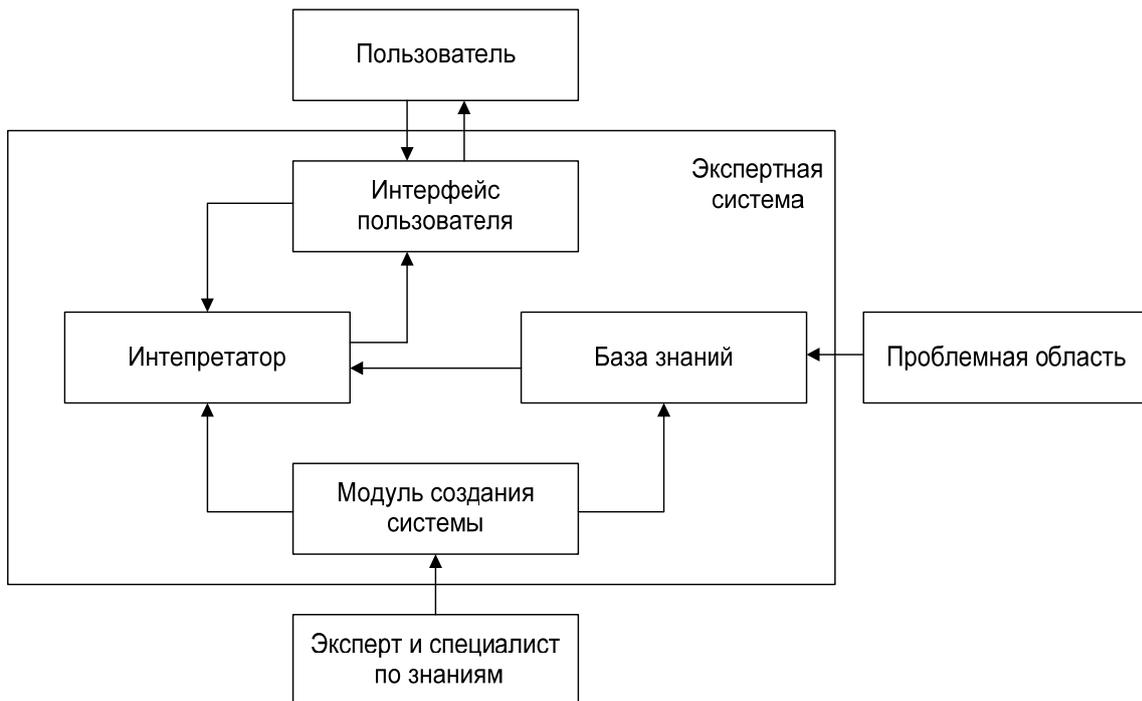


Рис.5.9. Основные компоненты информационной технологии экспертных систем

Интерфейс пользователя используется для ввода информации и команд в экспертную систему и получения выходной информации из нее. Команды включают в себя параметры, направляющие процесс обработки знаний. Информация выдается в форме значений, присваиваемых определенным переменным.

Технология экспертных систем предусматривает возможность получать в качестве выходной информации не только решение, но и необходимые объяснения.

База знаний содержит факты, описывающие проблемную область, а также логическую взаимосвязь этих фактов. Центральное место в базе знаний принадлежит правилам. Правило определяет, что следует делать в данной конкретной ситуации, и состоит из двух частей: условия, которое может выполняться или нет, и действия, которое следует произвести, если условие выполняется. Все используемые в экспертной системе правила образуют систему правил. Данное представление знаний привлекает наглядностью, высокой модульностью, легкостью внесения дополнений и изменений и простотой механизма логического вывода.

Интерпретатор производит в определенном порядке обработку знаний, находящихся в базе знаний. Технология работы интерпретатора сводится к последовательному рассмотрению совокупности правил. Если условие, содержащееся в правиле, соблюдается, выполняется определенное действие, и пользователю предоставляется вариант решения его проблемы.

Модуль создания системы служит для создания набора правил. Реализация данного модуля осуществлена на основе алгоритмических языков программирования.

Разработана база данных (БД), предназначенная для хранения и обработки данных о физико-механических, технологических свойствах компонентов и технологических параметров механической обработки осевыми инструментами. В результате декомпозиционного проектирования БД получены 16 отношений [156]:

- 1) Состав (№матер, НаимМатер, НаимСвяз, №отв, №ускор, №пласт, №модиф, №напол, №среды, №индентора);
- 2) Отвердитель (№отв, НаимОтв, МассСодерОтв);
- 3) Ускоритель (№ускор, НаимУскор, МассСодерУскор);
- 4) Пластификатор (№пласт, НаимПласт, МассСодерПласт);
- 5) Модификатор (№модиф, НаимМодиф, МассСодерМодиф);
- 6) Наполнитель (№напол, НаимНапол, ОбъемСодерж, S_{y0} , $b_{упр}$, $b_{сж}$, $b_{НВ}$);
- 7) Среда (№матер, №среды, НаимАгСреды, Конц, $t_{\text{выдержки}}$, Сжат.ж, Мод.упр.ж., Твер.ж., $deltam_m$, T , τ);
- 8) Инструмент (№инстр, НаимИнстр, ТипИнстр, МатерИнстр, ДиамИнстр, ЧислоЗубьев, ГОСТ, Стоимость, Стойкость, ЧисПеретИнстр);
- 9) Операция (ТипОпСт, ГлубРез, ШиринаРез, СтомМинРаб);
- 10) Модуль упругости (№матер, МодУпрМатр, МодУпрНапол);
- 11) Сжатие (№матер, СжатМатр, $alfa_{сж}$, ν , $K_{сж}$);
- 12) Станок (№станка, ТипОпСт, СтоимРабСтМин, МодСт, №инстр, N_{η} , η , C_z , y_z , n_z , z_z , n_s , z_s , $P_{s.дон}$, C_s , K_s , Произв., K_z , r_R , S_{\min} , S_{\max} , N_{\min} , N_{\max});
- 13) Изгиб (№матер, Изгиб);
- 14) Ударная вязкость (№матер, Ударная вязкость);
- 15) Индентор (№матер, №индентора, $alfa$, K_2 , F_m , F_o , δ_{41} , δ_{43} , δ_{15});
- 16) Скорость обработки (№матер, №станка, №инстр, ТипОпСт, C_V , x_V , y_V , m , z_1 , z_2 , z_3 , z_4 , z_5 , w , K_v , w_v , g_v , n_v).

Диаграмма ER-типа представлена на рис. 5.10. Функциональные зависимости и диаграммы ER-экземпляров представлены в прил. 3. При проектировании декомпозиционным методом и ER-методом получены идентичные результаты.

