

А.П. Тарасюк, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОГО СЛОЯ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Представляється нове рішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення якості поверхнього шару волокнистих полімерних композитів після механічної обробки, що дозволило розширити функціональні можливості цих матеріалів за рахунок покращення їх експлуатаційних характеристик. Основним практичним результатом є запропоноване розширення номенклатури виробів з полімерних композитів та заміна ними дорогих металів та сплавів.

Представляется новое решение актуальной научно-технической проблемы повышения качества поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов после механической обработки, что позволяет расширить функциональные возможности этих материалов за счет улучшения их эксплуатационных характеристик. Основным практическим результатом является предложенное расширение номенклатуры изделий из полимерных композитов и замена ими дорогих металлов и сплавов.

Presents a new solution of actual scientific-technical problem of quality improvement of surface layer of sliver polymer compounds after mechanical treatment, allowing to extend functional opportunities of these materials for account of their performance characteristics. The development and implementation of effective processes of mechanical treatment of sliver polymer compounds is a basic practical result and it allows to expand the product mix from these materials and replace expensive materials and alloys in most cases.

Анализ применения волокнистых полимерных композитов за последние 20 лет показал существенное расширение сфер их использования [1, 2, 3]. Эти материалы начали вытеснять такие алюминиевые сплавы, как 2090-T83, 2090-T86, 2090-T62, 6013-T6. Замена подлежат и наиболее распространенные сплавы 7055-T77, 7150-T77, 2024 и соответствующие им отечественные аналоги В969пч, ВВАД23, У95оч, У95пч, Д16.

Однако, до сих пор, в высокотехнологических отраслях промышленного производства (авиа- и судостроение) стабильные объемы использования сохраняют высокопрочные стали и титановые сплавы, такие, как 30ХГСН2МА, ВНС-5, 40ХНМА, ВКС-170, ВТ-22, ВТ6 и др.

Одним из существенных факторов, сдерживающих замену этих материалов, является снижение эксплуатационных свойств волокнистых полимерных композитов после их механической обработки из-за дефектов поверхностного слоя, глубина которого может достигать 350÷400 мкм.

Чтобы получить возможность обеспечивать эксплуатационные свойства полимерных композитов на стадии их механической обработки, важной задачей становится установление влияния на эти свойства качества поверхностного слоя.

Ниже приведены результаты исследования влияния качества поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов на те их эксплуатационные свойства, которые накладывают наибольшее ограничения на применение этих материалов – прочность, твердость, стойкость к влагопоглощению (пористость), коррозионная стойкость, стойкость к истиранию (износостойкость трущихся поверхностей), диэлектрические свойства (электрическая прочность, объемное и поверхностное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь).

Прочность. Исследовали влияние качества поверхностного слоя механически обработанного композита на его статическую и установившуюся прочность. В качестве показателя качества поверхностного слоя использовали глубину дефектного слоя – М. Результаты представлены на рис. 1 - 3.

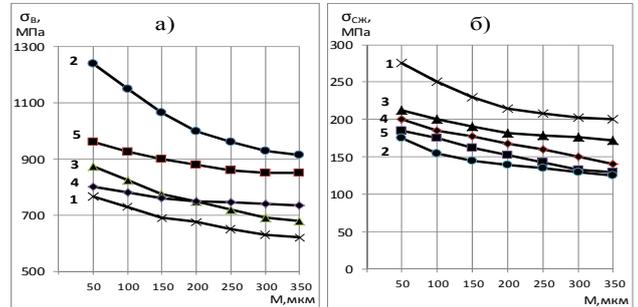


Рисунок 1 – Влияние глубины дефектного слоя композита на прочность при: а) – растяжении, б) – сжатии. Обрабатываемый материал: 1 – стеклопластик, 2 – органоластик, 3 – углепластик, 4 – стеклоорганолластик, 5 – углеорганолластик.

