

## Самовосстановление конструкционных свойств термопластов в поле высокой частоты

# 06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0713624

Филиппенко Н. Г.

УДК 539.538

Россия, ИрГУПС

[ifpi@mail.ru](mailto:ifpi@mail.ru)

### Введение

Конструкционные материалы, в том числе это относится и к полимерным материалам, разрабатываются исходя из парадигмы «предотвращения повреждения», а не «управления повреждением». При этом применение самовосстанавливающихся материалов открыли огромные возможности, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежность материалов на как можно более длительный срок. Кроме того, самовосстановление идеально для материалов, склонных к повреждениям, например, в случаях с поверхностными трещинами.

### Цель и постановка задач исследования

Последние десятилетия характеризуются ростом производства полимерных конструкционных материалов и использованием изделий из них во всех отраслях промышленности. Как было определено авторами [1, 2] ряд полиамидных материалов в большинстве случаев отбраковываются в процессе их эксплуатации по причинам образования усталостных трещин. Поэтому самовосстановление изделий из полимерных материалов особенно в труднодоступных зонах является актуальной задачей.

В связи с этим целью данного исследования стала разработка алгоритма процесса самовосстановления механических свойств изделий из полимерных материалов.

Для достижения поставленной цели авторами были определены следующие задачи:

- Определение способов самовосстановления полимерных материалов
- Обоснование возможности обнаружения повреждений в изделиях из полимерных материалов
- Алгоритм формирования сигнала инициирующего процесс восстановления

- Определение эффективности регенерации материала.

## Исследования возможности и алгоритма решения задач регенерации полимерных материалов

Самовосстанавливающиеся материалы – это материалы, способные частично или полностью восстанавливать повреждения, например, образовавшиеся трещины. Одним из их самых выдающихся свойств биологических материалов является способность к самовосстановлению и регенерации своих функций после получения внешних механических повреждений. В природе самовосстановление может происходить как на уровне единичных молекул (например, восстановление ДНК), так и на макроуровне: срастание сломанных костей, заживление поврежденных кровеносных сосудов и т.д. Эти процессы знакомы всем, однако, конструкционные материалы, в большинстве случаев не обладают подобной способностью к самовосстановлению.

В настоящее время, полимеры (и их композиты) являются наиболее изученной категорией материалов в контексте способности к самовосстановлению. Так, например, для инженерных целей разрабатываются различные стратегии и подходы для создания технологий самовосстановления материалов. Исследования показали, что в частности, для термопластических полимеров необходимым условием восстановления повреждения является формирование подвижной фазы, которая сможет «затянуть» за счет сил поверхностного натяжения трещину (рис. 1). В зависимости от используемого материала для полимеров (и их соединений) необходимо (избирательно в зоне трещин) создать температуру в пределах 120-230°C.

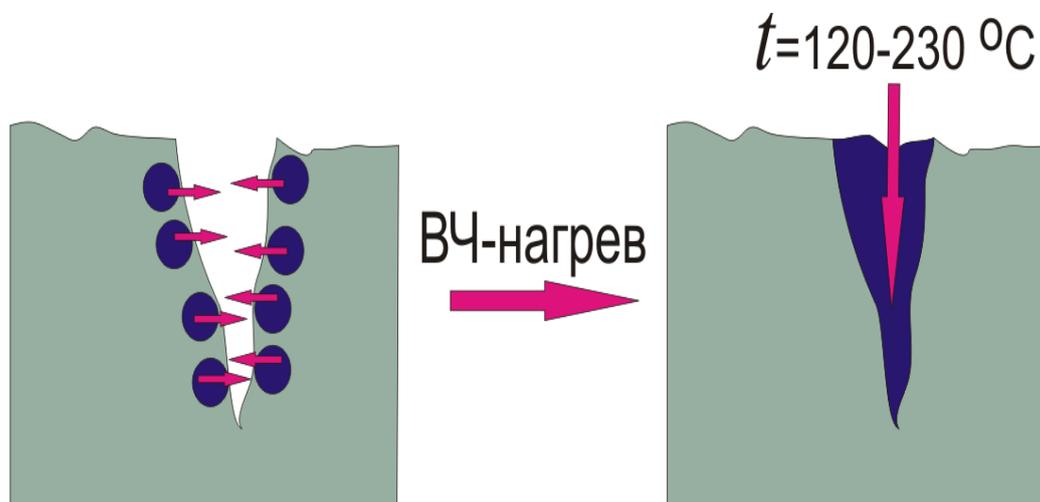


Рис. 1. Общий принцип самовосстановления материалов

После возникновения трещины внешнее воздействие (в показанном случае высокочастотное излучение) образует «подвижную фазу». Дальнейшее воздействие излучения и силы поверхностного натяжения производят закрытие трещины «подвижной фазой». По-

следующее остывание инициирует процесс иммобилизации (создание неподвижности поврежденной области) после восстановления.