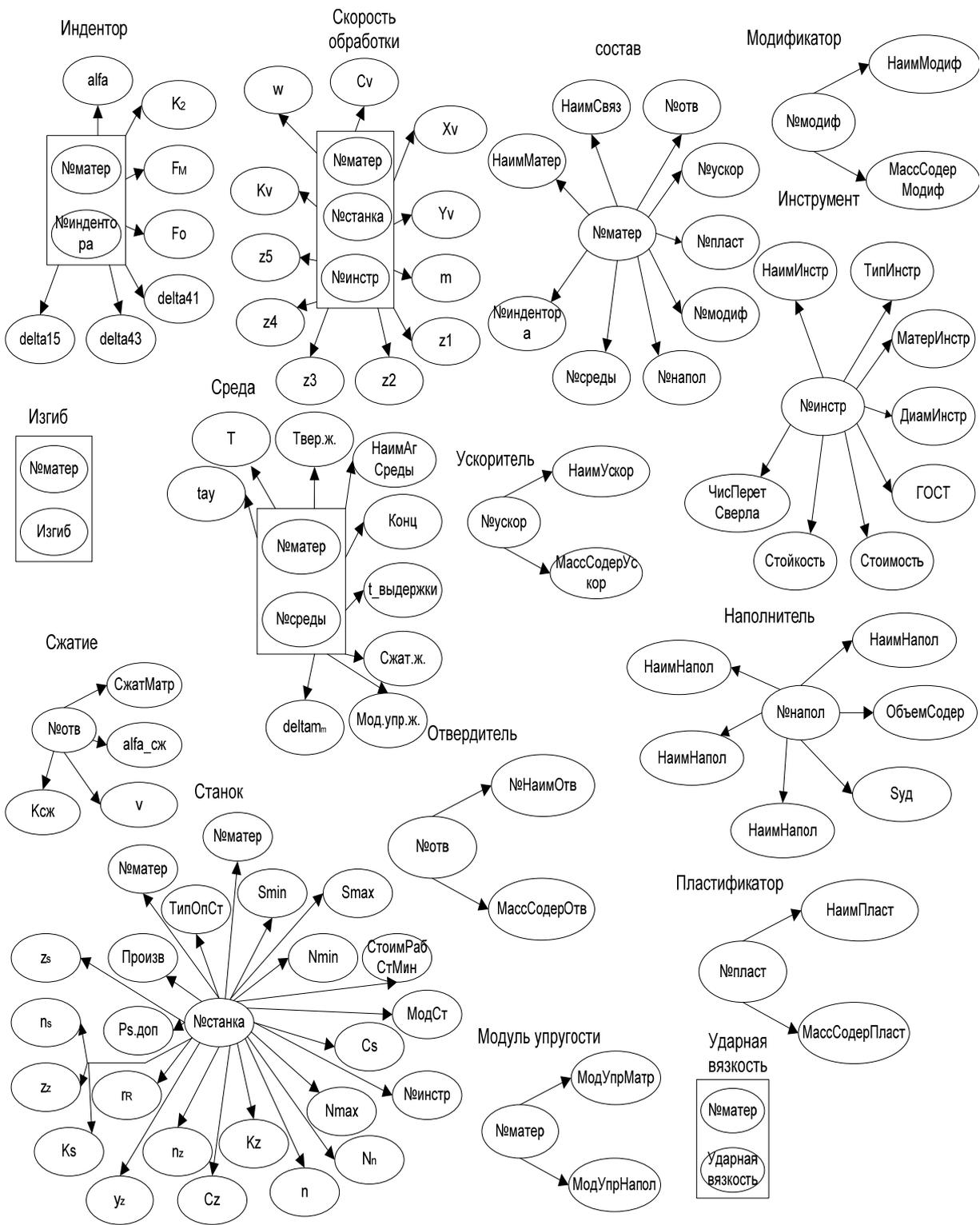


Рис.5.10. Функциональные зависимости

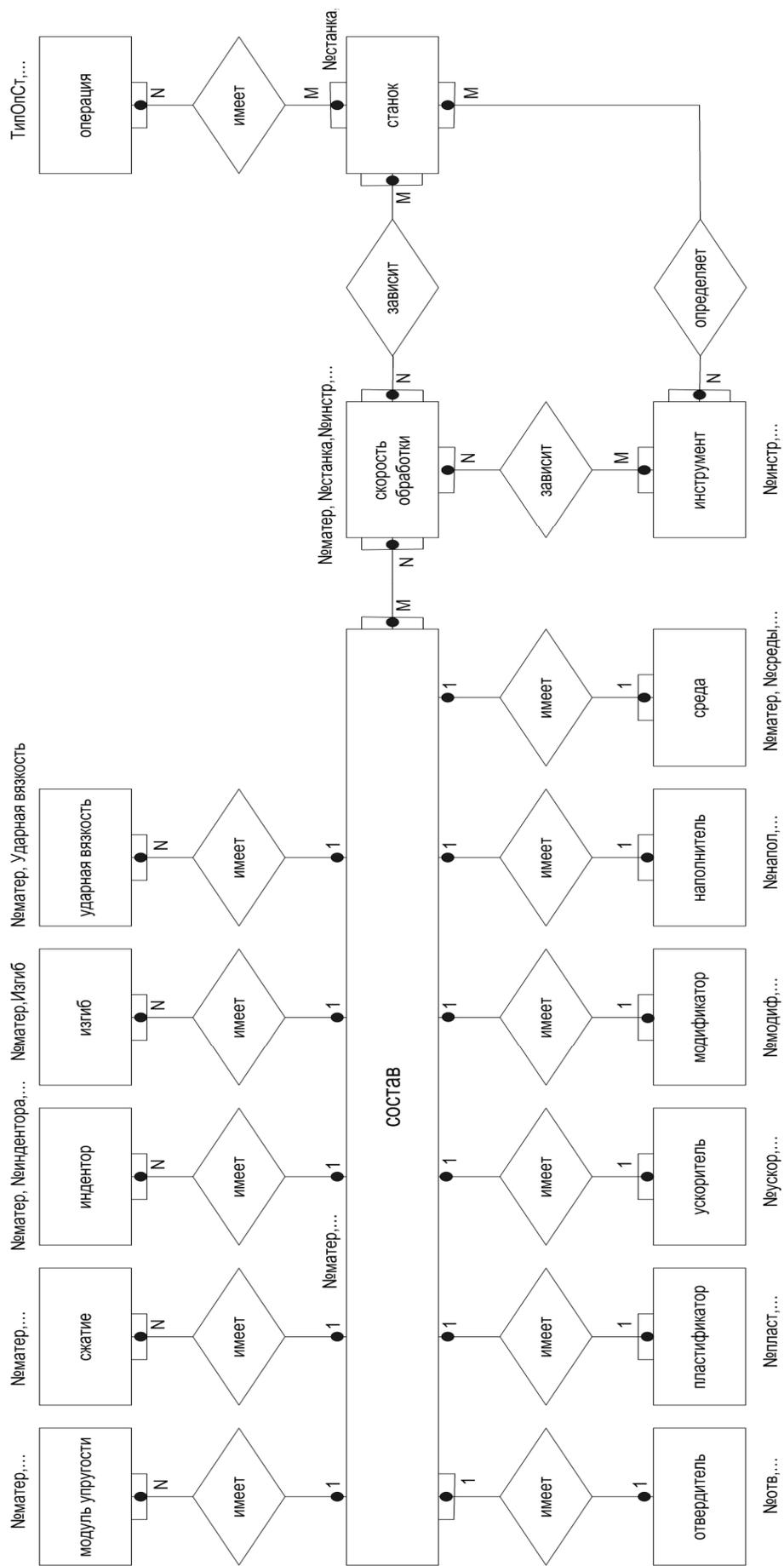


Рис.5.11. Диаграмма ER - типа

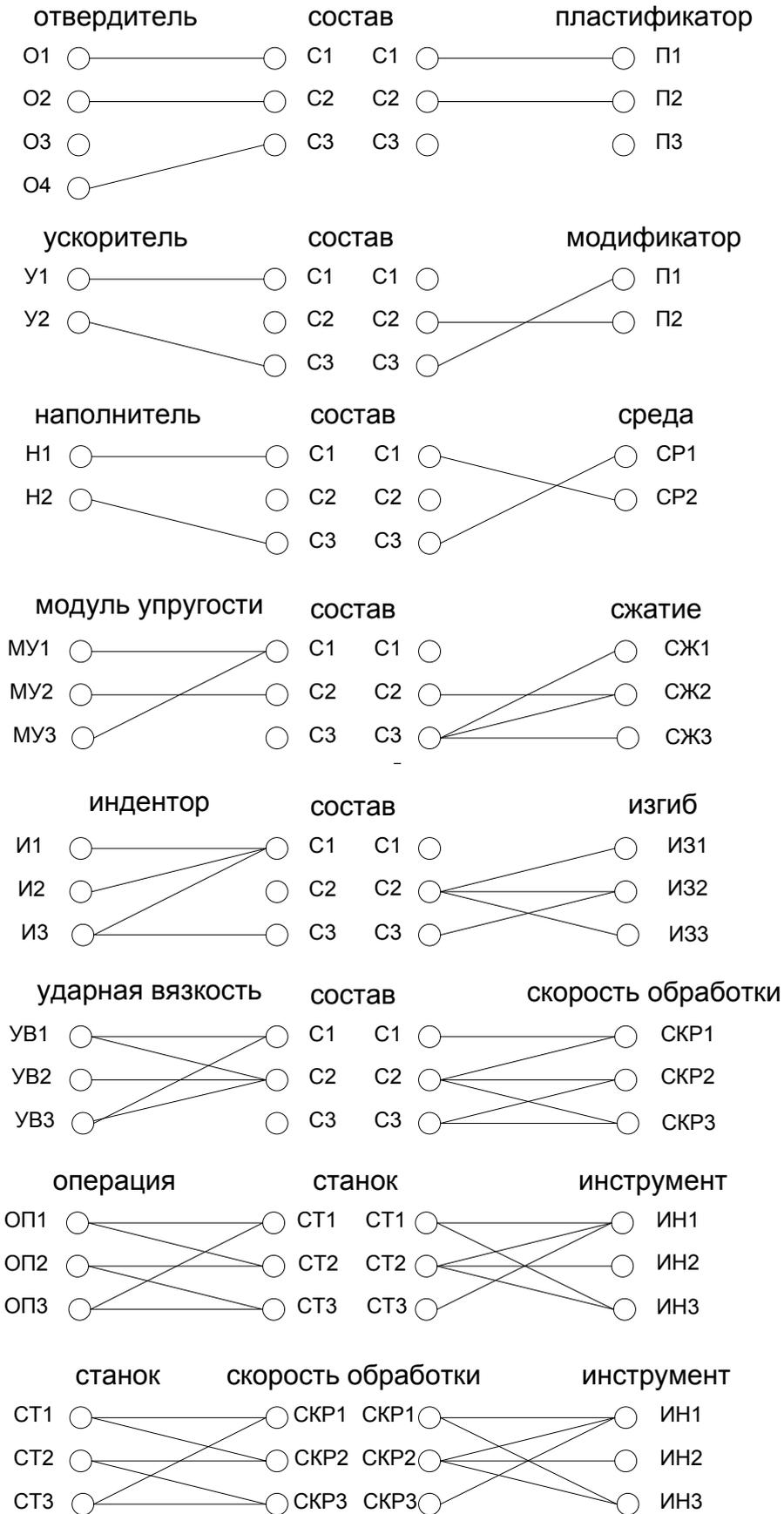


Рис. 5.12. Диаграмма ER-экземпляров

В качестве СУБД выбрана PostgreSQL 8.0, которая удовлетворяет следующим требованиям: возможность работы в режиме клиент – сервер; поддержка ANSI SQL'92; удобство установки; легкость администрирования; удобный графический интерфейс; хорошо реализованные драйвера для работы с базами данных из языка Java, возможность работы на различных платформах.

Программный комплекс реализован на объектно-ориентированном языке Java, что позволяет эффективно реализовать процессы и объекты реального мира, а также имеет множество встроенных классов, позволяющих производить сложные математические расчеты, и простые интерфейсы для работы с базами данных. Язык Java компилирует программы в байт код, который не зависит от платформы, под которой запускается программа. Программа предназначена для прогнозирования физико-механических, технологических свойств и определения оптимальных составов и технологических параметров механической обработки высокотехнологичных ПКМ.

Общая методология программ заключается в следующем. Эксперт выбирает тип решаемой задачи:

1) оптимизация состава и технологических параметров механической обработки;

2) расчет физико-механических свойств по заданному составу и оптимизация технологических параметров механической обработки.

В 1-ой задаче пользователь задает необходимые диапазоны варьирования физико-механических свойств и соответствующие значения весовых коэффициентов. Далее осуществляется подбор и оптимизация состава КМ, удовлетворяющего заданным ограничениям.

Во 2-ой задаче эксперт задает состав композита: вид связующего; массовое содержание матричных компонентов (отвердитель, модификатор, пластификатор); вид, объемное содержание и дисперсность наполнителя. Далее осуществляется прогнозирование и оптимизация физико-механических и технологических свойств КМ.

На следующем этапе активизируется окно технологических параметров механической обработки осевыми инструментами, и рассчитываются режимы резания. В дополнительной форме эксперт задает тип операции (сверление, фрезерование), затем модель станка и инструмент. Инструмент выбирается с учетом его типа, размера (диаметра инструмента), материала и ГОСТа. Эксперту предлагается выбрать вид решаемой задачи.

При выборе задачи расчета режимов обработки задается значение подачи или скорости обработки и далее рассчитывается скорость обработки или подача соответственно и физико-механические и технологические свойства КМ.

При выборе задачи оптимизации технологических параметров эксперт предварительно задает вид задачи (однокритериальный, многокритериальный) и критерии (технологический, экономический) оптимизации. Далее рассчитываются оптимальные режимы обработки высокотехнологичных ПКМ, с использованием целевых функций, и прогнозируются и оптимизируются физико-механические и технологические свойства ПКМ.