Исследования, проведенные по стандартной методике, показали, что увеличение глубины дефектного слоя композита от 50 до 350 мкм. снижает статическую прочность композитов на растяжение в среднем в 1,3 раза, на сжатие в 1,25 раза, следовательно, для сохранения прочности композита после механической обработки в пределах заявленных разработчиками материала необходимо обеспечивать такие условия резания, при которых глубина дефектного слоя не будет превышать 20-50 мкм.

Пределы прочности на изгиб и сдвиг также имеют устойчивую тенденцию к уменьшению с увеличением глубины дефектного слоя, что появляется наличием концентраторов напряжений в местах разрушения материала по поверхностям раздела структурных компонентов.

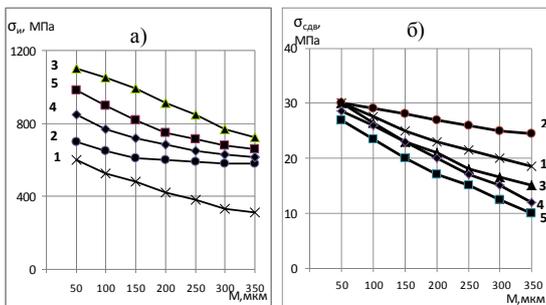


Рисунок 2 – Влияние глубины дефектного слоя композита на прочность при: а) – изгибе, б) – сдвиге. Обрабатываемый материал: 1 – стеклопластик, 2 – органоластик, 3 – углепластик, 4 – стеклоорганолластик, 5 – углеорганолластик.

Испытания композитов на ударный изгиб на маятниковом копре показали 1,5 кратное снижение ударной прочности для всех композитов, подвергающихся испытаниям при увеличении глубины дефектного слоя с 50 до 350 мкм. С увеличением глубины дефектного слоя отмечено уменьшение предела выносливости (рис. 3)

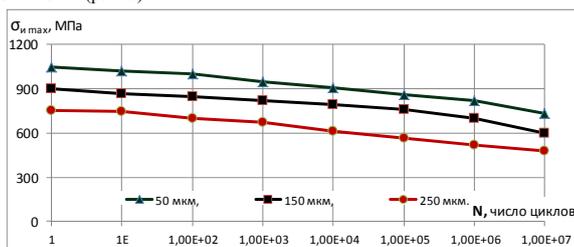


Рисунок 3 – Кривые усталости углепластика с различной глубиной дефектного слоя

Таким образом, можно констатировать, что с увеличением глубины дефектного слоя статическая, ударная и усталостная прочность композитов снижается, ограничивая тем самым их функциональные возможности.

Твердость. Твердость поверхностного слоя композита резко снижается (рис. 4.) из-за образования пористой структуры после механической обработки.

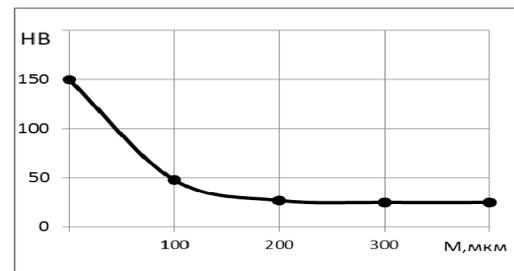


Рисунок 4 – Изменение твердости стеклопластика в зависимости от глубины дефектного слоя

Резкое уменьшение твердости поверхностного слоя с увеличением глубины дефектного слоя предполагает подбор условий резания, при которых глубина этого слоя не должна превышать 20-50 мкм.

Стойкость к влагопоглощению (пористость). Наличие влаги в поверхностном слое композита существенно ухудшает его механическую прочность, стойкость к электрохимической коррозии и диэлектрические показатели [4]. Механическая обработка полимерных композитов существенно повышает их влагопоглощение, в основном за счет наличия пористой, деструктурированного, механодиспергированного поверхностного слоя.