Многочисленные исследования авторов [1, 2] показали, что промышленное оборудование ВЧ-нагрева обладает возможностью избирательного нагрева в полимерных материалах. Более того именно в местах раздела сред и концентраторах напряжения, которыми и являются образовавшиеся в процессе эксплуатации трещины, будет повышенное воздействие высокочастотной энергии. Все это было принято в рамках данного исследования за основу дальнейших изысканий.

Образовавшиеся микротрещины на поверхности и внутри полимера сопровождается образованием неоднородностей в материале с газовыми или другими включениями. Высокоэнергетическое воздействие электромагнитным полем вызывает возникновение в данных неоднородностях микрозарядов. Модель таких включений при обработки материала электромагнитным полем можно рассматривать как следующую эквивалентную схему замещения, представленную на рис. 2 [3, 4].

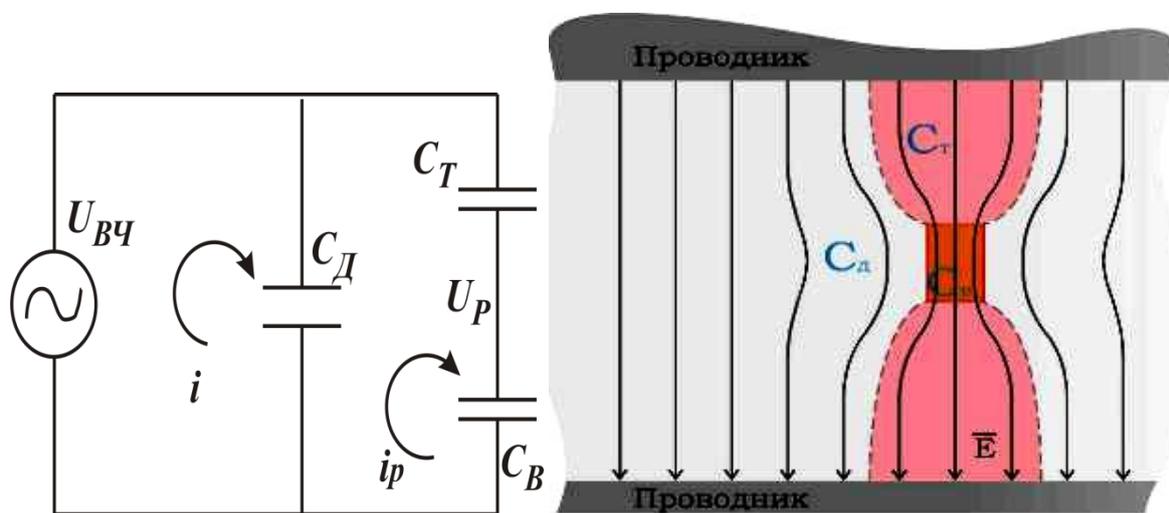


Рис. 2. Принципиальная и эквивалентная схема полимера с газовым или иным включением в электрическом поле

Емкость  $C_B$  представляет собой включение, образовавшееся в процессе эксплуатации (например газовое).  $C_T$  емкость оставшегося без повреждений полимера, для которого силовые линии поля общие с газовым.  $C_D$  емкость остальной части полимера

Напряженность электрического поля в включении превышает напряженность поля в остальной части полимера, т.к. диэлектрическая проницаемость полимера ниже проницаемости материала включения.

Согласно схемы замещения напряжение на включении будет определяться следующим образом:

$$U_B = \frac{C_T}{C_T + C_B} \cdot U_{ВЧ} \quad (1)$$

Емкость конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  материала полимера, площади обкладок  $S$  и расстояния между ними  $d$ :

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (2)$$

Приняв, что площади обкладок емкостей  $C_B$  и  $C_T$  равны, т.к. образовавшаяся трещина делит условно на два равных по длине противоположных участка разрыва и приняв за материал включения воздух ( $\varepsilon = 1$ ) можно определить, что:

$$U_B = \frac{1}{1 + \frac{C_B}{C_T}} \cdot U_{BЧ} = \frac{U_{BЧ}}{1 + \frac{d_T}{d_B \cdot \varepsilon_T}} \quad (3)$$

где  $d_T$  толщина полимера,  
 $d_B$  толщина включения.