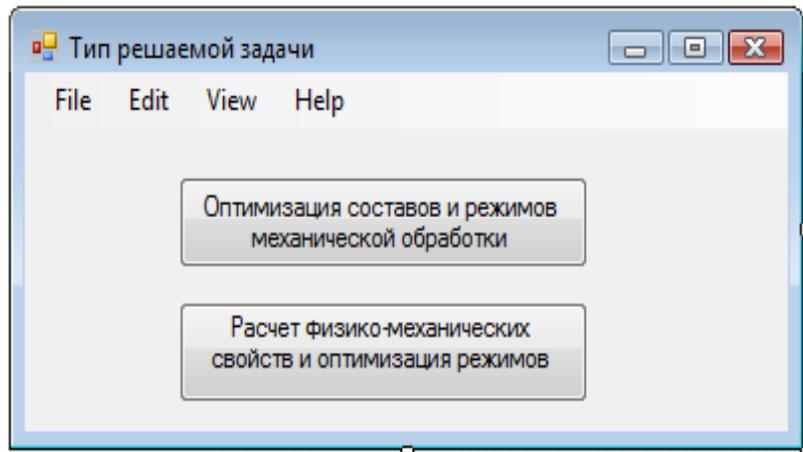


Рис. 5.13. Форма выбора типа задач

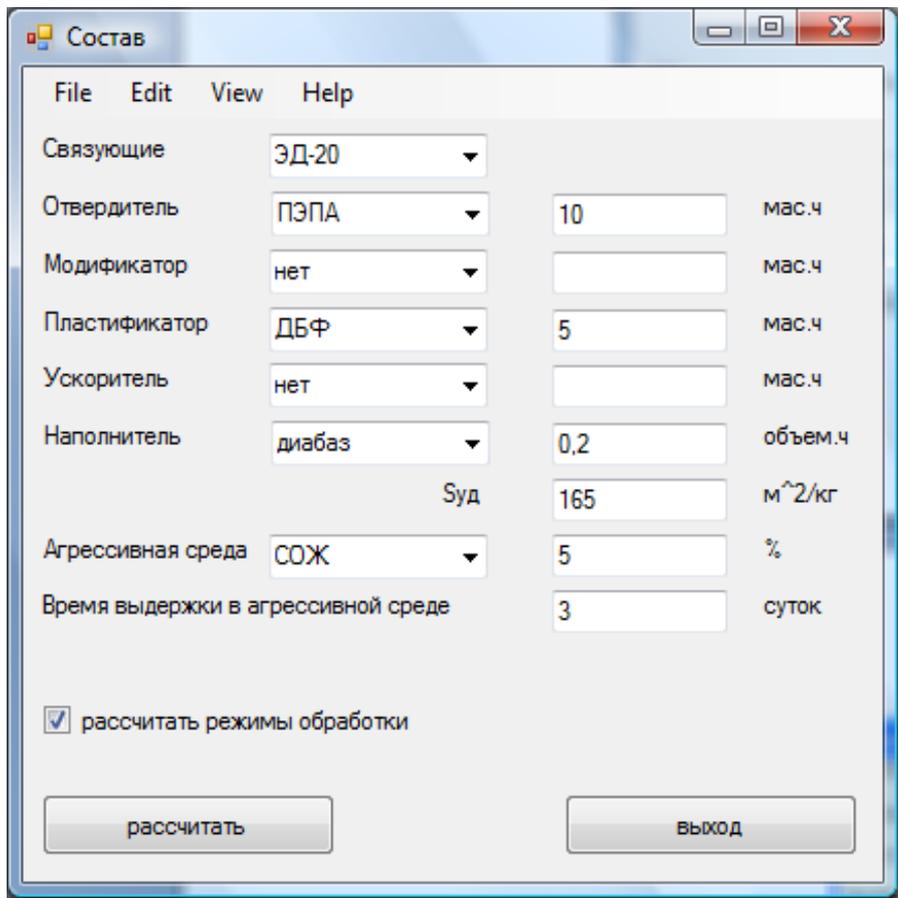


Рис. 5.14. Форма составов полимерных КМ

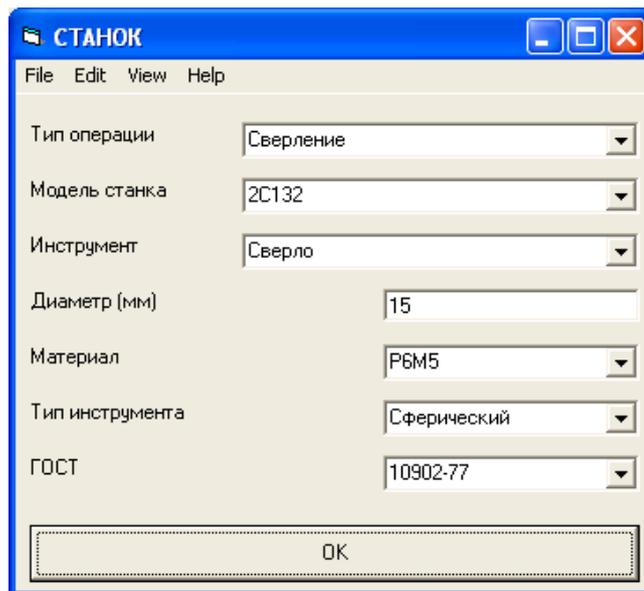


Рис. 5.15. Форма станок

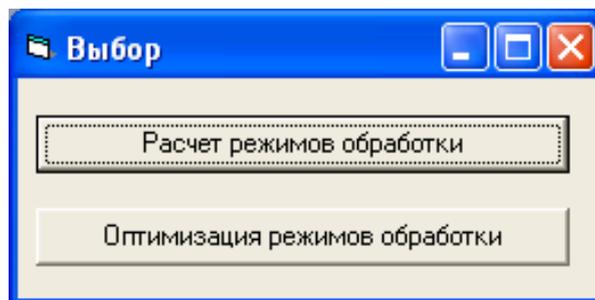


Рис. 5.16. Форма выбора

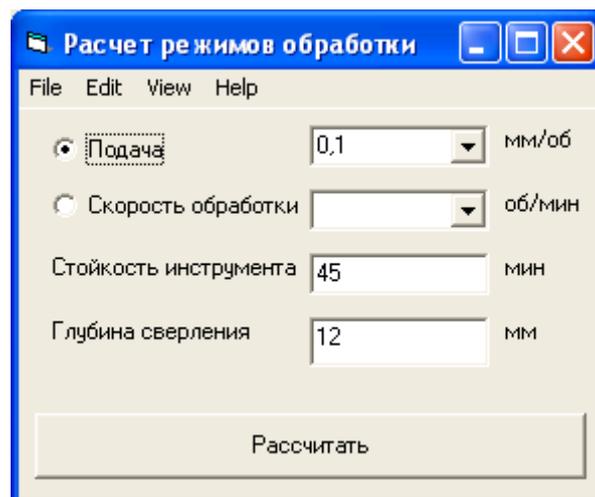


Рис. 5.17. Форма расчета режимов обработки полимерных КМ

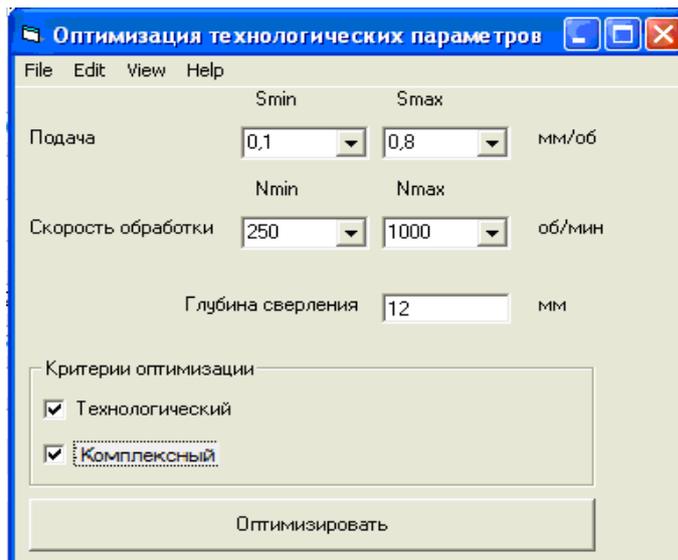


Рис. 5.18. Форма оптимизации режимов обработки полимерных КМ

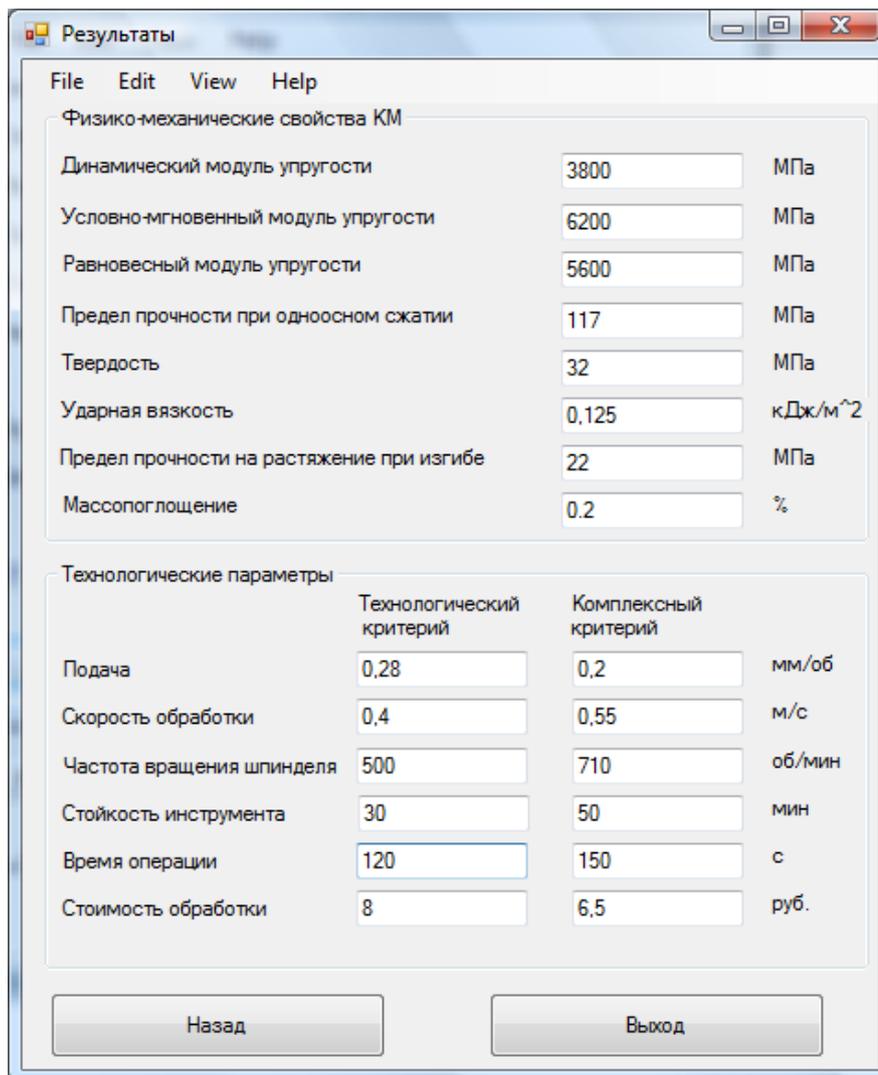


Рис. 5.19. Форма результатов расчета САПС ПКМ

Результатом работы программного комплекса являются оптимальные составы ПКМ, с высокими физико-механическими, технологическими свойствами, и оптимизированные режимы резания, обеспечивающие требуемое качество обработанных поверхностей, высокую стойкость инструмента и низкую стоимость операции механической обработки. Фрагменты листинга программы представлены в прил. 3.

5.2. Практическое применение высокотехнологичных полимерных композиционных материалов в машиностроении

5.2.1. Футеровочные плиты из полимерных композиционных материалов

Использовали полученные эпоксидные, полиэфирные, эпоксиполиуретановые наполненные КМ в качестве футеровочных плит. Монтировали футеровочных плиты на дробильно-сортировочное оборудование (рис.5.9). Предварительно произвели механическую обработку торцевых поверхностей КМ на вертикально-фрезерном станке модели 6Р11Ф3 с применением концевой пальчиковой фрезы Р18 Ø 15-32 мм и крепежных отверстий на вертикально-сверлильном станке модели 2С132, с применением сверл Р6М5 Ø 5-20 (ГОСТ 10902-77) (рис. 5.9).

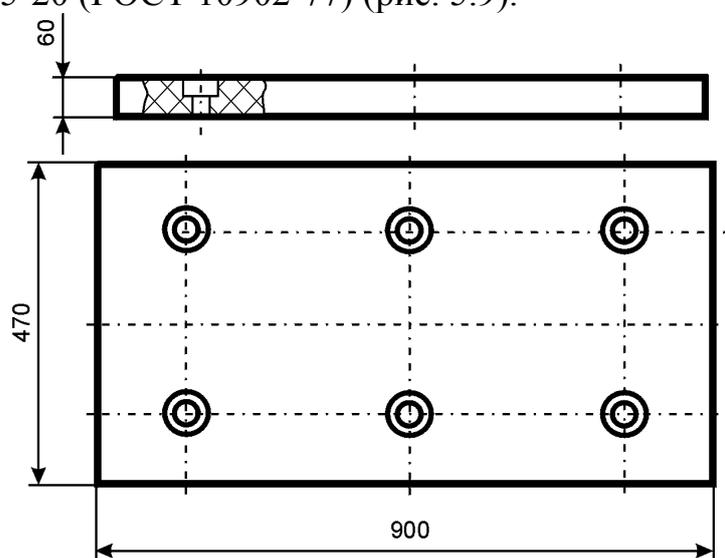


Рис.5.20. Плита футеровочная из ПКМ

Поставленный эксперимент проводился на основе изменения технологических параметров (V , S) и материала обрабатываемой заготовки (составы № 38, 39, 42, 43, 46, 47, 51-53). Использовали плитки из эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов размерами 470×900×60 мм.

Производили механическую обработку КМ на станке при 6-х частотах вращения шпинделя: 250, 355, 500, 710, 1000, 1400 об/мин. Изменяя подачу в диапазоне от 0,1 до 0,8 мм/об и меняя пропорции распределения осевых составляющих сил резания (P_x, P_z).

В результате использования режимов обработки рассчитанных в САПС ПКМ (табл. 4.5) получены высокие показатели качества поверхности (отсутствие на обработанных изделиях трещин, сколов, прижогов и других видимых дефектов). Установлено, что полимерный КМ, наполненный гранитным порошком, имеет высокие физико-технологические свойства. Совместное введение гранитного порошка и полиамидного волокна в полимерный композит позволяет получить изделия требуемого качества при более высоких технологических параметрах механической обработки.

Проведенные испытания полученных полимерных футеровочных плит показали, что данные изделия отвечают всем требованиям ТУ 38 305137-99 (футеровочные детали): 1) водопоглощение не более 6%; 2) коэффициент химической стойкости не менее 0,8; 3) предел прочности при одноосном сжатии не менее 100 МПа; 4) твердость не менее 110 МПа; 5) динамический модуль упругости не менее 5500 МПа; 6) шероховатость не превышает 7,5 мкм.

Экономическая эффективность от внедрения технологических параметров механической обработки оценивалась по коэффициенту внедрения, который определяется в соответствии с зависимостью:

$$K_v = \frac{\Phi_c + n \cdot \Phi_{C_{ABV_{нов}}}}{\Phi'_c + n \cdot \Phi'_{C_{ABV_{нов}}}}, \quad (5.1)$$

- где K_v – коэффициент внедрения;
 Φ_c – себестоимость базового варианта;
 n – количество операций механообработки;
 $\Phi_{C_{ABV_{пов}}}$ – технологическая себестоимость обработки поверхности в КМ на станке с заводскими режимами обработки;
 Φ'_c – себестоимость модернизированного варианта;
 $\Phi'_{C_{ABV_{нов}}}$ – технологическая себестоимость обработки поверхности в КМ на станке с оптимальными режимами обработки.

Технологическая себестоимость операции механической обработки представлена в виде суммы затрат трех групп [157-158]:

$$C = C_A + C_B + C_V, \quad (5.2)$$

где C_A, C_B, C_V – затраты групп А, Б и В.

Группа А охватывает элементы текущих затрат, объем которых в расчете на единицу продукции изменяется пропорционально изменению времени, необходимому для выполнения операции и зависит от технологических параметров механической обработки, позволяющих повысить качество обрабатываемой поверхности заготовки.

Затраты группы Б включают расходы на амортизацию и ремонт универсального оборудования, на содержание производственного корпуса, занятого универсальным оборудованием, на амортизацию и ремонт универсальных приспособлений.

Затраты группы В включают прочие производственные и внепроизводственные расходы, приходящиеся на час работы оборудования, которые в расчете на одну деталь при заданном объеме выпуска продукции остаются независимыми от изменения времени на операцию, технологического процесса на обрабатываемую деталь и принимаются по нормативным материалам предприятия.

В ходе анализа эффективности применения САПС ПКМ в производстве изделий и материалов из полимерных КМ выявлена экономия капитальных вложений.

Использование САПС ПКМ в производстве футеровочных плит позволило существенно повысить эффективность механической обработки, увеличить производительность на 20 % и улучшить качество получаемых машиностроительных изделий.

5.2.2 Фитинговые системы из полимерных наполненных КМ

Произвели механическую обработку эпоксидных концевых муфт. Концевые муфты предназначены для оконцевания силовых трехжильных кабелей напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией внутри сухих, влажных и сырых помещений, с относительной влажностью до 75%, в помещениях с проводящей пылью (при условии периодической чистки), с химически активной средой (кроме взрывоопасных) в пожароопасных помещениях (рис.5.21).

Процесс получения эпоксидных муфт состоял в механической обработке торцевых поверхностей цилиндрической фрезой Р18 Ø 32 мм на станке модели 6Р11Ф3 и технологических отверстий на вертикально-сверлильном станке модели 2С132, с применением сверл Р6М5 Ø 45 мм (ГОСТ 11902-77).

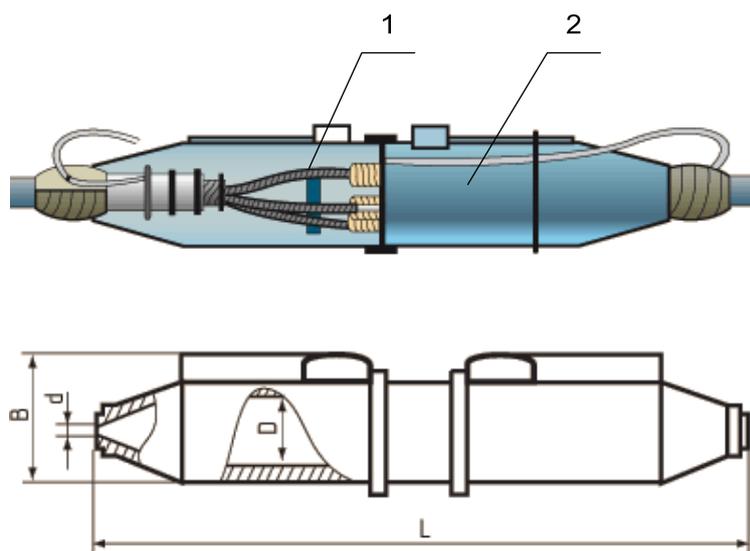


Рис. 5.21. Эпоксидная концевая муфта: 1 – трехжильный кабель; 2 – эпоксидная концевая муфта

Поставленный эксперимент проводился на основе изменения технологических параметров (V, S) и материала обрабатываемой заготовки (составы № 4, 8, 12, 16). Использовали эпоксидные концевые муфты с параметрами: $D = 76$ мм; $d = 45$ мм; $L = 670$ мм; $B = 97$ мм.

Производили механическую обработку КМ на станке при 6-х частотах вращения шпинделя: 250, 355, 500, 710, 1000, 1400 об/мин, изменяя подачу в диапазоне от 0,1 до 0,8 мм/об и меняя пропорции распределения осевых составляющих сил резания (P_x, P_z).

В результате использования высокотехнологичных составов КМ и режимов обработки, рассчитанных в САПС ПКМ (см. табл. 4.5) получены высокие технико-экономические показатели качества готовых изделий (табл. 5.1).

Т а б л и ца 5.1

Технико-экономические показатели эпоксидных концевых муфт

№	Состав					Технико-экономические показатели	
	Полимерная смола	Отвердитель мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Модификатор мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Пластификатор мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Объемное содержание наполнителя	Масса, кг	Стоимость, руб./шт
1	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДФФ 5	Диабаз $\mathcal{G}=0,3$	3,26	555
2	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДФФ 5	Маршалит $\mathcal{G}=0,3$	3,12	580
3	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	ДФФ 5	Цемент $\mathcal{G}=0,3$	3,78	570
4	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 04 10	ДФФ 5	Аэросил $\mathcal{G}=0,3$	1,69	600

5.2.3. Облицовочные и потолочные плитки из наполненных полимерных композиционных материалов

Использовали полученные эпоксидные, полиэфирные, эпоксиполиуретановые наполненные КМ в качестве облицовочных, потолочных плиток в цехах и помещениях промышленных зданий. Монтировали облицовочные стеновые и потолочные плитки на вертикальные и горизонтальные профили с помощью винтовых анкерных дюбелей (рис.5.22). Предварительно произвели механическую обработку КМ на вертикально-сверлильном станке модели 2С132, с применением сверл Р6М5 D 5-20 (ГОСТ 10902-77).

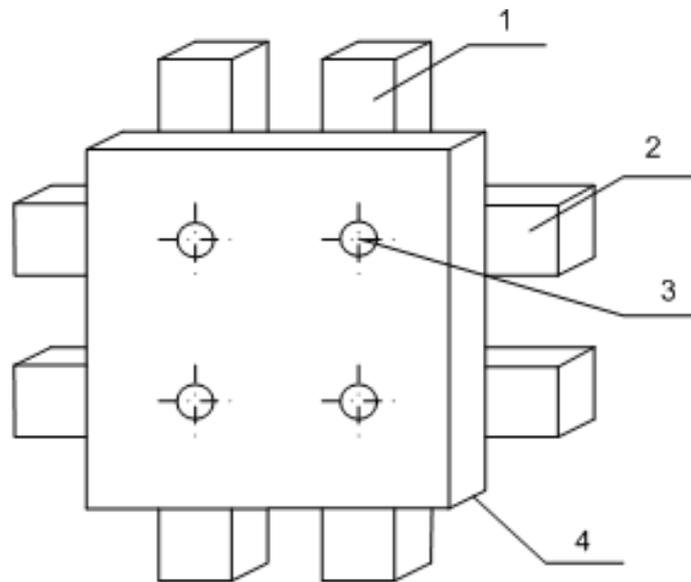


Рис. 5.22. Скрытое механическое крепление облицовочных плиток из КМ:
1 и 2 – вертикальные и горизонтальные алюминиевые или стальные профили;
3 – винтовой анкерный дюбель; 4 – облицовочная плитка из КМ

Поставленный эксперимент проводился на основе изменения технологических параметров (V , S) и материала обрабатываемой заготовки (составы № 21, 22, 25, 26, 29, 30, 33, 34, 38, 39, 42, 43, 46, 47, 51-53). Использовали плитки из эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых композитов размерами 1000x1000x10 мм.