Пористость (влагопоглощение) композита измеряли путем заполнения образцов жидкостью. Сухие образцы взвешивали на аналитических весах на воздухе, а потом пропитывали в вакууме жидкостью. В качестве пропитывающей жидкости для ВПК использовали дистиллированную воду. Время пропитки – 24 часа. После пребывания в воде образцы протирали и сушили обдувом. Возможное растворение веществ из композита, а также внедрившихся в него продуктов износа инструмента в расчет не принимали. Водопоглощение – П вычисляли в процентах привеса

$$P = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%$$

где m_1 и m_0 – масса сухого и побывавшего в воде образца.

На влагопоглощение влияют главным образом три фактора: глубина дефектного слоя, степень деструкции и гигроскопичность обрабатываемого материала. (рис. 5.)

Чем больше глубина дефектного слоя полимера, тем интенсивнее поглощается влага. Еще сильнее на влагопоглощение влияет степень деструкции полимерных составляющих композита.

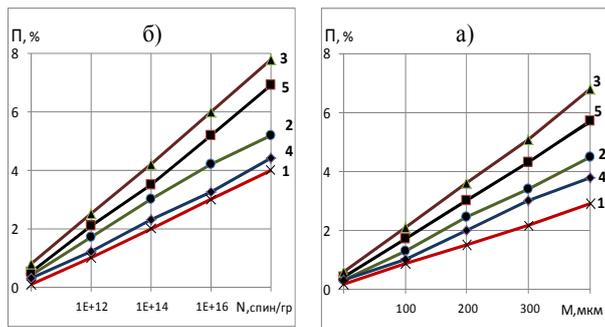


Рисунок 5 – Влияние а) – глубины, б) – степени деструкции поверхностного слоя композита на влагопоглощение. Обрабатываемый материал: 1 – стеклопластик, 2 – органоупластик, 3 – углепластик, 4 – стеклоорганопластик, 5 – углеорганопластик.

Степень влагопоглощения исходной структуры материала определяли помещая в воду образец не подвергшийся механической обработке (соответствует точке 0 на оси абсцисс графика на рис. 5а).

Коррозионная стойкость.

Электрохимическая коррозия является одной из наиболее распространенных форм коррозии. Она может происходить при наложении металлических крепежных деталей на изделия из композитов. Интенсивность этой коррозии определяется прочностью гальванического элемента, которая, в свою очередь, зависит от расстояния между этими материалами в электрохимическом ряду напряжений, степени поляризации и величины образующегося тока.

В соответствующем электролите эти факторы могут привести к коррозионному разрушению двух разнородных материалов. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают относительно высокой инертностью по сравнению с различными металлами (рис. 6.), однако в результате длительного пребывания в агрессивных средах или морской воде может вызвать коррозию.

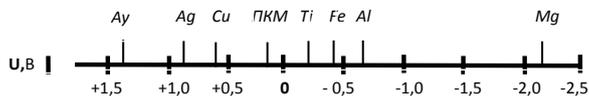


Рисунок 6 – Электрохимический ряд напряжений некоторых материалов. Гальванический потенциал измеряли в 3,5% растворе NaCl при 25°С.

Механическая обработка волокнистых полимерных композитов приводит к смещению их положения в электрохимическом ряду в сторону положительной оси, что приводит к увеличению разности потенциалов с железосодержащими сплавами, титаном и алюминиевыми сплавами, с которыми зачастую используются композиты в конструкциях.

Смещение полимерных композитов в электрохимическом ряду происходит в основном за счет деструктирования полимерных составляющих, а глубина дефектного слоя определяет степень поглощения электролита, что усугубляет условия эксплуатации и создает дополнительные предпосылки к коррозии контактирующих металлов. На рис. 7. представлена зависимость гальванического потенциала углепластика от степени деструкции поверхностного слоя.

Коррозионная стойкость важнейшая эксплуатационная характеристика волокнистых полимерных композитов, которая определяет возможность использования этих материалов для изготовления корпусов глубоководных аппаратов, обтекателей подводных лодок, консольных балок для подводных крыльев катеров, электроизоляторов, работающих в агрессивных средах с повышенной влажностью и температурой, кожухи и теплозащитные экраны, защитные купола антенн, лопасти винтов вертолетов и т.д.

