

# Электроимпульсная обработка отвержденных термореактивных синтетических смол

О. Ю. Еренков, С. П. Исаев, Д. О. Яворский

Исследованы физико-механические характеристики отвержденных синтетических термореактивных смол до и после электроимпульсной обработки материалов наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ): водопоглощение, энергия поверхностного слоя (поверхностное натяжение), предел прочности при растяжении. Подтверждена эффективность электроимпульсной обработки отвержденных полимерных связующих НЭМИ для повышения прочности и снижения влагопоглощения материалов. Установлен рациональный режим облучения отвержденных смол наносекундными электромагнитными импульсами: частота следования импульсов — 1000 Гц, амплитуда импульсов — 15 кВ, продолжительность облучения — 10 мин. При реализации данного режима облучения НЭМИ обеспечивается повышение предела прочности образцов (для эпоксидной смолы — на 12,8 %, для винилэфирной смолы — на 18,6 %, для полиэфирной смолы — на 21,1 %) и снижение водопоглощения образцов (для эпоксидной смолы — на 25,6 %, для винилэфирной смолы — на 21,6 %, для полиэфирной смолы — на 16,4 %).

**Ключевые слова:** термореактивные смолы, прочность, влагопоглощение, поверхностное натяжение, наносекундные электромагнитные импульсы, дипольная поляризация, эпоксидные группы, эфирные группы.

DOI: 10.30791/1028-978X-2024-6-81-87

## Введение

Регулирование физико-механических и эксплуатационных свойств полимерных материалов обеспечивается различными способами: введением в состав связующего наполнителей, пластификаторов, модификаторов; применением различных отвердителей и/или поверхностно активных веществ; оптимизацией условий отверждения материала и количественного состава материала; прививкой к полимерной цепи гидрофильных или гидрофобных функциональных групп [1, 2]. Разработаны также методы модификации полимерных связующих на основе термореактивных смол при воздействии на них индивидуальными и комбинированными физическими полями [3 – 6], для этого применяют термообработку полимеров, ультразвуковую обработку, облучение электрическими и магнитными полями или электромагнитными волнами (высоко-частотного и сверхвысоко-частотного диапазонов).

Перспективным методом интенсификации технологических процессов является электроимпульсная обработка материалов и их

компонентов наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ). Характерная особенность наносекундных электромагнитных импульсов — их однополярность, то есть в излучаемом поле нет осциллирующих колебаний, поэтому обеспечивается направленное пространственно-временное действие поля на материал в течение одного импульса (для воздействия на структуру и физико-механические свойства вещества [7]).

Цель данной работы — экспериментальная проверка эффективности электроимпульсной обработки НЭМИ отвержденных синтетических термореактивных смол по результатам оценки физико-механических свойств материалов, а также установление взаимосвязи физико-механических характеристик материалов и параметров электроимпульсной обработки отвержденных образцов.

## Методика экспериментальных исследований

Для исследования выбраны следующие синтетические термореактивные смолы (наиболее перспективные в производстве армированных

стеклопластиков): эпоксидная смола YD-128, винилэфирная смола Polysystem VE-3701 LVP, полиэфирная смола Polysystem YMI-100. Использовали предускоренные винилэфирная и полиэфирная смолы в состав которых входит кобальтовый ускоритель СПЭФ-2.

Для отверждения винилэфирной смолы и полиэфирной смолы применяли отвердитель Curox M 300 (пероксид метилэтилкетона), для отверждения эпоксидной смолы — отвердитель ТЕТА (смесь этиленовых аминов с преобладанием линейного изомера триэтилететрамина). После смешивания с соответствующими отвердителями смолы подвергали дегазации в вакуумной камере (в течение 5 мин) и далее отверждали в термокамере при температуре 80 °С: винилэфирная и полиэфирная смолы — в течение 5 ч, эпоксидная смола — в течение 2 ч.

Исследованы следующие физико-механические характеристики отвержденных смол: водопоглощение, энергия поверхностного слоя (поверхностное натяжение), предел прочности при растяжении.

Экспериментальная установка и методика электроимпульсной обработки образцов исследуемых смол представлены в работе [3].

Механические испытания отвержденных образцов полимерных материалов проведены в соответствии с ГОСТ 11262–80 на испытательной машине AG-100 kNIC, Shimadzu (Япония). Водопоглощение образцов определено в соответствии с ГОСТ 4560–2014, суть метода — определение массы воды, поглощенной образцом при погружении в воду в течение установленного стандартом времени (24 ч) при заданной температуре. Для оценки поверхностного натяжения на границе раздела фаз “твердое тело – газ” применяли оптический прибор измерения краевых углов смачивания тестовыми жидкостями (глицерин и этиленгликоль) поверхности исследуемого твердого тела [8, 9].