Производили механическую обработку КМ на станке при 6-х частотах вращения шпинделя: 250, 355, 500, 710, 1000, 1400 об/мин. Изменяя подачу в диапазоне от 0,1 до 0,8 мм/об и меняя пропорции распределения осевых составляющих сил резания (P_y , P_z).

В результате использования режимов обработки рассчитанных в САПС ПКМ (табл. 4.5) получены высокие показатели качества поверхности (отсутствие на обработанных изделиях трещин, сколов, прижогов и других видимых дефектов). Установлено, что полимерный КМ, наполненный гранитным порошком, имеет высокие физико-технологические свойства.

Совместное введение гранитного порошка и полиамидного волокна в полимерный композит позволяет получить изделия требуемого качества при более высоких технологических параметрах механической обработки.

Экономическая эффективность от внедрения технологических параметров механической обработки оценивалась по коэффициенту внедрения, который определяется в соответствии с зависимостью:

$$K_e = \frac{\Phi_c + n \cdot \Phi_{C_{ABV_{нов}}}}{\Phi'_c + n \cdot \Phi'_{C_{ABV_{нов}}}}, \quad (5.3)$$

где K_e - коэффициент внедрения;

Φ_c - себестоимость базового варианта;

n - количество операций механообработки;

$\Phi_{C_{ABV_{нов}}}$ - технологическая себестоимость обработки поверхности в КМ на станке с заводскими режимами обработки;

Φ'_c - себестоимость модернизированного варианта;

$\Phi'_{C_{ABV_{нов}}}$ - технологическая себестоимость обработки поверхности в КМ на станке с оптимальными режимами обработки.

Технологическая себестоимость операции механической обработки может быть представлена в виде суммы затрат трех групп [157–158]:

$$C = C_A + C_B + C_V, \quad (5.4)$$

где C_A , C_B , C_V - затраты групп А, Б и В.

Группа А охватывает элементы текущих затрат, объем которых в расчете на единицу продукции изменяется пропорционально изменению времени, необходимому для выполнения операции и зависит от материала изготовленного изделия, позволяющей повысить качество обрабатываемой поверхности заготовки.

Затраты группы Б включают расходы на амортизацию и ремонт универсального оборудования, на содержание производственного корпуса, занятого универсальным оборудованием, на амортизацию и ремонт универсальных приспособлений.

Затраты группы В включают прочие производственные и внепроизводственные расходы, приходящиеся на час работы оборудования, которые в расчете на одну деталь при заданном объеме выпуска продукции остаются независимыми от изменения времени на операцию, технологического процесса на обрабатываемую деталь и принимаются по нормативным материалам предприятия.

В ходе анализа эффективности применения САПС ПКМ в производстве изделий и материалов из полимерных КМ выявлена экономия капитальных вложений, значительное увеличение годового экономического эффекта.

Таким образом, на основании исследований разработана система автоматизированного проектирования высокотехнологичных полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами. Также предложены рекомендации, направленные на повышение эффективности производства полимерных композиционных материалов в машиностроении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной монографии являлось решение научно-практической проблемы – получение и исследование высокотехнологичных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами для изделий машиностроения. Для этого были проведены исследования физико-механических и технологических свойств полимерных композитов.

В результате исследований разработан состав двухкомпонентной модифицирующей добавки для высокотехнологичных эпоксидных композиционных материалов, применяемых в машиностроении, состоящей из простого полиэфира и полиизоцианата в соотношениях 1:1. Получены математические и топологические модели, описывающие влияние рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства (динамический модуль упругости, предел прочности при одноосном сжатии, твердость), качество поверхности и структуру композиционных материалов. Установлены закономерности влияния вида, количества и дисперсности наполнителя на эксплуатационные свойства полимерных наполненных композиционных материалов. Изучено влияние рецептурно-технологических факторов на технологические параметры обработки. Установлено влияние жидких агрессивных сред (водопроводная вода, смазочно-охлаждающая жидкость) на физико-механические свойства композиционных материалов. Разработан алгоритм расчёта технологических параметров механической обработки композиционных материалов с учётом необходимых физико-механических свойств полимерных композитов. Предложены новые критерии оптимизации режимов механической обработки композиционных материалов, учитывающие экономические и технологические показатели, используемые в методике оптимизации составов полимерных композитов. А также разработаны рекомендации, направленные на повышение эффективности производства полимерных композиционных материалов в машиностроении.

Представленные в монографии результаты теоретических и практических исследований можно рекомендовать к использованию при разработке, оптимизации и производстве аналогичных композиционных полимерных материалов для различных областей материаловедения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шафигуллин, Л.Н. Исследование высокотехнологичных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами для изделий машиностроения: дисс. ... канд. техн. наук: [Текст] / Л.Н. Шафигуллин. – Набережные Челны, 2009. – 247 с.
2. Бобрышев, А.Н. Структура и свойства дисперсно-наполненных композитных материалов [Текст] / А.Н. Бобрышев, А.В. Лахно, Р.В. Козомазов, А.А. Бобрышев. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2012. – 160 с.
3. Реология вязкости композитных систем с гетерогенной структурой [Текст] / Воронов П.В., Бобрышев А.Н., Жарин Д.Е., Лахно А.В., Шафигуллин Л.Н. – Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2011. № 3. – С. 13–17.
4. Бобрышев, А.Н. Синергетика композитных материалов [Текст] / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Л.О. Бабин; ред. Соломатова. – Липецк: НПО «ОРИУС», 1994. – 153 с. - 152 с
5. Бобрышев, А.Н. Прочность эпоксидных композитов с дисперсными наполнителями: Автореф. ... доктор. техн. наук. [Текст] / А.Н. Бобрышев. – М.: 1996. – 42 с.
6. Козомазов, В.Н. Структура и свойства высоконаполненных строительных полимерных композитов: Автореф. ... доктор. техн. наук. [Текст] / В.Н. Козомазов. – М.: 1996. – 42 с.
7. Лахно, А.В. Некоторые аспекты усиления полимерных композитов / А.В. Лахно, А.Н. Бобрышев, П.А. Зубарев, В.О. Петренко, Е.В. Новиков // Международный технико-экономический журнал. 2012. № 5. С. 100-105.
8. Бобрышев, А.Н. Анализ критического содержания наполнителя в композите с позиций теории перколяции / А.Н. Бобрышев, А.В. Лахно, П.В. Воронов, А.А. Бобрышев, Е.В. Новиков // Международный технико-экономический журнал. – 2013. № 6. – С. 93–98.
9. Кардашов, Д.А. Полимерные клеи. Создание и применение [Текст] / Д.А. Кардашов, А.П. Петрова. – М.: Химия, 1983. – 256 с.
10. Пакен, А.М. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы [Текст] / А.М. Пакен. Пер. с англ. – Л.: Госхимиздат, 1962. – 964 с.
11. Благонравова, А.А. Лаковые эпоксидные смолы [Текст] / А.А. Благонравова, А.И. Непомнящий. – М.: Химия, 1970. – С.110-155
12. Воробьев, В.А. Технология полимеров: учебное пособие/ В.А. Воробьев. – 1-е. изд. – М.: Высшая школа, 1971. – С.284-288
13. Лапицкий, В.А. Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков [Текст] / В.А. Лапицкий, А.А. Крицук. – Киев: Наук. Думка, 1986. – 96 с.
14. Ли, Х. Справочное руководство по эпоксидным смолам [Текст] / Х. Ли., К. Невилл; Пер. с англ. под ред. Н.В. Александрова. – М., Энергия, 1973. – 415 с.

15. Соколова, Ю.А. Модифицированные эпоксидные клеи и покрытия в строительстве [Текст] / Ю.А. Соколова, Е.М. Готлиб. – М.: Стройиздат, 1990. – 176 с.
16. Справочник по композитным материалам [Текст] / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта; под ред. Б.Э. Геллера. Кн.1. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
17. Справочник по пластическим массам [Текст] / Под ред. В.М. Катаева. – 2-е изд. – М.: Химия, 1978.Т.2. – 568 с.
18. Технология пластических масс [Текст] / Под ред. В.В. Коршака. – 3-е изд. пераб. и доп. – М.: Химия, 1985. – 560 с.
19. Гаврилина, С.А. Лакокрасочные материалы на основе эпоксидных смол [Текст] / Гаврилина С.А. – Черкассы.: НИИ техн.- эконом. информации в хим. Промышленности, 1977. – 32 с.
20. Камон, Т. Отвердители эпоксидных смол [Текст] / Т. Камон // ВЦП №А 79800. Кобунсикако. – 1977. – №26. – С. 120-133.
21. Орлова, О.В. Технология лаков и красок: учебник для техникумов [Текст] / О.В. Орлова, Т.Н. Фомичева. – М., Химия, 1990. – С. 101-126.
22. Хувинк, Р. Химия и технология полимеров [Текст] / Р. Хувинк, А. Ставерман. – М.; Л.: Химия, 1966. – 891 с.
23. Чернин, И.З. Эпоксидные полимеры и композиции [Текст] / И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердев. – М.: Химия, 1982. – 230 с.
24. Зайцев, Ю.С. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции [Текст] / Ю.С. Зайцев [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1990. – 220 с.
25. Кардашов, Д.А. Эпоксидные клеи [Текст] / Кардашов Д.А. – М.: Химия, 1973. – 192 с.
26. Лапицкий, В.А. Новые отвердители и отверждающие системы для эпоксидных смол на основе аминов ряда дифинилсульфона [Текст] / В.А. Лапицкий, Т.И. Пилипенко, А.В. Иванов // Новые материалы на основе эпоксидных смол, их свойства и области применения / Дом науч.-техн. пропаганды – Ленинград., 1974. – Ч.1. – С.63-67.
27. Иржак, В.И. Сетчатые полимеры [Текст] / В.И. Иржак, Б.А. Розенберг, Н.С. Ениклопов. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
28. Иржак, В.И., Розенберг Б.А. Особенности кинетики формирования сетчатых полимеров [Текст] // Высокомолекулярные соединения: тр. XXVII. – 1985. – № 9 – С. 1979-1809.
29. Розенберг, Б.А. Образование, структура и свойства эпоксидных матриц для высокопрочных композитов [Текст] / Б.А.Розенберг, Э.Ф. Олейник. // Успехи химии. – 1984. – Т. LIII, № 8. – С. 273-289.
30. Николаев, А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе [Текст] / Николаев А.Ф. – М.: Химия, 1966. – С. 638-678.
31. Щелочестойкие эпоксидные композиты строительного назначения [Текст] / А.Н. Бобрышев [и др.] – Пенза: ПГУАС, 2004. – 164 с.

32. Начакура, М. Блокированные изоцианаты [Текст] // Химия. – 1992. – № 6. – С. 257.
33. Хозин, В.Г. Усиление эпоксидных полимеров [Текст] / Хозин В.Г. – Казань: Изд-во ПИК «Дом печати», 2004. – 446 с.
34. Саундерс, Дж. Химия полиуретанов [Текст] / Дж. Саундерс, К. Фриш; пер. с англ. под ред. С.Г. Энтелеса. – М.: Химия, 1968. – 472 с.
35. Справочник по пластическим массам [Текст] / Под ред. М. И. Гарбара – М., 1969. – Т. 2. – С. 7.
36. Соломатов, В.И. Полимерные композиционные материалы в строительстве [Текст] / В.И. Соломатов, А.Н. Бобрышев, К.Г. Химмлер; под ред. В.И. Соломатова. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.
37. Влияние различных компонентов на вибропоглощающие свойства полимерных материалов [Текст] / Л.И. Тrepелкова [и др.] // Пласт. Массы. – 1964. – № 10. – С. 36-40.
38. Физико-химия многокомпонентных полимерных систем [Текст] / под ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наукова думка, 1986. – Т.2. – 384 с.
39. Аскадский, А.А. Введение в физико-химию полимеров [Текст] / А.А. Аскадский, А.Р. Хохлов – М.: Научный мир, 2009. – 384 с. Глава 1
40. Николаев, А.Ф. Технология пластических масс [Текст] / А.Ф. Николаев. – Л.: Химия. – 1977. – С. 261-266.
41. Эпоксидные полимербетоны, модифицированные нефтяными битумами, каменноугольной и карбамидной смолами и аминопроизводными соединениями [Текст] / Под общ. ред. акад. РААСН Ю.А. Соколовой и чл.-корр. РААСН В.Т. Ерофеева; В.Т. Ерофеев, Ю.А. Соколова, А.Д. Богатов и др. – М.: Издательство «Палеотип», 2008. – 244 с.
42. Эпоксидные и полиуретановые строительные композиты [Текст] / А.Н. Бобрышев [и др.]. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 159с.
43. Технология пластических масс [Текст] / Под ред. В.В. Коршака. // Химия – М., 1972. – С. 33-48.
44. Сагалаев, Г.В. Общие технические требования к наполнителям [Текст] // Наполнители полимерных материалов. / МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского – М., 1983. – С. 57-64.
45. Петров, В.П. Структура минеральных веществ и их использование в качестве наполнителя [Текст] // Наполнители полимерных материалов / МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского – М., 1983. – С. 139-144.
46. Промышленные композиционные материалы [Текст] / Под ред. М. Ричардсона. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
47. Черкасов, В.Д. Строительные композиты с повышенными вибропоглощающими свойствами: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. [Текст]. – М.: 1995. – 40 с.

48. Производство композиционных материалов на основе термопластов и сварочной пыли [Текст] / И.В. Будников [и др.] // Современные проблемы строительного материаловедения: шестые академические чтения РААСН / Ивановская государственная архитектурно-строительная академия. – Иваново, 2000. – С.6-7.

49. Жарин, Д.Е. Упругие свойства металлополимерных эпоксидных композитов [Текст] / Д.Е. Жарин, О.Ю. Селиванов, Н.Н. Туманова // Актуальные проблемы современного строительства: материалы XXX Всероссийской науч.-техн. Конференции / ПГАСА. – Пенза, 1999. – С. 35-36

50. Соломатов, В.И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны [Текст] / Соломатов В.И. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1976.

51. Патуроев, В.В. Демпфирующие свойства полимербетонов [Текст] / В.В. Патуроев, А.Н. Волгушев, В.А. Елфимов // Бетон и железобетон. – 1988. – №2. – С. 12-13.

52. Новиков, В.У. Полимерные материалы для строительства: справочник [Текст] / Новиков В.У. – М.: Высш.шк., 1995. – 448 с.

53. Бакушинский, А.Б. Регуляризирующие алгоритмы в банаховом пространстве, основанные на обобщенном принципе невязки [Текст] // Некорректные задачи математической физики и анализа / Наука. – Новосибирск, 1984. – С. 18-21.