Анализ зависимости электрохимического потенциала углепластика от количества стабильных макрорадикалов в поверхностном слое (рис. 7) позволяет установить, что степень деструкции полимерных составляющих композита должна быть на уровне $10^{10} - 10^{11}$ спин/гр. (Степень деструкции оценивали с помощью электронного парамагнитного резонанса).

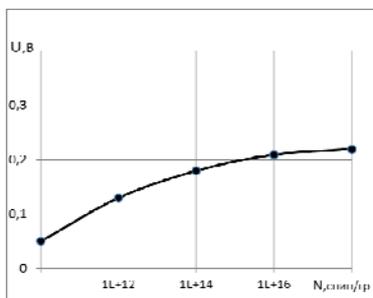


Рисунок 7 – Зависимость электрохимического потенциала углепластика от количества стабильных макрорадикалов в поверхностном слое

Износостойкость трущихся поверхностей (сопротивление истиранию) – устанавливали по стандартной (ГОСТ 11012-64) методике. Истирание проводили на машине трения МПИ - 2 по свежему следу на абразивной шкурке (Э) зернистостью 10/7 при скорости 0,25 м/с и продольной подаче 10 мм/об, равной ширине (10 мм) испытываемого образца (10×10×20) при нагрузке 10Н. Интенсивность истирания jI измеряли в мм/мин по косому срезу с помощью микроскопа МИМ-8М. Результаты исследования влияния глубины деструктированного слоя на интенсивность истирания приведены на рис. 8.

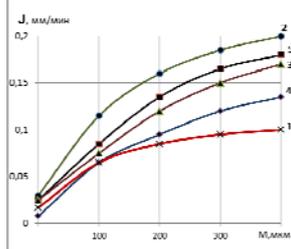


Рисунок 8 – Интенсивность истирания поверхностного слоя при различной глубине дефектного слоя: 1 – стеклопластика, 2 – органоупластика, 3 – углепластика, 4 – стеклоорганопластика, 5 – углеорганопластика.

Согласно графиков рис. 8. интенсивность истирания полимерных композитов, имеющих глубину дефектного слоя 350 мкм почти в 10 раз выше, чем интенсивность истирания исходной структуры. Очевидно, что в парах трения

механически обработанные поверхности должны иметь глубину дефектного слоя не более 20-30 мкм.

Диэлектрические свойства определяли после специальной обработки резанием образцов из стеклопластика. Вырезали образцы 100×100×10 мм для испытания по стандартной методике (ГОСТ6433-71) на объемное (R_v) поверхностное (R_s) электрическое сопротивление, на электрическую прочность ($E_{пр}$) и тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$). На рис. 9 показано влияние глубины дефектного слоя на диэлектрические свойства стеклопластика.

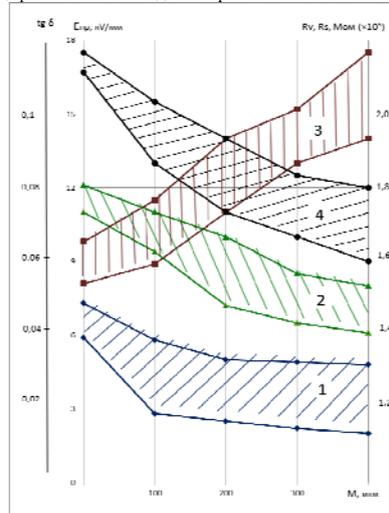


Рисунок 9 – Влияние глубины дефектного слоя стеклопластика на: 1–поверхностное, 2– объемное, электрическое сопротивление, 3– тангенс угла диэлектрических потерь, 4– электрическую прочность.

Из анализа графиков следует, что больше всего с увеличением глубины дефектного слоя изменяется показатель $tg\delta$, который с увеличением глубины дефектного слоя от 0 до 350 мкм возрастает до 50-60%, несколько меньше

отклонение имеет показатель E_{np} - до 45-50%, почти одинаковым отклонение у R_v и R_s - до 25-30%. Ухудшение диэлектрических характеристик с увеличением глубины дефектного слоя связано с поглощением влаги и других атмосферных ингредиентов, увеличивающих его электропроводность. Нельзя не учитывать при этом влияния засоренности металлическими продуктами износа инструмента поверхностного слоя стеклопластика, которая, несомненно, тоже ухудшает диэлектрические характеристики.