Прикладываемое напряжение вызывает накопление поверхностного заряда на границе включения и остального полимера. При достижении напряжения величины ионизации материала включения  $U_{II}$  произойдет разряд емкости в включении. При этом напряжение разряда будет равно:

$$U_P = U_{II} \left( \frac{\frac{d_T}{d_B}}{\varepsilon_T} + 1 \right) \quad (4)$$

При разряде в газовом или ином включении напряжение  $U_{II}$  падает до величины  $U_K$ . Величина изменения напряжения  $\Delta U_B = U_{II} - U_K$  в большинстве случаев равна  $\Delta U_B \approx U_{II}$ .

Отсюда можно сделать вывод, что показателем наличия дефектов в изделиях из полимерных материалов, при их обработке высокочастотным электрическим полем могут быть микрозаряды, возникающие на поверхностях трещин (включений). При этом падение напряжения в момент разряда вызовет изменение электрофизических показателей работы электротермического ВЧ-оборудования. Наиболее информативным показателем работы ВЧ-оборудования, как было неоднократно доказано [5] является  $I_{ан}$  анодный ток. Необходимо также отметить, что любое электротермическое оборудование штатно снабжено таким устройством контроля. Поэтому авторами за стимулирующий сигнал начала регенерирования полимера был принят показатель динамического изменения анодного тока  $I_{упр ан}$  работы ВЧ-генератора, указывающего на наличие дефектов в полимерных материалах.

Восстановление изделия (после диагностики) ведется при выбранных заранее режимах работы  $I_{ан регенерации}$  на ВЧ-оборудовании, с последующем повторным контролем качества обработки.

Алгоритм самовосстановления изделий из полимерных материалов показан на рис.2.