54. Вайникко, Г.М. Методы решения линейных некорректно поставленных задач в гильбертовых пространствах [Текст] / Вайникко Г.М. – Тарту: Изд-во ТГУ, 1982.

55. Гончарский, А.В., Степанов В.В., Численные методы решения некорректных задач на компактных множествах [Текст] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика. – 1980. – № 3. – С. 12-18.

56. Тихонов, А.Н. Об устойчивости задач оптимизации функционалов [Текст] // ЖВМ и МФ. – 1966. – Т.6, № 4. – С. 631-634.

57. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский [и др.] – К.: Будивэльнык, 1989. – 240 с.: ил.

58. Гарькина, И.А. Системный анализ, теории идентификации и управления в строительном материаловедении [Текст] / Под ред. д-ра тех.наук. проф. А.М. Данилова; И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Ю.А. Соколова. – М.: Издательство «Палеотип», 2008. – 240 с.

59. Строительные материалы: учебник [Текст] / Под общей ред. В.Г. Микульского – М.: Изд – во АСВ, 2000. – 536 с.: ил.

60. Комар, А.Г. Строительные материалы и изделия: учебник для инженерно-экономических специальностей строительных вузов [Текст] / Комар А.Г. – М.: Высшая школа, 1983. – 487 с.: ил.

61. Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учеб.пособие [Текст] / А.А. Батаев, В.А. Батаев – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 400 с.
62. Кобаяши, А. Обработка пластмасс резанием: сокращ. перев. с англ. [Текст] / А. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
63. Штучный, Б.П. Обработка пластмасс резанием: справочное пособие [Текст] / Штучный Б.П.- М.: Машиностроение, 1974. – 144 с.
64. Кацнельсон, М.Ю. Полимерные материалы: справочник [Текст] / Кацнельсон М.Ю. – Л.: Химия, 1982. – 317 с
65. Соломатов, В.И. Вибропоглощающие композиционные материалы [Текст] / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов, Д.Е. Фомин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 96 с.
66. Композитные материалы: справочник [Текст] / Под ред. д.т.н., профессора Д.М. Карпиноса. – Киев. Наук. Думка, 1985. – 478 с.
67. Машиностроительные материалы: краткий справочник [Текст] / В.М. Раскатов [и др.] – 3-е изд.; перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
68. Энциклопедия полимеров [Текст] // Москва – 1974. – Т. 2. – С. 722-727.
69. Роговин, З.А. Основы химии и технологии химических волокон [Текст] / Роговин З.А. – 4 изд. – М., 1974. – Т. 2.
70. Krieger A., "Chemiefasern Textilindustrie".[Текст] – 1986. – № 11. – S. 889-891.
71. Krieger A., "Chemiefasern Textilindustrie". [Текст] – 1987. – № 4 – S. E41.
72. Вернигорова, В.Н. Современные методы исследования свойств строительных материалов: учебное пособие. [Текст] / В.Н. Вернигорова, Н.И.Макридин, Ю.А.Соколова. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 240 с.
73. Данилов, А.М. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие [Текст] / А.М. Данилов, А.А. Данилов; Пензенский гос. архит.-строит. Ин-т. – Пенза: ПГАСИ, 1996. – 168 с.
74. Физико-механические и физические методы исследования строительных композиционных материалов: монография [Текст] / В.Н. Вернигорова, Е.В. Королев, Ю.А. Соколова и др. – М.: Издательство «Палеотип», 2009. – 320 с.
75. Шиллинг, Г. Статистическая физика в примерах: пер. с нем. [Текст] / Шиллинг Г. – М.: Мир, 1976.
76. Релаксационные свойства трехмерных полимеров некоторых олигоэфиракрилатов [Текст] / В.К. Горячев [и др.] // Пласт. массы. – 1981. – №11. – С.11-14.
77. Трепелкова, Л.И. Модифицированные эпоксидные олигомеры с высокими демпфирующими свойствами [Текст] // Пласт. массы. – 1973. – №8. – С. 36-39.

78. Dyle, M. The fracture of glassy polimer [Текст] / M. Dyle, A. Maranci, E. Orowan, S. Stork. // Proc. Roy. Soc. – 1972. – № А 329. – 137-151 p.
79. Маския, Л. Добавки для пластических масс [Текст] / Маския Л. – М.: Химия, 1978. – 181 с.
80. Измерение и анализ механических колебаний: учебное пособие фирмы «Брюль и Кьер». [Текст] – Московский Технологический Центр Компании «Брюль и Кьер». – 39 с.
81. Лийв, Э.Х. Методика определения физико-механических свойств полимерных композитов путем внедрения конусообразного индентора: методическое пособие [Текст] / Э.Х. Лийв, А.Д. Машегиров. – Таллин: ЭстНИИНТИ, 1983. – 27 с.
82. А.с. 190588 (СССР). Способ определения свойств полимерцементных материалов [Текст] / Э.Х. Лийв. – № 3373158; заявл. 31.12.81.
83. Ленг, Ф.Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице [Текст] // Композиционные материалы. Разрушение и усталость. / Мир. – М., 1978. – Т.5. – С.11-57.
84. Мэнсон, Дж. Полимерные смеси и композиты [Текст] / Дж. Мэнсон, Л. Сперлинг – М.: Химия, 1979. – 439 с.
85. Гуль, В.Е. К вопросу о разрушении полимерных материалов [Текст] // Механика полимеров. – 1975. – №2. – С.195-199.
86. Жарин, Д.Е. Влияние количества отвердителя на прочность эпоксидных полимеров [Текст] // Вопросы планировки и застройки городов: тез. докл. 2 междунар. науч.-практ. конференции / ПГАСИ. – Пенза, 1995. – С. 33-35.
87. О квазихрупком разрушении стеклообразных полимеров [Текст] / Л.И. Маневич [и др.]. – 1978. – №5. – С.860-865.
88. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности [Текст] / Екобори Т. – М.: Металлургия, 1971. – 312 с.
89. Любовиц, Г. Разрушение. Т.7. Разрушение неметаллов и композитных материалов [Текст] / Любовиц Г. – М.: Мир, 1976. – 469 с.
90. Нарисава, И. Прочность полимерных материалов [Текст] / Нарисава И. – М.: Химия, 1987. – 397 с.
91. Партон, В.З. Механика разрушения от теории к практике [Текст] / Партон В.З. – М.: Наука, 1990. – 238 с.
92. Френкель, Я.И. Теория обратимых и необратимых трещин в твердых телах [Текст] // ЖТФ. – 1952. – Т.22. – С.1857-1866.
93. Жарин, Д.Е. Модифицированные эпоксидные композиты – материалы с высокими вибропоглощающими свойствами [Текст] / Д.Е. Жарин, Е.И. Жарин // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: тез. докл. 1 Междунар. науч.-техн. конференции, Часть 1 / ПГАСА. – Пенза, 2000. – С.41-42.

94. Роузен, Б. Феноменологическое исследование процесса разрушения эластомеров в стеклообразном состоянии [Текст] // Разрушение твердых полимеров. / Химия. – М., 1971. – С.235-285.

95. Жарин, Д.Е. Влияние полиизоцианата на демпфирующие физико-механические свойства эпоксидных композитов [Текст] // Пласт. массы. – 2002. – № 7. – С. 23-25.

96. Прочность и долговечность полимерных композитных материалов / А.Н. Бобрышев [и др.] [Текст] – Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. – 170 с.: фото, ил.

97. Дики, Р.А. Вязкоупругие свойства гетерогенных полимерных композиций с дисперсными частицами [Текст] // Промышленные композиционные материалы. [Текст] / Химия. – М., 1980.– С. 147–179.

98. Немец, Я. Прочность пластмасс. [Текст] / Я. Немец, С.В. Серенсен, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.

99. Соломатов, В.И. Оптимальная дисперсность и количество наполнителей для полимербетонов, клеев и мастик [Текст] / В.И. Соломатов, Е.Д. Яхнин, И.Д. Симонов-Емельянов // Строительные материалы. – 1971. – № 12. – С. 24-26.

100. Жарин, Д.Е. Влияние дисперсности наполнителя на демпфирующие свойства эпоксидных композитов [Текст] / Д.Е. Жарин, Д.В. Квасов // Вопросы планировки и застройки городов: тез. докл. 3 Междунар. науч.-практ. конф. / ПГАСА. – Пенза, 1996. – С.121.

101. Прочность композитных материалов [Текст] / В.И. Соломатова [и др.]. – Липецк: НПО «ОРИУС», 1995. – 112 с.

102. Фаэбразер, Т. Жесткость полимерных композиционных материалов [Текст] / Т. Фаэбразер, Дж. Реймонд // Промышленные полимерные композиционные материалы. Химия. – М., 1980. – С.180-214.

103. Гельд, П.В. Обобщенный метод самосогласованного поля для определения упругих свойств гетерогенных материалов [Текст] / П.В. Гельд, Е.А. Митюшов // Журнал прикл. мех. и техн. физики. – 1990. – №1. – С.96-100.

104. Звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы [Текст] / Под ред. Е.Я. Юдина. // – М.: 1966. – С. 190-191.

105. Быков, В.А. Современные зарубежные акустические эффективные материалы, применяемые для снижения внутреннего шума в автомобилях [Текст] / Быков В.А. – М., 1984. – 82 с.

106. Нанизашвили, И.Х. Строительные материалы, изделия и конструкции: справочник [Текст] / Нанизашвили И.Х. – М.: Высш. школа., 1990. – 495 с.

107. Зубов, П.И. Структура и свойства полимерных покрытий [Текст] / П.И. Зубов, Л.А. Сухарева – М.: Химия, 1982. – 256 с.

108. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении [Текст] / Баженов Ю.М. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
109. Баженов, Ю.М. Бетонополимеры [Текст] / Баженов Ю.М. – М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.
110. Структура, свойства и производство композитных материалов [Текст] / А.Н. Бобрышев [и др.]; Мин-во обр-я и науки РФ, ГОУ ВПО «Кам. гос. инж.-экон.акад.» – М.:Academia, 2009. – 267 с.
111. Тартаковский, Б.Д. Вибропоглощение. Борьба с шумом на производстве [Текст] / Под. ред. Е.Я. Юдина. // Машиностроение. – М., 1985. – С. 270.
112. Бабаевский, П.Г. Отверждающиеся связующие композиционных пластиков [Текст] // Пластики конструкционного назначения. / Химия. – М., 1974. – С. 75 – 119.
113. Кропаев, Ю.С. Повышение прочности и водостойкости полиэфирного стеклопластика [Текст] / Ю.С. Кропаев, П.Г. Лукина // Пласт. массы. – 1965. – №6. – С. 38 – 39.
114. Мертвиченко Е.Ф. Водостойкость фенольных стеклопластиков [Текст] / Е.Ф. Мертвиченко, Т.А. Мельник // Пласт. массы, 1978. – №8. – С. 22 – 23.
115. Романенков И.Г. К вопросу водопоглощения стеклопластиков [Текст] / И.Г. Романенков, З.П. Мачевериани // Пласт. массы. – 1965. – №6. – С. 44 – 47
116. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов [Текст] / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М.: Стройиздат, 1987. – 246 с.
117. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория и эффективные технологии композиционных строительных материалов [Текст] // Эффективные технологии композиционных строительных материалов. – Ашхабад, 1985. – С.3-7.
118. Соломатов, В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов [Текст] // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1980. – №8. – С.61-70.
119. Мясникова, М.П. Методы регулирования вибропоглощающих свойств полимерных материалов [Текст] / М.П. Мясникова, А.Г. Позамонтир, В.В. Громов // Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение. – ЛДНТП – Л., 1974. – С. 41-45.
120. Яковлев, А.П. Экспериментальные исследования демпфирующих свойств композиционных покрытий [Текст] // Проблемы прочности. – 1977. – №12, С. 102-107.
121. Наумкина, Н.И. Экспериментальное исследование некоторых вибропоглощающих материалов [Текст] / Н.И. Наумкина, Б.Д. Тартаковский, М.М. Эфрусси // Акустический журнал. – 1959. – № 2. – С. 196-203.

122. Вибропоглощающие материалы на основе полимеров [Текст] / Н.И. Наумкина [и др.] // Вибрации и шумы / Наука. – М., 1973. – С. 45-48.
123. Займан, Дж. Модели беспорядка [Текст] / Займан Дж. – М.: Мир, 1982. – 591 с.
124. Карери, Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи [Текст] / Карери Дж. – М.: Мир, 1985. – 228 с.
125. Барамбойм, Н.К. Механохимия полимеров [Текст] / Барамбойм Н.К. – М.: изд-во науч.-техн. литературы РСФСР, 1961. – 251 с.
126. Глендсдорф, П. Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуаций [Текст] / П. Глендсдорф, И. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
127. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах [Текст] / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
128. Эбелинг, В. Образование структур при необратимых процессах [Текст] / Эбелинг В. – М.: Мир, 1979. – 279 с.
129. Лифшиц, Е.М. Введение в теорию неупорядоченных систем [Текст] / Е. М. Лифшиц, С. М. Гредскул, Л. А. Пастур – М.: Наука, 1982. – 168 с.
130. Шкловский, Б. И. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред [Текст] / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос // Успехи физических наук. – 1975. – С. 117.
131. Шкловский, Б.И. Электронные свойства легированных полупроводников [Текст] / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. 416 с.
132. Shante, V. K. An introduction to percolation theory [Текст] / V.K. Shante, S. Kirkpatrick // Advances Physics. – 1971. – № 20. – P. 325 – 342.
133. Pike, I. E. Percolation and conductivity / I. E. Pike, C. H. Seager // Phys. Rev., B. – 1974. – № 10. – P. 1421 – 1436.
134. Жарин, Д.Е. Критические индексы в оценке демпфирующих свойств наполненных полимерных композитов [Текст] / Д.Е. Жарин, А.Н. Бобрышев // Композиты и глубокая переработка природных ресурсов: тез. докл. 2 Междунар. симпозиума / КамПИ. – Набережные Челны, 1999. – С. 39-40.
135. Гуль, В.Е. Механика полимеров [Текст] / В.Е. Гуль. – 1975. – №2. – С. 195–199.
136. Синергетика дисперсно-наполненных композитов [Текст] / А.Н. Бобрышев [и др.]. – М.: ЦКТ, 1999.
137. Coleman, B.D. A stochastic process model for mechanical breakdown. [Текст] // Trans. Soc. Rheol.. – 1957. – №.1. – P.153-168.
138. Berry, J.P. Fracture of polymeric glass. [Текст] // Jn.: Fracture. – 1972. – № 7 – P. 38-60.

139. Ребиндер, П.А. Структурообразование и самопроизвольное диспергирование в суспензиях [Текст] // Труды 3 Всесоюзной конференции по коллоидной химии. / Из-во АН СССР. – М., 1956.- С.7-18.