Выводы

Установленная взаимосвязь между качеством поверхностного слоя волокнистых полимерных композитов после механической обработки и их эксплуатационными свойствами создает предпосылки для обеспечения требуемого уровня этих свойств на стадии механической обработки изделий из композитов. Обеспечение более высокого уровня эксплуатационных свойств волокнистых полимерных композитов за счет повышения качественных характеристик поверхностного слоя позволяет расширить функциональные возможности вышеупомянутых материалов, что в свою очередь создает предпосылки для замены дорогих титановых сплавов и легированных сталей. Это позволяет применять полимерные композиты в разных высокоразвитых отраслях производства:

- **АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ОТРАСЛЬ:** детали фюзеляжа, корпуса ракет, обтекатели ракет, космические капсулы, защитные купола антенн, рули, закрылки, панели для крыльев, кожухи электрических устройств, передние и задние кромки, трубопроводы, шангоуты, лопасти винтов для вертолетов, обтекатели антенн и двигателей, детали крыльев малых летательных аппаратов, гребни консоли крыла, горизонтальные стабилизаторы, предкрылки, рули поворота, кесон крыла, трубчатые стойки, ступицы винта, лонжероны, подкрыльевые обтекатели, нервюры, панели обшивки, зализы стыка крыла с фюзеляжем, спойлеры, верхний руль направления, балки крепления пола, пол, гондолы и детали двигателя, дверцы приборных отсеков, кожухи и теплозащитные экраны, ребра жесткости, емкости для хранения сжатых газов, контейнеры для пуска ракет.
- **СУДОСТРОЕНИЕ:** корпуса малых и средних судов, палубы, обтекатели, палубные надстройки, мачты, резервуары, поплавки,

буи, шангоуты, стрингеры, переборки, кожуха, обтекатели подводных лодок, балки, рубки, командирские мостики, резервуары для хранения топлива и питьевой воды, крышки гидрокаторов, обтекатели антенн, защитные покрытия для металлов и дерева, стойки, панели.

- **АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ:** кузова автомобилей, панели пола, ящики для аккумуляторных батарей, бамперы, капоты и крышки багажников, задние откидные борта фургонов, передние панели, корпуса фар, крылья, кронштейны крыла, опорные кронштейны, основания сидений, задние двери грузовых пассажирских автомобилей-фургонов, мостики вдоль наливных горловин автоцистерн, боковые кронштейны буферов, дверные кронштейны, балки радиаторов, панели крыши и кузова, детали бампера.
- **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА:** корпуса приборов, корпуса низковольтных распределительных устройств, корпуса механизированного инструмента, корпуса кондиционеров с улитками вентиляторов, детали крепления органов управления, воздухопроводы, детали холодильников, посудомоечных машин, увлажнителей, электроизоляторы.

К практическим результатам проведенного исследования следует также отнести разработку ряда экспериментальных методик: определения статических и динамических свойств композитов, количественной оценки качества поверхностного слоя после механической обработки, определения влияния качества поверхностного слоя композитов после механической обработки на их эксплуатационные характеристики.

Список использованных источников: 1. Батаев А.А. Композиционные материалы. – М.: Логос, 2006. – 400 с. 2. Белецкий Е.Н. Обеспечение заданной точности и качества поверхности на операциях сверления углепластиков на основе моделирования процесса резания – дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. – Саратов, 2010. – 184 с. 3. Тарасюк А.П. Научные основы расширения функциональных возможностей полимерных композитов за счет создания эффективных процессов механической обработки. – дисс. на соиск. учен. докт. техн. наук. – Харьков 2011. – 484 с. 4. Дрожжин В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс. дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Харьков, 1982. – 388 с.