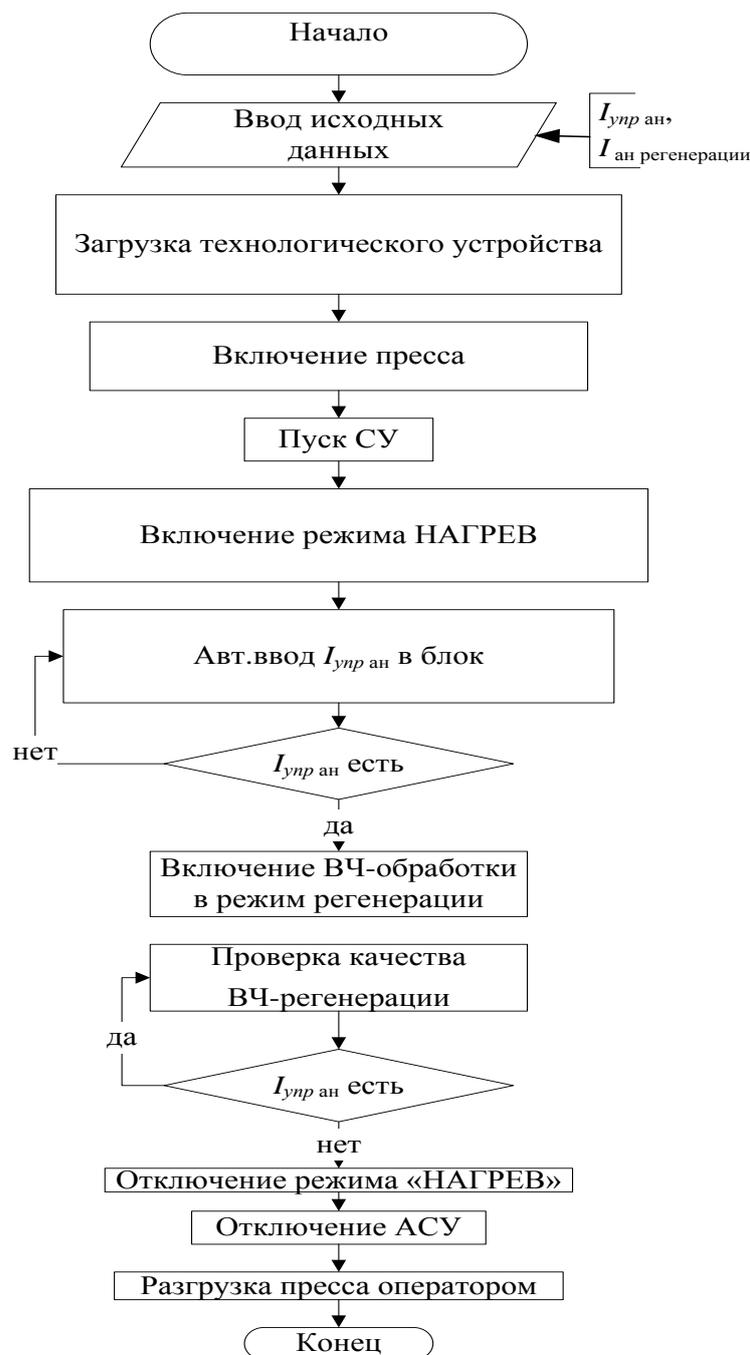


Рис. 3. Алгоритм самовосстановления изделий из полимерных материалов

Экспериментальные исследования восстановления прочностных характеристик образцов полиамида марки ПА-66 производились с использованием методики в соответствии с нормативными требованиями [6, 7]. Образцы помещались в смоделированные условия эксплуатации, соответствующие реальным условиям Западной и Восточной Сибири. Для этого в ходе настоящих исследований была определена кинетика разрушений полиамидных материалов в процессе из эксплуатации [8]. Также были найдены наиболее опасные факторы, влияющие на трещинообразование, что и послужило основанием по-

строения моделей эксплуатации. Результаты практических испытаний представлены на диаграммах (рис. 4, 5).