140. Соломатов, В.И. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов [Текст] / В.И. Соломатов, А.Н. Бобрышев, А.П. Прошин // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – №4. – с. 56-61.

141. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов [Текст] / Степанов А.А. – Л.: Машиностроение, Ленингр.отд-ние, 1987. – 176 с.: ил.

142. Бобрышев, А.Н. Оценка структуры вибродемпфирующих полимерных композитов с позиции топологического рассмотрения [Текст] / А.Н. Бобрышев, Д.Е. Жарин, А.Ф. Гумеров // Пласт. массы, Москва. – 2002. – №5. – С. 19 – 21

143. Моисеев, Ю.В. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах [Текст] / Ю.В. Моисеев, Г.Е. Заиков. – М.: Химия, 1979. – 288 с.

144. Фрейдин, А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений [Текст] / Фрейдин А.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981 г. – 272 с.

145. Бобрышев, А.Н. Особенности кинетических процессов при топологическом рассмотрении [Текст] / А.Н. Бобрышев, В.И. Соломатов, Р.И. Авдеев // Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы пятых академических чтений РАССН / ВГАСА. – Воронеж, 1999. – С. 42-44.

146. Бобрышев, А.Н. Новая кинетическая модель для композитных материалов [Текст] / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козоматов, А.П. Прошин // Новое в строительном материаловедении: Юбилейный сб. науч. тр. / МИИТ – 1997. – № 902. – С. 35-43.

147. Воробьева, Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств [Текст] / Воробьева Г.Я. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1975. – 816 с

148. Грановский, Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов [Текст] / Грановский Г.И. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с.

149. Ящерицын, П.И. Теория резания: учеб. [Текст] / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.

150. Исследование операций в экономике: Учеб.пособие для вузов [Текст] / Н.Ш. Кремер [и др.] – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. – 407 с.

151. Rosen, J.B., The gradient projection method for non-linear programming [Текст] // Linear constraints. Part I. J. Soc Ind. – 1960 – №8. – С. 181-217.

152. Искусственный интеллект: справочник [Текст] / Под. ред. В.Н. Захарова, В.Ф. Хорошевского. – М.: Радио и связь, 1990.

153. Статические и динамические экспертные системы [Текст] / Э.В. Попов [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 400 с.

154. Попов, Э.В. Статические и динамические экспертные системы (классификация, состояние, тенденции): методические материалы [Текст] / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель. – М.: Центральный Российский Дом знаний, 1995.

155. Бровкова, М.Б. Системы искусственного интеллекта в машиностроении: учеб. пособие [Текст] / Бровкова М.Б. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. – 119 с.

156. Ахмадеев, И.А. Базы данных: учебное пособие [Текст] / И.А. Ахмадеев, А.Х. Хайруллин, С.Ю. Юрасов; под общ. ред. И.А. Ахмадеева. – Набережные Челны: Камский государственный политехнический институт, 2004. – 239 с.

157. Жарин, Д.Е. Полимерные композиты с высокими вибропоглощающими свойствами [Текст] / Д.Е. Жарин, А.Ф. Гумеров // Композиты и глубокая переработка природных ресурсов: тез докл. 2 Междунар. симпозиума / КамПИ. – Набережные Челны, 1999. – С. 20-22 .

158. Технология обработки конструкционных материалов: учеб. для машиностр. спец. вузов [Текст] / П.Г. Петруха [и др.]. – М.: Высш., 1991. – 512 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Составы полимерных композиционных материалов

№ сос- тава	Состав				
	Полимерная смола	Отвердитель мас.ч. на 100 мас.ч. смолы	Модификатор мас. ч. на 100 мас. ч. смолы	Пластификатор мас.ч. на 100 мас.ч. смолы	Объемное содержание наполнителя
1	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	-
2	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,1$
3	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,2$
4	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,3$
5	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Диабаз $\nu=0,4$
6	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,1$
7	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,2$
8	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,3$
9	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Маршалит $\nu=0,4$
10	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,1$
11	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,2$
12	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,3$
13	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Цемент $\nu=0,4$
14	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,1$
15	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,2$
16	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,3$
17	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Аэросил $\nu=0,4$
18	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	
19	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\nu=0,1$
20	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\nu=0,2$
21	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\nu=0,3$
22	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Диабаз $\nu=0,4$
23	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\nu=0,1$
24	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\nu=0,2$
25	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\nu=0,3$
26	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Маршалит $\nu=0,4$

Окончание прил. 1

27	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент $\nu=0,1$
28	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент $\nu=0,2$
29	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент $\nu=0,3$
30	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Цемент $\nu=0,4$
31	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил $\nu=0,1$
32	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил $\nu=0,2$
33	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил $\nu=0,3$
34	540-М 888	Пероксид 2,5	-	-	Аэросил $\nu=0,4$
35	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	
36	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Диабаз $\nu=0,1$
37	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Диабаз $\nu=0,2$
38	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Диабаз $\nu=0,3$
39	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Диабаз $\nu=0,4$
40	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Маршалит $\nu=0,1$
41	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Маршалит $\nu=0,2$
42	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Маршалит $\nu=0,3$
43	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Маршалит $\nu=0,4$
44	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Цемент $\nu=0,1$
45	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Цемент $\nu=0,2$
46	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Цемент $\nu=0,3$
47	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Цемент $\nu=0,4$
48	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Аэросил $\nu=0,1$
49	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Аэросил $\nu=0,2$
50	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Аэросил $\nu=0,3$
51	ЭД-20	ПЭПА 11	Сарэл 10	-	Аэросил $\nu=0,4$
52	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Гранитный порошок $\nu=0,4$
53	ЭД-20	ПЭПА 11	-	ДБФ 5	Гранитный порошок $\nu=0,4$ Полиамидное волокно $\nu=0,02$

Образец состава полимерного композиционного материала

Состав КМ:

- 1) ЭД-20 - 100 мас.ч.
ПЭПА - 11 мас.ч.
ДБФ - 5 мас.ч.
Гранитный порошок $\varrho_n = 0,3$
- 2) ЭД-20 - 100 мас.ч.
ПЭПА - 11 мас.ч.
ДБФ - 5 мас.ч.
Гранитный порошок $\varrho_n = 0,4$

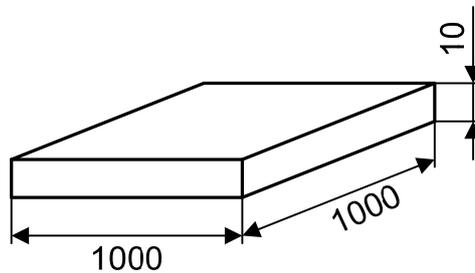


Рис.1. Футеровочная плита из ПКМ

$$L_{p.x.} = L_0 + L_{p.n.} = 10 + 4 = 14 \text{ мм}$$

где $L_{p.x.}$ - длина рабочего хода инструмента.

Справочные режимы обработки:

$$n = 500 \text{ об/мин}; S = 0,2 \text{ мм/об}$$

$$t_1 = \frac{L_{p.x.}}{n \cdot S} = \frac{14}{500 \cdot 0,2} = 0,14 \text{ мин}$$

где t_1 - время обработки при справочных режимах обработки.

Рекомендуемые режимы обработки:

$$n = 500 \text{ об/мин}; S = 0,28 \text{ мм/об}$$

$$t_2 = \frac{L_{p.x.}}{n \cdot S} = \frac{14}{500 \cdot 0,28} = 0,1 \text{ мин}$$

где t_2 - время обработки при рекомендуемых режимах обработки.

$$C_1 = C_A + C_B + C_B = N \cdot C_{A1} + Const .$$

$$C_2 = C_A + C_B + C_B = N \cdot C_{A2} + Const .$$

$$Const = 5 \text{ руб}$$

$$K_6 = \frac{\Phi_{c1} + N \cdot C_{A1} + Const}{\Phi_{c2} + N \cdot C_{A2} + Const}$$

где N – число операций механической обработки КМ

$$N = 4$$

$$\Phi_c = C_{KM}$$

$$C_{KM} = m_{KM} \cdot Cost_{KM} = m_H \cdot Cost_H + m_M \cdot Cost_M$$

$$m_{K.M.} = m_M + m_H$$

$$V = 1000 \cdot 1000 \cdot 10 = 10^7 \text{ мм}^3 = 0,01 \text{ м}^3$$

$$V = V_M + V_H$$

$$m_M = V_M \cdot \rho_{п.м.} \Rightarrow \rho_{св} \cdot V_{св} + \rho_{омс} \cdot V_{омс} + \rho_{пл} \cdot V_{пл} = \rho_{уср} \cdot (1 - V_H)$$

$$1) m_M = \rho_{уср} \cdot 0,7 \cdot V = 1200 \cdot 0,007 = 8,4 \text{ кг}$$

$$100+11+5=116 \text{ мас.ч} \Rightarrow 1 \text{ мас.ч} \sim 0,072 \text{ кг}$$

$$m_{св} = 100 \cdot 0,072 = 7,2 \text{ кг}$$

$$m_{омс} = 11 \cdot 0,072 = 0,792 \text{ кг}$$

$$m_{пл} = 5 \cdot 0,062 = 0,36 \text{ кг}$$

$$m_H = 0,3 \cdot V \cdot \rho_{усм} = 0,3 \cdot 0,01 \cdot 2650 = 7,95 \text{ кг}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{c1} &= m_H \cdot Cost_H + m_{св} \cdot Cost_{св} + m_{омс} \cdot Cost_{омс} + m_{пл} \cdot Cost_{пл} = \\ &= 7,95 \cdot 0,258 + 7,2 \cdot 110 + 0,792 \cdot 103,25 + 0,36 \cdot 200 = 947,82 \text{ руб} \end{aligned}$$

$$2) m_M = \rho_{уср} \cdot 0,6 \cdot V = 1200 \cdot 0,006 = 7,2 \text{ кг}$$

$$100+11+5=116 \text{ мас.ч} \Rightarrow 1 \text{ мас.ч} \sim 0,062 \text{ кг}$$

$$m_{св} = 100 \cdot 0,062 = 6,2 \text{ кг}$$

$$m_{омс} = 11 \cdot 0,062 = 0,682 \text{ кг}$$

$$m_{пл} = 5 \cdot 0,062 = 0,31 \text{ кг}$$

$$m_H = 0,4 \cdot V \cdot \rho_{усм} = 0,4 \cdot 0,01 \cdot 2650 = 10,6 \text{ кг}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{c2} &= m_H \cdot Cost_H + m_{св} \cdot Cost_{св} + m_{омс} \cdot Cost_{омс} + m_{пл} \cdot Cost_{пл} = \\ &= 10,6 \cdot 0,258 + 6,2 \cdot 110 + 0,682 \cdot 103,25 + 0,31 \cdot 200 = 817,15 \text{ руб} \end{aligned}$$

$$C_A = t \cdot [K_{cm} + K_{zn} + \frac{K_{un}}{(K+1) \cdot T}]$$

$$K_{cm} = 2 \text{ руб/мин}$$

$$K_{zn} = 1,5 \text{ руб/мин}$$

$$K_{un} = 100 \text{ руб}$$

$$K = 9$$

$$T = 10 \text{ мин}$$

$$C_A = t \cdot [2 + 1,5 + \frac{100}{(9+1) \cdot 10}] = t \cdot 4,5 \text{ руб/мин}$$

$$C_{A1} = t_1 \cdot 4,5 = 0,14 \cdot 4,5 = 0,63 \text{ руб}$$

$$C_{A2} = t_2 \cdot 4,5 = 0,1 \cdot 4,5 = 0,45 \text{ руб}$$

Коэффициент увеличения производительности операции механической обработки КМ:

$$\kappa_{\text{произв}} = \frac{N \cdot C_{A1} + \text{Const}}{N \cdot C_{A2} + \text{Const}} = \frac{4 \cdot 0,63 + 5}{4 \cdot 0,45 + 5} = 1,106$$

Коэффициент внедрения:

$$\kappa_{\text{в}} = \frac{\Phi_{c1} + N \cdot C_{A1} + \text{Const}}{\Phi_{c2} + N \cdot C_{A2} + \text{Const}} = \frac{947,82 + 4 \cdot 0,63 + 5}{817,15 + 4 \cdot 0,45 + 5} = \frac{955,34}{823,95} = 1,159$$

Листинг программы по оптимизации

Approx.java

```

/*
 * Created on 02.05.2007
 */
package ru.nchelny.bazon.diplom.math;
/**
 * @author Turtle
 */
public class Approx
{
    public synchronized static double approx(double x, PointSet points)
    {
        double fx = 0;
        double[] _x = points.getXArray();
        double[] _y = points.getYArray();
        for(int i = 0; i < points.size(); i++)
        {
            double f_x = function_x(i, x, _x);
            double f_y = function_y(i, _x, _y);
            fx += f_y * f_x;
        }
        return fx;
    }
    public synchronized static double approx_wofc(double x, PointSet points)
    {
        double fx = 0;
        double[] _x = points.getXArray();
        double[] _y = points.getYArray();
        for(int i = 0; i < points.size(); i++)
        {
            double f_x = function_x(i, x, _x);
            double f_y = function_y(i, _x, _y);
            double f_xx = function_xx(i, _x);
            fx += f_y * (f_x - f_xx);
        }
        return fx;
    }
    protected synchronized static double function_xx(int i, double[] _x)
    {
        double fxx = 1.0;
        for(int ii = 0; ii < i; ii++)
        {
            fxx *= _x[ii];
        }
        return fxx;
    }
    protected synchronized static double function_x(int i, double x, double[] _x)
    {
        double mplier = 1.0;
        for(int ii = 0; ii < i; ii++)
        {
            mplier *= (x - _x[ii]);
        }
        return mplier;
    }
    protected synchronized static double function_y(int i, double[] _x, double[] _y)
    {
        double rety = 0.0;
        for(int x0 = 0; x0 < (i + 1); x0++)

```

```

    {
        double divider = 1.0;
        for(int xi = 0; xi < (i + 1); xi++)
        {
            if(x0 != xi)
            {
                divider *= (_x[x0] - _x[xi]);
            }
        }
        rety += _y[x0] / divider;
    }
    return rety;
}
}