Экспериментальные исследования проводили в несколько этапов.

Первый этап — определение водопоглощения, поверхностного натяжения и прочности отвержденных образцов смол без обработки наносекундными электромагнитными импульсами.

Второй этап — определение водопоглощения отвержденных образцов исследуемых смол после их электроимпульсной обработки НЭМИ. При этом реализованы три режима облучения НЭМИ для выбора оптимального с разными частотами следования импульсов  $f$  и амплитудами им-

пульса  $A$ : 1)  $f = 500$  Гц,  $A = 11$  кВ; 2)  $f = 1000$  Гц,  $A = 15$  кВ; 3)  $f = 750$  Гц,  $A = 15$  кВ.

Для всех режимов обработки НЭМИ длительность импульса составляла 1 нс, мощность в одном импульсе — более 1 МВт, продолжительность облучения НЭМИ отвержденных образцов смол — 5, 10, 15, 20, 25, 30 мин.

Третий этап — определение поверхностного натяжения отвержденных образцов на границе раздела фаз “твердое тело – газ” после их электроимпульсной обработки при наиболее эффективном режиме облучения НЭМИ (установленном по результатам второго этапа исследований).

Четвертый этап — определение предела прочности при растяжении отвержденных образцов смол после их электроимпульсной обработки при наиболее эффективном режиме облучения НЭМИ (установленном по результатам второго этапа исследований).

## Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные данные для оценки взаимосвязи значений водопоглощения образцов из исследуемых смол и параметров их облучения НЭМИ представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при облучении НЭМИ отвержденных образцов смол обеспечивается снижение водопоглощения образцов, по сравнению с исходными значениями водопоглощения образцов без электрофизической обработки.

По результатам экспериментов определен наиболее эффективный режим облучения отвержденных образцов исследуемых смол: продолжительность обработки 10 мин, частота следования импульсов 1000 Гц, амплитуда импульса 15 кВ. При обработке по данному режиму обеспечиваются минимальные значения водопоглощения образцов для всех исследованных смол. Увеличение продолжительности облучения образцов НЭМИ от 10 до 30 мин неэффективно для снижения водопоглощения образцов (рис. 1).

По данным рис. 1 получена количественная оценка влияния облучения НЭМИ на снижение водопоглощения отвержденных образцов исследуемых смол: для образцов эпоксидной смолы максимальное снижение водопоглощения составляет 25,6 %; для образцов полиэфирной смолы — 16,4 %; для образцов винилэфирной смолы — 21,6 %.

При сравнительном анализе значений водопоглощения исследуемых смол (рис. 1) отмечено, что эпоксидная смола отличается повышенной