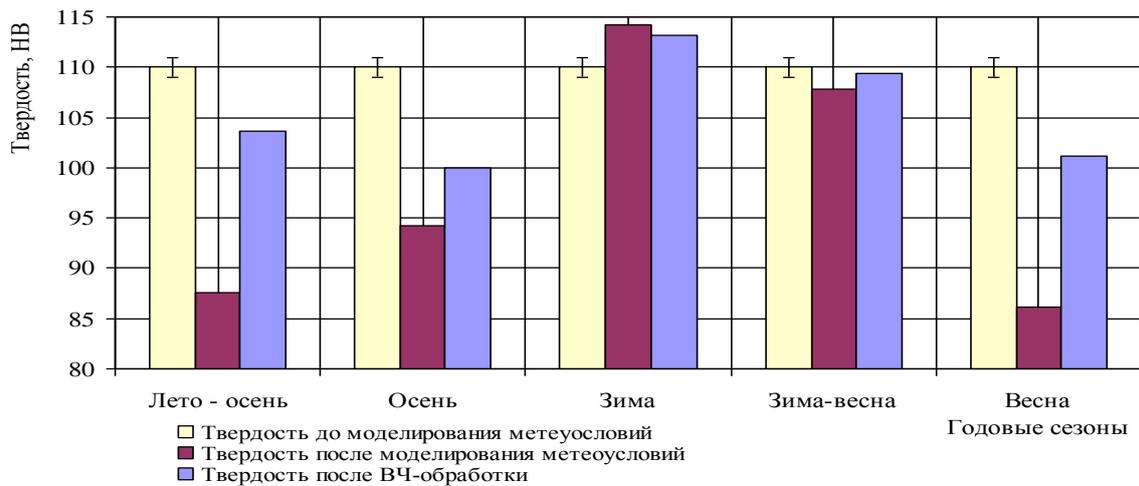


Рис. 4. Результаты измерений твердости образцов

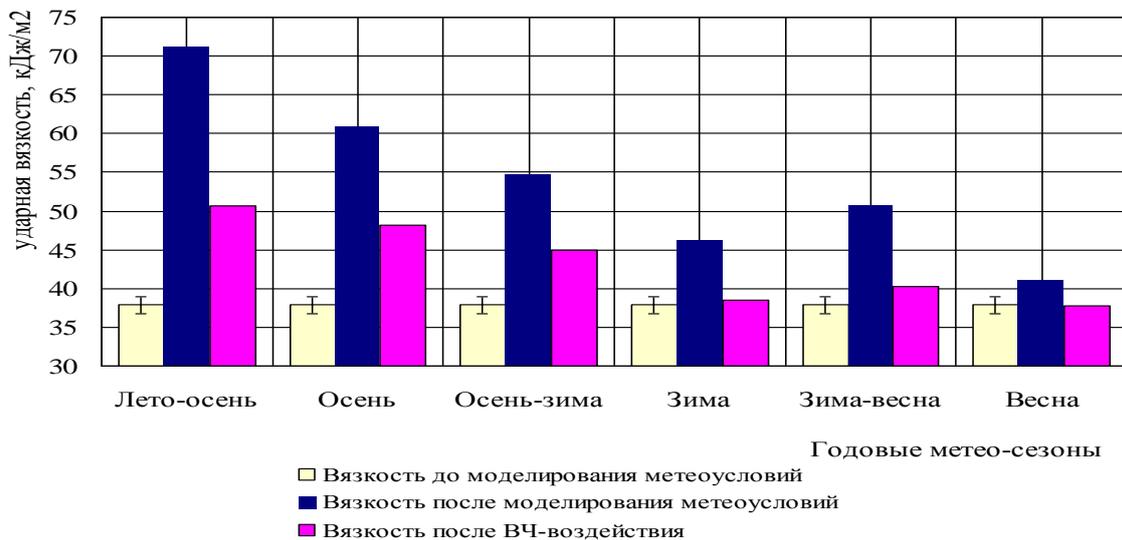


Рис. 5. Результаты измерений ударной вязкости образцов

Анализ полученных данных доказывает, что прочностные характеристики образцов полиамида марки ПА-66, (используемого для изготовления сепараторов подшипников буксовых узлов подвижного состава) после ВЧ-обработки были не только восстановлены, но и в ряде случаев превысили свои первоначальные значение. Объясняется это особенностью полиамида впитывать влагу (до 8 %), снижая свои прочностные характеристики даже в процессе хранения.

Более того в ходе исследований было определено, что после ВЧ-восстановления армирующие нити стекловолокна в местах их выхода на поверхность оплавляются (рис. 6. поз. 1) в процессе электротермического нагрева, «сшивая края» и создавая «напряженную

арматуру» стягивающую изделие из полиамида. Такие образования снижают проницаемость поверхности материала.

Структура отчетливо видна на снимке, сделанном в ходе исследований (рис. 6).

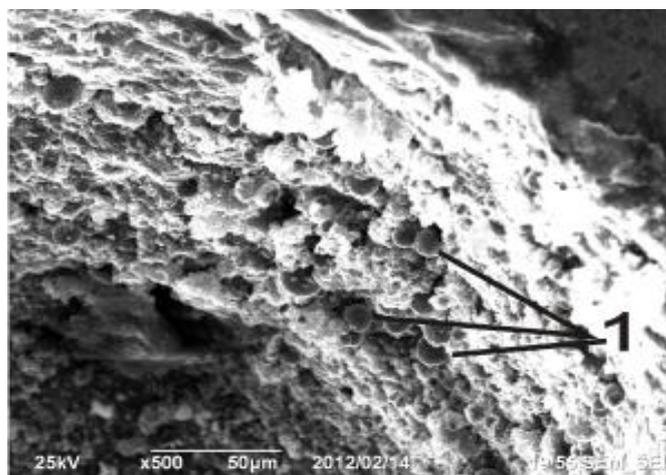


Рис. 6. Структура поверхности восстановленного полиамида

## Вывод

В результате проведенных исследований авторами была разработана методика и алгоритм самовосстановления полимерных материалов. На примере стеклонаполненного полиамида ПА-6 алгоритм самовосстановления полимерных материалов полем высокой частоты был апробирован, с удовлетворительными результатами, на промышленной установке электротермического нагрева модели УЗП 2500.

## Список литературы

1. Лившиц А.В., Машович А.Я. Филиппенко Н.Г. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. Вып. 2 (30). С. 135-140.
2. Попов С.И., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Восстановление подшипников буксовых узлов подвижного состава // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» 2012» Т. 2, № 3. Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. С. 39-43.
3. Hager M.D., Greil P., Leyens C., van der Zwaag S., Schubert U.S. Self-Healing Materials // Advanced Materials. 2010. Vol. 22, no. 47. P. 5424-5430. DOI: [10.1002/adma.201003036](https://doi.org/10.1002/adma.201003036)
4. Swapan Kumar Ghosh, ed. Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications. Wiley-VCH, 2009. 312 p. DOI: [10.1002/9783527625376](https://doi.org/10.1002/9783527625376)

5. Филиппенко Н.Г. Математическая модель процесса высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. Вып. 1 (33). С. 76-79.
6. ГОСТ 10589-87. Полиамид 610 литьевой. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1987. 12 с.
7. ГОСТ 22372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до 5х10 в ст. 6 Гц. М.: Изд-во стандартов, 1977. 12 с.
8. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.