```

CompositeCalculator.java

```

/*
 * Created on 14.05.2007
 */
package ru.nchelny.bazon.diplom.core;
import java.sql.Connection;
import java.sql.ResultSet;
import java.sql.SQLException;
import java.sql.Statement;
import java.util.HashMap;
import java.util.HashSet;
import java.util.Iterator;
import java.util.LinkedHashSet;
import org.eclipse.swt.SWT;
import org.eclipse.swt.graphics.Point;
import org.eclipse.swt.widgets.Button;
import org.eclipse.swt.widgets.Combo;
import org.eclipse.swt.widgets.Table;
import org.eclipse.swt.widgets.TableColumn;
import org.eclipse.swt.widgets.TableItem;
import ru.nchelny.bazon.diplom.composites.dstatic.DynamicException;
import ru.nchelny.bazon.diplom.composites.dstatic.StaticWizard;
import ru.nchelny.bazon.diplom.composites.reverse.ReverseWizard;
import ru.nchelny.bazon.diplom.constants.CStatic;
import ru.nchelny.bazon.diplom.math.Approx;
import ru.nchelny.bazon.diplom.math.PointSet;
/**
 * @author Turtle
 */
public class CompositeCalculator
{
    protected static final HashMap matrix = new HashMap();
    protected LinkedHashSet outvalues = new LinkedHashSet();
    protected LinkedHashSet recepture = new LinkedHashSet();

    static
    {
        matrix.put(CStatic.COMPONENT_ID, new Integer(6));
        matrix.put(CStatic.COMPONENT_VALUE, new Double(100));
    }
    public CompositeCalculator()
    {
        recepture.add(matrix);
    }
    public void printTable(Table table, HashMap values)
    {
        LinkedHashSet recepture = (LinkedHashSet)values.get(CStatic.CCF_RECEPTURE);
        outvalues.clear();
    }
}

```

```

Iterator it = recepture.iterator();
while(it.hasNext())
{
    HashMap component = (HashMap)it.next();
    HashMap newhm = new HashMap();
    Integer compId = (Integer)component.get(CStatic.COMPONENT_ID);
    Double value = (Double)component.get(CStatic.COMPONENT_VALUE);
    newhm.put(CStatic.CCF_X, value);
    preparePrintValues(compId.intValue(), newhm);
}
printLayerValues(values);
outValues(table);
}
public HashMap calcElement(HashMap curCelFuncMap, Button bittoncheck, Combo combo,
double t, StaticWizard wizard) throws DynamicException
{
    if(bittoncheck == null || (bittoncheck != null && bittoncheck.getSelection()))
    {
        Integer componentid =
(Integer)combo.getData(String.valueOf(combo.getSelectionIndex()));
        curCelFuncMap = calcCelFunc(componentid.intValue(), t, curCelFuncMap, wizard);
        preparePrintValues(componentid.intValue(), curCelFuncMap);
        double alpha = calcDynamic(componentid.intValue(), curCelFuncMap,
wizard.winFreq);
        curCelFuncMap.put(CStatic.CCF_ALPHA, new Double(alpha));
        HashMap curElement = new HashMap();
        curElement.put(CStatic.COMPONENT_ID, componentid);
        curElement.put(CStatic.COMPONENT_VALUE, curCelFuncMap.get(CStatic.CCF_X));
        recepture.add(curElement);
    }
    return curCelFuncMap;
}
public double calcCost()
{
    return calcCostReverse(recepture);
}
public double calcCostReverse(LinkedHashSet recepture)
{
    double cost = 0.0;
    try
    {
        double summch = 0.0;
        double sumvol = 0.0;
        Connection conn = Context.getConection();
        Statement st = conn.createStatement();
        LinkedHashSet mch = new LinkedHashSet();
        LinkedHashSet vol = new LinkedHashSet();
        Iterator it = recepture.iterator();
        while(it.hasNext())
        {
            HashMap current = (HashMap)it.next();
            Integer component_id = (Integer)current.get(CStatic.COMPONENT_ID);
            Double xvalue = (Double)current.get(CStatic.COMPONENT_VALUE);
            ResultSet rs = st.executeQuery(
                "select " +
                " cost, " +
                " munitxtype " +
                "from components " +
                "where id = " + component_id.toString()
            );
            if(rs.next())
            {
                HashMap curc = new HashMap();

```

```

        Double ccost = new Double(rs.getDouble("cost"));
        int typeid = rs.getInt("munitxtype");

        curc.put("c", ccost);
        curc.put("x", xvalue);
        if(typeid == 0)
        {
            mch.add(curc);
            sumrch += xvalue.doubleValue();
        }
        else if(typeid == 1)
        {
            vol.add(curc);
            sumvol += xvalue.doubleValue();
        }
    }
    rs.close();
}
st.close();

double mkm = sumrch / (1 - sumvol);
Iterator mchit = mch.iterator();
while(mchit.hasNext())
{
    HashMap curc = (HashMap)mchit.next();
    Double c = (Double)curc.get("c");
    Double x = (Double)curc.get("x");
    cost += (x.doubleValue() / mkm) * c.doubleValue();
}
Iterator volit = vol.iterator();
while(volit.hasNext())
{
    HashMap curc = (HashMap)volit.next();
    Double c = (Double)curc.get("c");
    Double x = (Double)curc.get("x");
    cost += x.doubleValue() * c.doubleValue();
}
}
catch(SQLException e)
{
    e.printStackTrace();
}
return cost;
}
public void printLayerValues(HashMap curCelFuncMap)
{
    Double q_1 = (Double)curCelFuncMap.get(CStatic.CCF_Q_1);
    Double e = (Double)curCelFuncMap.get(CStatic.CCF_E);
    Double rizg = (Double)curCelFuncMap.get(CStatic.CCF_RIZG);
    Double cost = (Double)curCelFuncMap.get(CStatic.CCF_COST);
    printOut(
        "Частота вращения",
        e,
        "об/мин");
    printOut(
        "Стойкость инструмента",
        q_1,
        "мин.");
    printOut(
        "Подача инструмента",
        rizg,
        "мм/об");
    printOut(
        "Стоимость",

```

```

        cost,
        "pyб.");
    }
    public void printOut(String table_name, Double table_value, String table_measure)
    {
        if(table_value != null)
        {
            HashMap values = new HashMap();
            values.put(CStatic.OUT_COMPONENT_NAME, table_name);
            values.put(CStatic.OUT_COMPONENT_X, table_value);
            values.put(CStatic.OUT_MUNITX, table_measure);
            outvalues.add(values);
        }
    }
    public void outValues(Table table)
    {
        table.removeAll();

        Point tablesize = table.getSize();
        TableColumn cname = table.getColumn(0);
        TableColumn cvalue = table.getColumn(1);
        TableColumn cmunit = table.getColumn(2);
        cname.setWidth((int) (tablesize.x * 0.5));
        cvalue.setWidth((int) (tablesize.x * 0.3));
        cmunit.setWidth((int) (tablesize.x * 0.2));
        Iterator it = outvalues.iterator();
        while(it.hasNext())
        {
            HashMap curMap = (HashMap)it.next();
            String compName = (String)curMap.get(CStatic.OUT_COMPONENT_NAME);
            Double x = (Double)curMap.get(CStatic.OUT_COMPONENT_X);
            String munitx = (String)curMap.get(CStatic.OUT_MUNITX);
            TableItem curTItem = new TableItem(table, SWT.NONE);
            curTItem.setText(new String[]
            {
                String.valueOf(compName),
                String.valueOf(CStatic.df4.format(x)),
                String.valueOf(munitx),
            });
        }
    }
    public void preparePrintValues(int component_id, HashMap optValues)
    {
        try
        {
            HashSet sostav = new HashSet();
            Connection conn = Context.getConnection();
            Statement st = conn.createStatement();
            ResultSet rs = st.executeQuery(
                "select\r\n" +
                "  components.id,\r\n" +
                "  sostav.component_id,\r\n" +
                "  sostav.x,\r\n" +
                "  tables.table_name\r\n" +
                "from components\r\n" +
                "inner join sostav on sostav.sid = components.sostav_id\r\n" +
                "inner join components comp2 on comp2.id = sostav.component_id\r\n" +
                "inner join tables on comp2.table_id = tables.table_id\r\n" +
                "where components.id = " + component_id
            );
            while(rs.next())
            {
                HashMap values = new HashMap();
                int compId = rs.getInt("component_id");

```

```

        double x = rs.getDouble("x");
        String tablename = rs.getString("table_name");
        values.put(CStatic.TABLE_COMPONENT_ID, new Integer(compId));
        values.put(CStatic.TABLE_X, new Double(x));
        values.put(CStatic.TABLE_TABLENAME, tablename);
        sostav.add(values);
    }
    rs.close();
    if(sostav.size() != 0)
    {
        Iterator it = sostav.iterator();
        while(it.hasNext())
        {
            HashMap values = (HashMap)it.next();
            Integer compId = (Integer)values.get(CStatic.TABLE_COMPONENT_ID);
            Double x = (Double)values.get(CStatic.TABLE_X);
            String tablename = (String)values.get(CStatic.TABLE_TABLENAME);
            printComponent(st, compId.intValue(), tablename, x);
        }
    }
    else // sostav from hashmap
    {
        Double x = (Double)optValues.get(CStatic.CCF_X);
        printComponent(st, component_id, null, x);
    }
    st.close();
}
catch(SQLException e)
{
    e.printStackTrace();
}
}
public void printComponent(Statement st, int component_id, String tablename, Double x)
throws SQLException
{
    ResultSet rs;
    if(tablename == null)
    {
        rs = st.executeQuery(
            "select\r\n" +
            "  components.id,\r\n" +
            "  tables.table_name\r\n" +
            "from components\r\n" +
            "inner join tables on components.table_id = tables.table_id\r\n" +
            "where components.id = " + component_id
        );
        if(rs.next())
        {
            tablename = rs.getString("table_name");
        }
        else
        {
            throw new RuntimeException("DataBase error: can't find table for
component");
        }
        if(rs.next())
        {
            throw new RuntimeException("DataBase error: more than one component id");
        }
        rs.close();
    }
    rs = st.executeQuery(
        "select name, munitx from " + tablename + " where id = " + component_id
    );
}

```

```

while(rs.next())
{
    String compName = rs.getString("name");
    String munitx = rs.getString("munitx");
    printOut(compName,
             x,
             munitx);
}
rs.close();
}
public HashMap calcCelFunc(int compId, double t, HashMap prevValues, StaticWizard
wizard)
{
    HashMap retval = null;
    try
    {
        retval = new HashMap();
        double preq_10 = 0;
        double pree0 = 0;
        double prerizg0 = 0;
        double prerszh0 = 0;
        if(prevValues != null)
        {
            preq_10 = ((Double)prevValues.get(CStatic.CCF_Q_1)).doubleValue();
            pree0 = ((Double)prevValues.get(CStatic.CCF_E)).doubleValue();
            prerizg0 = ((Double)prevValues.get(CStatic.CCF_RIZG)).doubleValue();
            prerszh0 = ((Double)prevValues.get(CStatic.CCF_RSZH)).doubleValue();
        }
        PointSet e_points = new PointSet();
        PointSet q_1_points = new PointSet();
        PointSet rizg_points = new PointSet();
        // get points from DB
        Connection conn = Context.getConection();
        Statement st = conn.createStatement();
        Context.getPointsFromDB(st, "e_points", e_points, compId, t);
        Context.getPointsFromDB(st, "q_1_points", q_1_points, compId, t);
        Context.getPointsFromDB(st, "rizg_points", rizg_points, compId, t);
        st.close();
        double minx = PointSet.getMaxXFromMinXFromSet(new PointSet[]
        {
            e_points,
            q_1_points,
            rizg_points,
        });
        double maxx = PointSet.getMinXFromMaxXFromSet(new PointSet[]
        {
            e_points,
            q_1_points,
            rizg_points,
        });

        double step = (maxx - minx) / 100;
        if(step == 0.0)
        {
            step = 0.1;
        }
        double maxfx = Double.MIN_VALUE;
        double x0 = minx;
        double q_10 = 0;
        double e0 = 0;
        double rizg0 = 0;
        double c0 = 0;
        for(double x = minx; x <= maxx; x += step)
        {
            double q_1 = 0.0;

```

```

double e = 0.0;
double rizg = 0.0;
double c = 0.0;

if(prevValues == null)
{
    q_1 = Approx.approx(x, q_1_points) + preq_10;
    e = Approx.approx(x, e_points)+ pree0;
    rizg = Approx.approx(x, rizg_points)+ prerizg0;
}
else /*approx_wofc*/
{
    q_1 = Approx.approx(x, q_1_points) + preq_10;
    e = Approx.approx(x, e_points)+ pree0;
    rizg = Approx.approx(x, rizg_points)+ prerizg0;
}
HashMap curElement = new HashMap();
curElement.put(CStatic.COMPONENT_ID, new Integer(compId));
curElement.put(CStatic.COMPONENT_VALUE, new Double(x));
recepture.add(curElement);
c = calcCost();
recepture.remove(curElement);
double fx =
    wizard.k1 * q_1 +
    wizard.k2 * e +
    wizard.k5 * c;
if(fx > maxfx)
{
    x0 = x;
    maxfx = fx;
    q_10 = q_1;
    e0 = e;
    rizg0 = rizg;
    c0 = c;
}
}
retval.put(CStatic.CCF_X, new Double(x0));
retval.put(CStatic.CCF_Q_1, new Double(q_10));
retval.put(CStatic.CCF_E, new Double(e0));
retval.put(CStatic.CCF_COST, new Double(c0));
}
catch(Exception e)
{
    e.printStackTrace();
}
return retval;
}

public LinkedHashSet calcCelValues(LinkedHashSet retval, int compId, HashMap
prevValues, ReverseWizard wizard)
{
    if(retval == null)
    {
        retval = new LinkedHashSet();
    }
    try
    {
        LinkedHashSet recepture = null;
        double preq_10 = 0;
        double pree0 = 0;
        if(prevValues != null)
        {
            LinkedHashSet prerecepture =
(LinkedHashSet)prevValues.get(CStatic.CCF_RECEPTURE);