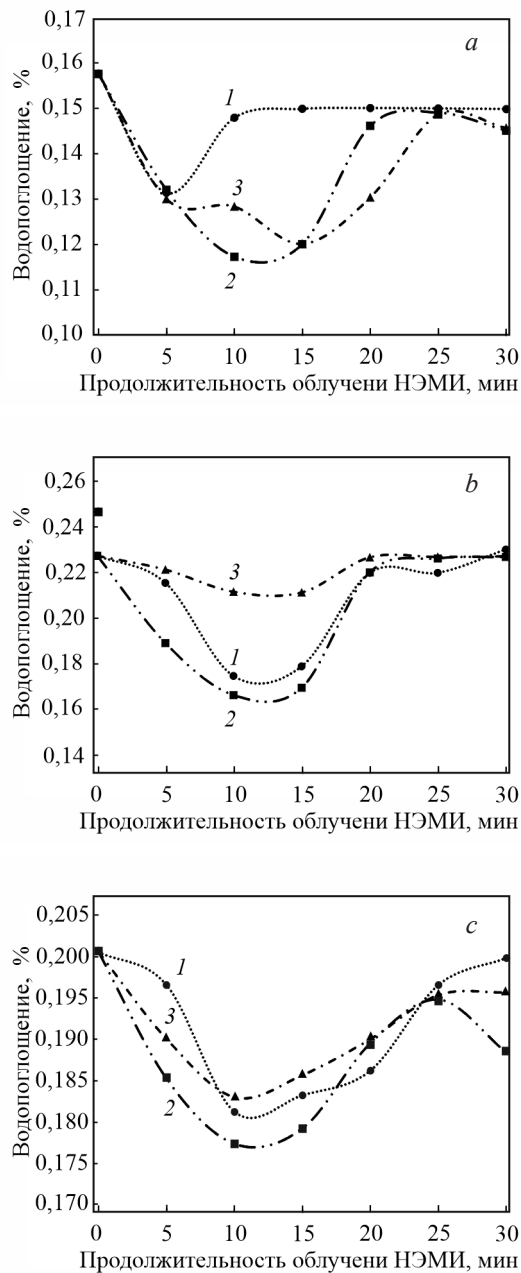


Рис. 1. Водопоглощение отвержденных смол (*a* — эпоксидной, *b* — полиэфирной, *c* — винилэфирной) в зависимости от продолжительности электроимпульсной обработки при различных параметрах НЭМИ: 1 —  $A = 11$  кВ,  $f = 500$  Гц; 2 —  $A = 15$  кВ,  $f = 1000$  Гц; 3 —  $A = 15$  кВ,  $f = 750$  Гц

Fig. 1. Water absorption of cured resins (*a* — epoxy, *b* — polyester, *c* — vinyl ester) depending on the duration of electric pulse treatment at various NEMI parameters: 1 —  $A = 11$  kV,  $f = 500$  Hz; 2 —  $A = 15$  kV,  $f = 1000$  Hz; 3 —  $A = 15$  kV,  $f = 750$  Hz.

гидрофобностью, по сравнению с полиэфирной и винилэфирной смолами, что подтверждается минимальными значениями водопоглощения образцов из эпоксидной смолы — как исходных образцов без обработки НЭМИ, так и образцов после электроимпульсной обработки по различным режимам.

Это может быть связано с различием химических структур смол разных типов. Так, в структуре полиэфирной и винилэфирной смолы присутствуют функциональные эфирные, гидроксильные и карбоксильные группы, которые являются гидрофильными [1]. Образование межмолекулярных водородных связей молекул воды с данными функциональными группами отвержденных поли- и винилэфирных полимеров приводит к существенному повышению водопоглощения. При этом, молекула винилэфира характеризуется меньшим количеством эфирных групп [2] и, как следствие, имеет меньшую степень абсорбционной способности по сравнению с полиэфиром. Снижение водопоглощения эпоксидных смол связано с отсутствием гидрофильных эфирных групп и наличием гидрофобных метиленовых и метильных функциональных групп.

В табл. 1 представлены расчетные значения энергии поверхностного слоя отвержденных смол на границе раздела фаз “твердое тело – газ”. Согласно [10] энергия поверхностного слоя твердого тела имеет две составляющие, дисперсионную и полярную:

$$\gamma_{S,G} = \gamma_{S,G}^p + \gamma_{S,G}^d,$$

где  $\gamma_{S,G}$  — энергия поверхностного слоя отвержденного полимера на границе раздела — фаз “твердое тело – газ”;  $\gamma_{S,G}^p$  — полярная составляющая энергии поверхностного — слоя отвержденного полимера на границе раздела фаз “твердое тело – газ”, включает сильные взаимодействия и образование водородных связей;  $\gamma_{S,G}^d$  — дисперсионная составляющая энергии поверхностного слоя отвержденного полимера на границе раздела фаз “твердое тело – газ”, включает силы Ван-дер-Ваальса и другие неспецифические взаимодействия;

Оценку поверхностного натяжения на границе раздела фаз “твердое тело – газ” проводили методом измерения краевых углов смачивания тестовыми жидкостями (глицерин, этиленгликоль) поверхности исследуемого твердого тела. В работе использован двухжидкостной метод. Согласно этому методу  $\gamma_{S,G}$  рассчитывают путем решения системы из двух уравнений [11]:

Таблица 1

Влияние обработки отвержденных смол НЭМИ на энергию их поверхностного слоя

Table 1

Effect of treatment of cured NEMI resins on their surface layer energy

Образцы	Обработка	Энергия поверхностного слоя отвержденного полимера на границе раздела фаз “твердое тело – газ”, Дж/м <sup>2</sup>		
		Интегральная оценка, $\gamma_{S,G}$	Полярная составляющая, $\gamma_{S,G}^p$	Дисперсионная составляющая, $\gamma_{S,G}^d$
Эпоксидная смола	без обработки НЭМИ	31,803	27,192	4,611
	после обработки НЭМИ	35,286	19,580	18,786
Винилэфирная смола	без обработки НЭМИ	34,068	26,952	7,160
	после обработки НЭМИ	30,325	12,773	17,592
Полиэфирная смола	без обработки НЭМИ	33,503	44,038	5,218
	после обработки НЭМИ	49,256	15,623	17,881