**Self-healing structural properties of thermoplastics in HF field**

# 06, June 2014

**DOI:** 10.7463/0614.0713624**N.G. Filippenko**

Irkutsk State University of Railway Transport, 664074, Irkutsk, Russian Federation

[ifpi@mail.ru](mailto:ifpi@mail.ru)

The article concerns one of the possible ways for safe operation of polymer products with initiating a process of their self-healing. This is especially true for products from polymer materials, used in hard-to-reach areas and units of machines and mechanisms. In this regard, the aim of this study was to develop techniques for a self-healing process of the mechanical properties of products from polymer materials.

To achieve this goal, the author has solved problems to define a complex method of HF self-healing of polymer material: damage detection in products from polymer materials, determination of signal initiating the recovery process, determining the efficiency of material regeneration. The present study uses proposed and developed by the author methods for the determination of necessary and sufficient indicators of the strength characteristics of products under real-meteorological and climatic conditions of their operation.

To determine the practical results of the developed algorithm for self-healing the polymer products in the HF field, a series of experimental studies has been conducted to regenerate the polyamide cage fatigue destruction of the rolling stock axle equipment of Russian Railways JSC.

The obtained results of the strength characteristics of the material under investigation prove the self-healing process of polymer materials in HF field.

According to research results, the conclusion is drawn that it is required to provide a technological HF self-healing process of products from polymer materials. The created algorithm of regeneration enables a new approach to study the effects of electromagnetic fields on polymer and polymer-based composite materials when solving the practical tasks to improve the quality of repairing parts from thermoplastics.

---

**Publications with keywords:** [self-healing](#), [separators](#), [fatigue destruction](#), [recovery algorithm polyamide](#)

**Publications with words:** [self-healing](#), [separators](#), [fatigue destruction](#), [recovery algorithm polyamide](#)

---

## References

1. Livshits A.V., Mashovich A.Ya. Filippenko N.G. [Aspects of electrothermal processing of materials by a high-frequency electromagnetic field]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, 2011, no. 2 (30), pp. 135-140. (in Russian).
2. Popov S.I., Livshits A.V., Filippenko N.G. [Recovery of axle bearings for rolling stock]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya' 2012"* [Proc. of the SWorld. International scientific-practical conference "Scientific research and their practical application. Modern state and ways of development' 2012]. Vol. 2, no. 3. Odessa, KUPRIENKO Publ., 2012, pp. 39-43. (in Russian).
3. Hager M.D., Greil P., Leyens C., van der Zwaag S., Schubert U.S. Self-Healing Materials. *Advanced Materials*, 2010, vol. 22, no. 47, pp. 5424-5430. DOI: [10.1002/adma.201003036](https://doi.org/10.1002/adma.201003036)
4. Swapan Kumar Ghosh, ed. *Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications*. Wiley-VCH, 2009. 312 p. DOI: [10.1002/9783527625376](https://doi.org/10.1002/9783527625376)
5. Filippenko N.G. [Polymeric materials high-frequency processing mathematical model]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, 2012, no. 1 (33), pp. 76-79. (in Russian).
6. *GOST 10589-87. Poliamid 610 lit'evoy. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 10589-87. Moulding polyamide 610. Specifications]. Moscow, Standards Publishing House, 1987. 12 p. (in Russian).
7. *GOST 22372-77. Materialy dielektricheskie. Metody opredeleniya dielektricheskoy pronitsaemosti i tangensa ugla dielektricheskikh poter' v diapazone chastot ot 100 do 5kh10 v st. 6 Gts* [State Standard 22372-77. Dielectric materials. Methods of determination of permittivity and powerfactor with in a frequency range of 100 to 5x10 in 6 degree Hz]. Moscow, Standards Publishing House, 1977. 12 p. (in Russian).
8. Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloev* [Kinetics of fatigue damageability and destruction of surface layers]. Samara, SSTU Publ., 2008. 387 p. (in Russian).