```

```

    recepture = new LinkedHashMap();
    recepture.addAll(prerecepture);
    preq_10 = ((Double)prevValues.get(CStatic.CCF_Q_1)).doubleValue();
    pree0 = ((Double)prevValues.get(CStatic.CCF_E)).doubleValue();
}
else
{
    recepture = new LinkedHashMap();
    recepture.add(matrix);
}

    PointSet e_points = new PointSet();
PointSet q_1_points = new PointSet();
// get points from DB
Connection conn = Context.getConection();
Statement st = conn.createStatement();
Context.getPointsFromDB(st, "e_points", e_points, compId, 20);
Context.getPointsFromDB(st, "q_1_points", q_1_points, compId, 20);
st.close();
double minx = PointSet.getMaxXFromMinXFromSet(new PointSet[]
{
    e_points,
    q_1_points,
});
double maxx = PointSet.getMinXFromMaxXFromSet(new PointSet[]
{
    e_points,
    q_1_points,
});

double step = (maxx - minx) / 10;
if(step == 0.0)
{
    step = 0.1;
}
if(minx == 0.0)
{
    minx += step;
}
for(double x = minx; x <= maxx; x += step)
{
    double q_1 = Approx.approx(x, q_1_points) + preq_10;
    double e = Approx.approx(x, e_points) + pree0;
    if(
        q_1 > wizard.qmin && q_1 < wizard.qmax &&
        e > wizard.emin && e < wizard.emax)
    {
        HashMap curElement = new HashMap();
        curElement.put(CStatic.COMPONENT_ID, new Integer(compId));
        curElement.put(CStatic.COMPONENT_VALUE, new Double(x));
        recepture.add(curElement);
        HashMap preretval = new HashMap();
        LinkedHashMap newrecepture = new LinkedHashMap();
        newrecepture.addAll(recepture);
        preretval.put(CStatic.CCF_X, new Double(x));
        preretval.put(CStatic.CCF_Q_1, new Double(q_1));
        preretval.put(CStatic.CCF_E, new Double(e));
        preretval.put(CStatic.CCF_RECEPTURE, newrecepture);
        retval.add(preretval);
        recepture.remove(curElement);
    }
}
}
catch(Exception e)
{
    e.printStackTrace();
}

```

```

    }
    return retval;
}
public void calcLongitude(HashMap celFuncMap, Button buttondolg, Button buttonnapoln,
Combo combonapoln, double t, boolean group_0) throws DynamicException
{
    if(buttondolg.getSelection())
    {
        double rszh = ((Double) celFuncMap.get(CStatic.CCF_RSZH)).doubleValue();
        double t0 = 1e-13;
        double u0 = 100.0;
        double gamma = 0.2;
        double gb = 37;
        if(buttonnapoln.getSelection() && group_0)
        {
            try
            {
                Integer napolnid =
(Integer) combonapoln.getData(String.valueOf(combonapoln.getSelectionIndex()));
                boolean one = false;
                Connection conn = Context.getConnection();
                Statement st = conn.createStatement();
                ResultSet rs = st.executeQuery(
                    "select " +
                    " t0, " +
                    " u0, " +
                    " gamma, " +
                    " gb " +
                    "from longitude " +
                    "where component_id = " + napolnid.toString()
                );
                if(rs.next())
                {
                    one = true;
                    t0 = rs.getDouble("t0");
                    u0 = rs.getDouble("u0");
                    gamma = rs.getDouble("gamma");
                    gb = rs.getDouble("gb");
                }
                if(one && rs.next())
                {
                    rs.close();
                    st.close();
                    throw new DynamicException("Database error. Component Id = " +
napolnid.toString());
                }
                rs.close();
                st.close();
            }
            catch(SQLException e)
            {
                e.printStackTrace();
            }
        }
        double tlong = t0 * Math.exp(1000 * (u0 - gamma * (rszh - gb)) / ((t + 273) *
CStatic.PHYSIC_UNIVERSALGAZCONSTANT));
        if(rszh != 0.0)
        {
            printOut("Долговечность материала",
                new Double(tlong),
                "c");
        }
    }
}
}

```

```

}
P010_ReverseParameters.java
/*
 * Created on 14.05.2007
 */
package ru.nchelny.bazon.diplom.composites.reverse;
import java.sql.Connection;
import java.sql.ResultSet;
import java.sql.SQLException;
import java.sql.Statement;
import java.util.ArrayList;
import java.util.Collections;
import java.util.Comparator;
import java.util.HashMap;
import java.util.Iterator;
import java.util.LinkedHashSet;
import org.eclipse.swt.SWT;
import org.eclipse.swt.custom.SashForm;
import org.eclipse.swt.events.SelectionEvent;
import org.eclipse.swt.events.SelectionListener;
import org.eclipse.swt.layout.FillLayout;
import org.eclipse.swt.widgets.Composite;
import org.eclipse.swt.widgets.List;
import org.eclipse.swt.widgets.Table;
import org.eclipse.swt.widgets.TableColumn;
import ru.nchelny.bazon.diplom.composites.dstatic.DynamicException;
import ru.nchelny.bazon.diplom.constants.CStatic;
import ru.nchelny.bazon.diplom.core.CompositeCalculator;
import ru.nchelny.bazon.diplom.core.Context;
import ru.nchelny.bazon.diplom.wizard.AbstractReverseWizardPage;

/**
 * @author Turtle
 */
public class P010_ReverseParameters extends AbstractReverseWizardPage
{
    private Table table;
    private List list;
    CompositeCalculator calc = null;
    public P010_ReverseParameters()
    {
        super("wizardPage");
        setTitle("Wizard Page title");
        setDescription("Wizard Page description");
    }
    public void calculate() throws DynamicException
    {
        if(isCurrentPage())
        {
            // prepare values
            wizard.emin = Double.parseDouble(wizard.p005.textEMin.getText());
            wizard.emax = Double.parseDouble(wizard.p005.textEMax.getText());
            wizard.qmin = Double.parseDouble(wizard.p005.textQMin.getText());
            wizard.qmax = Double.parseDouble(wizard.p005.textQMax.getText());
            wizard.cmin = Double.parseDouble(wizard.p005.textCMin.getText());
            wizard.cmax = Double.parseDouble(wizard.p005.textCMax.getText());
            wizard.amin = Double.parseDouble(wizard.p005.textAMin.getText());
            wizard.amax = Double.parseDouble(wizard.p005.textAMax.getText());
            wizard.freq = Double.parseDouble(wizard.p005.textFreq.getText());
            double min = -1.0;
            double max = -1.0;
            min = Math.min(wizard.emin, wizard.emax);
            max = Math.max(wizard.emin, wizard.emax);
            wizard.emin = min;

```

```

wizard.emax = max;
min = Math.min(wizard.qmin, wizard.qmax);
max = Math.max(wizard.qmin, wizard.qmax);
wizard.qmin = min;
wizard.qmax = max;
min = Math.min(wizard.cmin, wizard.cmax);
max = Math.max(wizard.cmin, wizard.cmax);
wizard.cmin = min;
wizard.cmax = max;
min = Math.min(wizard.amin, wizard.amax);
max = Math.max(wizard.amin, wizard.amax);
wizard.amin = min;
wizard.amax = max;
calc = new CompositeCalculator();
ArrayList componentset = new ArrayList();
LinkedHashSet otverditels = getOtvList();
Iterator it = otverditels.iterator();
while(it.hasNext())
{
    LinkedHashSet ocom = new LinkedHashSet();
    LinkedHashSet ocom_parent = new LinkedHashSet();
    Integer otvid = (Integer)it.next();
    LinkedHashSet plastifikators = getPlastList(otvid.intValue());
    LinkedHashSet modifikators = getModifiersList(otvid.intValue());
    LinkedHashSet uskoritels = getUskoritelList(otvid.intValue());
    ocom = calc.calcCelValues(null, otvid.intValue(), null, wizard);
    componentset.addAll(ocom);
    ocom_parent.add(ocom);
    if(wizard.p005.buttonPlast.getSelection())
    {
        ocom = addComponent(ocom_parent, plastifikators);
        componentset.addAll(ocom);
        ocom_parent.add(ocom);
    }
    if(wizard.p005.buttonMod.getSelection())
    {
        ocom = addComponent(ocom_parent, modifikators);
        componentset.addAll(ocom);
        ocom_parent.add(ocom);
    }
    if(wizard.p005.buttonNapoln.getSelection())
    {
        ocom = addComponentNap(ocom_parent, otvid);
        componentset.addAll(ocom);
        ocom_parent.add(ocom);
    }
    if(wizard.p005.buttonUskor.getSelection())
    {
        ocom = addComponent(ocom_parent, uskoritels);
        componentset.addAll(ocom);
        ocom_parent.add(ocom);
    }
}
list.removeAll();
table.removeAll();
Iterator cit = componentset.iterator();
while(cit.hasNext())
{
    HashMap current = (HashMap)cit.next();
    LinkedHashSet recepture =
(LinkedHashSet)current.get(CStatic.CCF_RECEPTURE);
    Integer id = null;
    Iterator rit = recepture.iterator();
    while(rit.hasNext())

```

```

    {
        HashMap currentr = (HashMap)rit.next();
        if(!rit.hasNext())
        {
            id = (Integer)currentr.get(CStatic.COMPONENT_ID);
        }
    }
    boolean added = true;
    if(id != null)
    {
        double a = calc.calcDynamic(id.intValue(), current, wizard.freq);
        if(a > wizard.amin && a < wizard.amax)
        {
            current.put(CStatic.CCF_ALPHA, new Double(a));
            double c = calc.calcCostReverse(recepture);
            if(c > wizard.cmin && c < wizard.cmax)
            {
                current.put(CStatic.CCF_COST, new Double(c));
            }
            else
            {
                added = false;
            }
        }
        else
        {
            added = false;
        }
    }
    else
    {
        added = false;
    }

    if(!added)
    {
        cit.remove();
    }
}
Collections.sort(componentset, celfuncmapcomparator);
int index = 0;
cit = componentset.iterator();
try
{
    Connection conn = Context.getConection();
    Statement st = conn.createStatement();
    while(cit.hasNext())
    {
        HashMap current = (HashMap)cit.next();
        list.add(getName(st, current), index);
        list.setData(String.valueOf(index), current);
        index++;
    }
    st.close();
}
catch(SQLException e)
{
    e.printStackTrace();
}
list.select(0);
listselectlistener.widgetSelected(null);
}
HashMap idNames = new HashMap();

```

```

protected String getName(Statement st, HashMap curcelfuncmap) throws SQLException
{
    StringBuffer retval = new StringBuffer("");
    LinkedHashSet recepture = (LinkedHashSet)curcelfuncmap.get(CStatic.CCF_RECEPTURE);
    Iterator it = recepture.iterator();
    while(it.hasNext())
    {
        HashMap values = (HashMap)it.next();
        Integer compId = (Integer)values.get(CStatic.COMPONENT_ID);
        Double value = (Double)values.get(CStatic.COMPONENT_VALUE);
        String prename = null;
        if(idNames.containsKey(compId))
        {
            prename = (String)idNames.get(compId);
        }
        else
        {
            ResultSet rs = st.executeQuery(
                "select " +
                "  tables.table_name " +
                "from components " +
                "inner join tables on tables.table_id = components.table_id " +
                "where components.id = " + compId.toString()
            );
            String tablename = null;
            if(rs.next())
            {
                tablename = rs.getString("table_name");
            }
            else
            {
                rs.close();
                throw new RuntimeException("Database error: no table for component Id = " + compId.toString());
            }
            if(rs.next())
            {
                rs.close();
                throw new RuntimeException("Database error: more than one table for component Id = " + compId.toString());
            }

            rs.close();
            rs = st.executeQuery(
                "select " +
                "  name " +
                "from " + tablename + " " +
                "where id = " + compId.toString()
            );
            if(rs.next())
            {
                prename = rs.getString("name");
            }
            else
            {
                rs.close();
                throw new RuntimeException("Database error: no component Id = " + compId.toString() + " in table '" + tablename + "'");
            }
            if(rs.next())
            {
                rs.close();
                throw new RuntimeException("Database error: more component Id = " + compId.toString() + " in table '" + tablename + "'");
            }
            rs.close();
        }
    }
}

```

```

    }

    retval.append(prename);
    retval.append("(");
    retval.append(CStatic.df2.format(value));
    retval.append(")");
    retval.append("+");
}
retval.delete(retval.length() - 1, retval.length());
return retval.toString();
}
Comparator celfuncmapcomparator = new Comparator()
{
    public int compare(Object o1, Object o2)
    {
        HashMap hm1 = (HashMap)o1;
        HashMap hm2 = (HashMap)o2;
        Double c1 = (Double)hm1.get(CStatic.CCF_COST);
        Double c2 = (Double)hm2.get(CStatic.CCF_COST);
        return c1.compareTo(c2);
    }
};
protected HashSet addComponentNap(HashSet baselist, Integer otvid)
{
    HashSet retval = new HashSet();
    Iterator baselistit = baselist.iterator();
    while(baselistit.hasNext())
    {
        HashSet base = (HashSet)baselistit.next();
        Iterator baseit = base.iterator();
        while(baseit.hasNext())
        {
            int modifikator_id = -1;
            HashMap currentmap = (HashMap)baseit.next();
            HashSet recapture =
(HashSet)currentmap.get(CStatic.CCF_RECEPTURE);
            Iterator recit = recapture.iterator();
            while(recit.hasNext())
            {
                HashMap receipt = (HashMap)recit.next();
                Integer compId = (Integer)receipt.get(CStatic.COMPONENT_ID);
                if(isModifikator(compId.intValue()))
                {
                    modifikator_id = compId.intValue();
                    while(recit.hasNext())
                    {
                        recit.next();
                    }
                }
            }
            HashSet addlist = getNapolnitelList(modifikator_id, otvid);
            Iterator it = addlist.iterator();
            while(it.hasNext())
            {
                Integer compid = (Integer)it.next();
                retval = calc.calcCelValues(retval, compid.intValue(), currentmap,
wizard);
            }
        }
    }
    return retval;
}
}

```

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	5
1.1. Эпоксидные, полиэфирные и эпоксиполиуретановые композиционные материалы в машиностроении	5
1.2. Методы оптимизации составов полимерных композиционных материалов	14
1.3. Композиционные материалы для футеровочных плит и фитингов	20
1.4. Механическая обработка полимерных композиционных материалов осевыми инструментами.....	23
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	29
2.1. Исследуемые материалы	29
2.2. Приборы и установки, методы исследований	36
2.3. Статистическая обработка экспериментальных данных.....	44
3. ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	48
3.1. Влияние матричных компонентов на физико-механические и технологические свойства полимерных композитов.....	48
3.2. Влияние объемного содержания наполнителей на физико-механические и технологические свойства полимерных композитов	64
3.3. Влияние агрессивных сред на физико-механические, технологические свойства и качество полимерных композиционных материалов	85
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	92
4.1. Топологическая модель дисперсно-наполненных композиционных материалов	92
4.2. Прогнозирование и оптимизация физико-механических свойств КМ	100
4.3. Кинетические модели коррозионной стойкости полимерных композиционных материалов.....	108

4.4. Оптимизационные модели технологических параметров механической обработки полимерных композиционных материалов	111
5. СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	126
5.1. Система автоматизированного проектирования и создания полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами.....	126
5.2. Практическое применение высокотехнологичных полимерных композиционных материалов в машиностроении	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	151
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	162

Научное издание

Шафигуллин Ленар Нургалеевич
Лахно Александр Викторович
Аношкин Пётр Иванович
Бобрышев Александр Анатольевич

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Монография

В авторской редакции
Верстка Т.Ю. Симутина

Подписано в печать 21.11.14. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 10,6. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ № 324.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Г. Титова, 28.