$$\left\{ \begin{aligned} (1 + \cos \theta_{L1}) \cdot \gamma_{L,G.1} &= 2(\gamma_{L,G.1}^d \cdot \gamma_{S,G}^d)^{1/2} + \\ &+ 2(\gamma_{L,G.1}^p \cdot \gamma_{S,G}^p)^{1/2}, \\ (1 + \cos \theta_{L2}) \cdot \gamma_{L,G.2} &= 2(\gamma_{L,G.2}^d \cdot \gamma_{S,G}^d)^{1/2} + \\ &+ 2(\gamma_{L,G.2}^p \cdot \gamma_{S,G}^p)^{1/2}, \end{aligned} \right.$$

где  $\theta_{L1}$  и  $\theta_{L2}$  краевые углы капель тестовых жидкостей на поверхности исследуемых отвержденных полимеров;  $\gamma_{L,G.1}^d$ ,  $\gamma_{L,G.2}^d$ ,  $\gamma_{L,G.1}^p$ ,  $\gamma_{L,G.2}^p$  — дисперсионная и полярная составляющие поверхностного натяжения тестовых жидкостей.

Из данных табл. 1 следует, что для всех исследуемых смол имеется тенденция снижения численных значений, как интегральных величин

поверхностных энергий, так и их соответствующих полярных составляющих поверхностной энергии отвержденных образцов после обработки НЭМИ. Снижение значений данных параметров свидетельствует о повышении степени гидрофобности твердой поверхности [10], так как для достижения гидрофобных свойств полимера необходимо добиваться уменьшения величины полярной составляющей на границе раздела “твердое тело – газ”.

Результаты, представленные в табл. 1, подтверждают целесообразность обработки НЭМИ отвержденных образцов из исследуемых смол, так как такая обработка снижает водопоглощение исследуемых смол.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные по влиянию продолжительности облучения НЭМИ на изменение предела прочности при растяжении отвержденных образцов исследуемых

Таблица 2

Предел прочности отвержденных смол в зависимости от времени электроимпульсной обработки

Table 2

Tensile strength of cured resins depending on the time of electric pulse treatment

Смола	Предел прочности (МПа) при продолжительности облучения НЭМИ, мин						
	0	5	10	15	20	25	30
Эпоксидная (YD-128)	51,3	55,3	58,8	56,7	57,5	57,1	54,7
Винилэфирная (Polysystem VE-3701 LVP)	63,1	72,3	77,5	73,4	70,4	72,3	72,5
Полиэфирная (Polysystem YMI-100)	55,7	64,4	70,3	67,4	62,3	57,3	57,1

полимерных связующих (при рациональном режиме облучения НЭМИ по данным рис. 1: амплитуда импульсов — 15 кВ, частота следования импульсов — 1000 Гц).

Из табл. 2 следует, что максимальные значения предела прочности образцов обеспечиваются при облучении НЭМИ в течение 10 мин и составляют для образцов: эпоксидной смолы — 12,8 %, винилэфирной смолы — 18,6 %, полиэфирной смолы — 21,1 %.

Повышение предела прочности и снижение значений водопоглощения отвержденных образцов всех исследованных смол после облучения их НЭМИ, по-видимому, связано с дипольной поляризацией под действием электромагнитного поля [12]. Дипольная поляризация способствует сближению макромолекул полимера, уплотнению структуры и снижению капиллярной пористости, формированию новых молекулярных связей — сшивок макромолекул. Все это влияет на повышение прочности и уменьшение водопоглощения отвержденных продуктов (за счет поляризации), что и подтверждается данными экспериментального исследования.

## Выводы

Подтверждена эффективность электроимпульсной обработки отвержденных полимерных связующих наносекундными электромагнитными импульсами для повышения прочности и снижения влагопоглощения материалов.

Экспериментально установлено, что наименьшее водопоглощение (независимо от режима облучения образцов НЭМИ) имеет эпоксидная смола, в химической структуре которой нет гидрофильных эфирных групп (в отличие от полиэфирной и винилэфирной смол).