Поступила в редакцию 15.05.2012

УДК 621.794.61:621.891: 537.533.2

В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько, канд. физ.-мат. наук, Харьков, Украина

ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, УПРОЧНЕННОГО МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Исследованы триботехнические характеристики покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминии в сплаве Д16, с привлечением физических методов диагностики.

Досліджено триботехнічні характеристики покриття, отриманого методом микродугового оксидування на алюмінієвому сплаві Д16, із залученням фізичних методів діагностики.

Tribological characteristics of coatings produced by microarc oxidation on aluminum alloy D16 are researched with the involvement of physical methods of diagnosis.

Введение. Детали из алюминиевых сплавов, применяемые в современном оборудовании, обладают повышенной прочностью и хорошей технологичностью изготовления, но имеют низкую твердость и невысокую износостойкость. Одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения является метод микродугового оксидирования (МДО), который позволяет получать на деталях из алюминия и его сплавов многофункциональные покрытия с уникальным комплексом свойств и высокими эксплуатационными характеристиками [1]. Технология МДО является гибкой и экологически чистой, она универсальна, поскольку может применяться как при изготовлении, так и при восстановлении деталей машин. Однако, технология МДО не позволяет получать одинаковую износостойкость упрочненных оксидных слоев, т.к. при приближении к поверхностным слоям основного металла их твердость снижается. Неодинаковое распределение твердости способствует различной кинетике изнашивания сопрягаемых деталей при эксплуатации и особенно при их приработке.

Износостойкость деталей машин должна оцениваться в соответствии со свойствами их поверхностных слоев и процессами, протекающими при износе. Изменения в поверхностном слое при эксплуатации характеризуются степенью пластической деформации, процессами диффузии и адсорбции, термическими и усталостными явлениями. В результате этих изменений возможно как упрочнение поверхностного слоя (механическое, термодиффузионное), так и разупрочнение [2].

Согласно ГОСТ 30480-97 исследование поверхностей, подвергнутых износу, предлагается осуществлять методами акустической эмиссии, контактной разности потенциалов (КРП), микротвердости и т.д. Данные методы и были выбраны нами при проведении исследований, но вместо акустической эмиссии выбрана не менее эффективная экзоземиссионная диагностика. На интенсивность и кинетику экзоземиссионной эмиссии влияют характеристики материала, из которого изготовлены образец и контртело (химический состав, размер зерен, дефектность структуры, физическо-химическое состояние поверхности), состав атмосферы, окружающей трущуюся пару, а также вид трения [3]. Метод КРП обладает высокой чувствительностью к изменению физико-химических свойств поверхности трения и позволяет контролировать режимы трения, изучать динамику дефектов на трущейся поверхности, выявлять локальные очаги разрушения поверхности трения, изучать взаимодействия смазочных материалов с поверхностью трения. Он может найти широкое применение при подборе материалов и смазок для конкретных узлов трения, т.е. при решении широкого ряда задач практической триботехники [4].

Целью настоящей работы является исследование триботехнических характеристик покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминии в сплаве Д16, с привлечением физических методов диагностики.

Методика эксперимента.

Износостойкость поверхностей образцов с покрытием, полученным микродуговым оксидированием на алюминии в сплаве Д16, исследовали в динамике трения в условиях сухого трения по схеме «диск-колодка». МДО-покрытие толщиной 150-200 мкм наносилось на диск.

Экспериментальная установка для исследования процессов трения включала три основных узла – измеритель КРП, устройство для измерения фотостимулированной эмиссии заряженных частиц (ФСЭЭ) и узел трения. Устройство для измерения ФСЭЭ представляло собой модифицированный метод измерения фотоэмиссионного тока на воздухе [5]. Узел трения принципиальных отличий от известных не имел. Стимулирование экзоземиссионной эмиссии осуществлялось ультрафиолетовым осветителем с набором светофильтров.

До и после эксперимента измерялись микротвердость дорожек трения с помощью ПМТ-3М. Износ покрытий определялся по уменьшению размера