Установлен рациональный режим облучения отвержденных смол наносекундными электромагнитными импульсами: частота следования импульсов — 1000 Гц, амплитуда импульсов — 15 кВ, продолжительность облучения — 10 мин. При реализации данного режима облучения НЭМИ обеспечивается повышение предела прочности образцов: для эпоксидной смолы — на 12,8 %, для винилэфирной смолы — на 18,6 %, для полиэфирной смолы — на 21,1 %; и снижение водопоглощения образцов: для эпоксидной смолы — на 25,6 %, для винилэфирной смолы — на 21,6 %, для полиэфирной смолы — на 16,4 %.

Показано существенное влияние электроимпульсной обработки на эксплуатационные свой-

ства полимерных композиционных материалов на основе синтетических термореактивных смол.

*Исследования проводились в ЦКП “Прикладное материаловедение” ФГБОУ ВО “ТОГУ” при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках НИР № FEME-2023-0009.*

## Литература/References

1. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. Санкт-Петербург, Профессия, 2020, 576 с.
  - Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. Epoksidnye smoly, otverditeli, modifikatory i svyazuuyushchie na ih osnove [Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them]. Sankt-Peterburg, Professiya Publ., 2020, 576 p. (In Russ.).
2. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и нанокomпозиты. Черноголовка, Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2021, 319 с.
  - Irzhak V.I. Epoksidnye polimery i nanokompozity [Epoxy polymers and nanocomposites]. Chernogolovka, IPHF RAN Publ., 2021, 319 p. (In Russ.).
3. Еренков О.Ю. Стеклопластик повышенной прочности. Курск, ЗАО Университетская книга, 2021, 185 с.
  - Erenkov O.Yu. Stekloplastik povyshennoj prochnosti [High strength fiberglass]. Kursk, ZAO Universitetskaya Kniga Publ., 2021, 185 p. (In Russ.).
4. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Чуриков Д.О. Анализ влияния обработки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле на межслоевое взаимодействие отвержденных полимерных композиционных материалов с различными наполнителями. Письма в ЖТФ, 2022, т. 48, № 22, с. 36–38.
  - Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Churikov D.O. Analysis of the effect of processing in an ultrahigh frequency electromagnetic field on the interlayer interaction of cured polymer composite materials with various fillers. Technical Physics Letters, 2022, v. 48, no. 11, pp. 72 – 74.
5. Грядунова Ю.Е., Никулин С.С., Бельх А.Г., Посанчуков Д.П. Повышение показателей герметизирующих составов электрическими полями. Клеи. Герметики. Технологии, 2018, № 4, с. 35 – 39.
  - Gryadunova Yu.E., Nikulin S.S., Belyh A.G., Posanchukov D.P. Povyshenie pokazatelej germetiziruyushchih sostavov elektricheskimi polyami [Increasing the performance of sealing compounds by electric fields]. Klei. Germetiki. Tekhnologii [Adhesives. Sealants. Technologies], 2018, no. 4, pp. 35 – 39. (In Russ.).
6. Зеленев Ю.А., Коптелов А.А., Шевелев А.Ю. Моделирование совместного воздействия электрического поля и ионизирующего излучения на

- свойства наполненных полимерных композиций. Пластические массы, 2007, № 7, с. 5 – 7.
- Zelenev Yu.A., Koptelov A.A., Shevelev A.Yu. Modelirovanie sovmestnogo vozdeystviya elektricheskogo polya i ioniziruyushchego izlucheniya na svoystva napolnennykh polimernykh kompozitsij [Modeling of the combined effect of an electric field and ionizing radiation on the properties of filled polymer compositions]. Plasticheskie massy [Plastic masses], 2007, no. 7, pp. 5 – 7. (In Russ.).
  - 7. Белкин В.С., Бухарин В.А., Дубровин В.К. и др. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение. Челябинск, Изд-во Татьяна Лурье, 2001, 110 с.
  - Belkin V.S., Buharin V.A., Dubrovin V.K. et al. Nanosekundnye elektromagnitnye impul'sy i ih primeneniye [Nanosecond electromagnetic pulses and their application]. Chelyabinsk, Tat'yana Lur'e Publ., 2001, 110 p. (In Russ.).
  - 8. Еренков О.Ю., Исаев С.П., Шевчук К.А. Электрофизическое модифицирование связующих в технологии композитов. Хабаровск, Изд-во Тихоокеанского гос. университета, 2020, 229 с.
  - Erenkov O.Yu., Isaev S.P., Shevchuk K.A. Elektrofizicheskoe modifitsirovanie svyazuyushchih v tekhnologii kompozitov [Electrophysical modification of binders in composites technology]. Habarovsk, Tihookean. gos. University Publ., 2020, 229 p. (In Russ.).
  - 9. Бусыгин В.Б., Степаненко В.Ю., Чалых А.Е. Определение поверхностного натяжения олигомеров и жидкостей с использованием тестовых поверхностей полимеров. Высокомолекулярные соединения, Серия Б, 1999, т. 41, № 11, с. 1843 – 1846.
  - Busygin V.B., Stepanenko V.Yu., Chalyh A.E. Opredelenie poverhnostnogo natyazheniya oligomerov i zhidkostej s ispol'zovaniem testovykh poverhnostej polimerov [Determination of surface tension of oligomers and liquids using polymer test surfaces]. Vysokomolekulyarnye soedineniya [Polymer Science, Series B], 1999, v. 41, no. 11, pp. 1843 – 1846. (In Russ.).
  - 10. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers. J. Apply. Polym. Sci., 1969, v. 13, no. 8, pp. 1741 – 1747.
  - 11. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГУ, 2010, 68 с.
  - Bogdanova Yu.G. Adgeziya i ee rol v obespechenii prochnosti polimernih kompozitov [Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites: textbook]. Moscow, MGU Publ., 2010, 68 p. (In Russ.).
  - 12. Воронежцев Ю.И., Гольдаде В.А., Пинчук Л.С., и др. Электрические и магнитные поля в технологии полимерных композитов. Минск, Наука і тэхніка, 1990, 263 с.
  - Voronezhcev Yu.I., Gol'dade V.A., Pinchuk L.S., et al. Elektricheskie i magnitnye polya v tekhnologii polimernykh kompozitov [Electric and magnetic fields in the technology of polymer composites]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1990, 263 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию — 15.09.2023 г.  
после доработки — 05.10.2023 г.  
принята к публикации — 10.10.2023 г.

**Еренков Олег Юрьевич** — ФГБОУ ВО “Тихоокеанский государственный университет” (680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области процессов физико-технической обработки полимерных материалов. E-mail: erenkov@list.ru.

**Исаев Сергей Петрович** — ФГБОУ ВО “Тихоокеанский государственный университет” (680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), доктор технических наук, доцент, профессор кафедры, специалист в области процессов физической модификации полимерных материалов. E-mail: 000350@pmi.edu.ru.

**Яворский Даниил Олегович** — ФГБОУ ВО “Тихоокеанский государственный университет” (680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), магистрант, обучается по направлению Химическая технология. E-mail: 000360@pmi.edu.ru.

## **Study of the electric pulse processing effect on cured thermosetting synthetic resins**

**O. Yu. Erenkov, S. P. Isaev, D. O. Yavorskiy**

A promising method for intensifying technological processes is the electric pulse processing of materials and their components with nanosecond electromagnetic pulses (NEMP). The physical and mechanical characteristics of cured synthetic thermosetting resins have been studied: water absorption, energy of the surface layer (surface tension), tensile strength. The research results confirmed the effectiveness of electric pulse processing of cured polymer binders with nanosecond electromagnetic pulses to increase strength and reduce moisture absorption of materials. A rational mode of irradiation of cured resins with nanosecond electromagnetic pulses has been established: pulse repetition rate — 1000 Hz, pulse amplitude — 15 kV, irradiation duration — 10 min. When implementing this NEMI irradiation mode, an increase in the tensile strength of samples is ensured (for epoxy resin — by 12.8 %, for vinyl ester resin — by 18.6 %, for polyester resin — by 21.1 %) and a decrease in water absorption of samples (for epoxy resin — by 25.6 %, for vinyl ester resin — by 21.6 %, for polyester resin — by 16.4 %).

**Keywords:** thermosetting resins, strength, moisture absorption, surface tension, nanosecond electromagnetic pulses, dipole polarization, epoxy groups, ester groups.

---

**Erenkov Oleg** — Pacific National University (680035, Khabarovsk, Tikhokaya st., 136), Dr Sci. (Eng), professor, head of the Department, specialist in the field of physical and technical processing of polymer materials. E-mail: [erenkov@list.ru](mailto:erenkov@list.ru).

**Isaev Sergey** — Pacific National University (680035, Khabarovsk, Tikhokaya st., 136), Dr of Sci. (Eng), associate professor, specialist in the field of processes of physical modification of polymer materials. E-mail: [000350@pnu.edu.ru](mailto:000350@pnu.edu.ru).

**Yavorskiy Daniil** — Pacific National University (680035, Khabarovsk, Tikhokaya st., 136), master's student, studying for a master's degree in chemical technology. E-mail: [000360@pnu.edu.ru](mailto:000360@pnu.edu.ru).