

## „ჭკვიანი“ მასალების ტექნოლოგიური ასპექტებისათვის

მამუკა მაცაბერიძე<sup>1</sup>, ინგა ჯანელიძე<sup>2</sup>

<sup>1</sup>პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი

<sup>2</sup>ასოცირებული პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი

### აბსტრაქტი

სტატიაში განხილულია „ჭკვიანი მასალების“ „თვითაღდგენის“ ეფექტების მსაზღვრელი და მაინიცირებელი ფიზიკო-ქიმიური ფაქტორები, სხვადასხვა ხელოვნურად მიღებული მასალებისათვის, ისეთების როგორებიცაა: პოლიმერები, კერამიკის, ლითონის და კომპოზიციური მასალების სხვადასხვა სახეობები. მოყვანილია თვითაღდგენადი მასალების ექსპერიმენტალური პროტოტიპების მაგალითები.

**საკვანძო სიტყვები:** თვითაღდგენა, პოლიმერები, კერამიკა, ცემენტის სხვადასხვა ტიპები, ახალი კომპოზიციური მასალები.

დღეისათვის, სწრაფად ვითარდება დარგი, სადაც მასალათა თვისებები იცვლება გარე ფაქტორების ზემოქმედების შედეგად. მასალათა ამ ახალ თაობას უწოდებენ „ჭკვიან“ ან ინტელექტუალურ მასალებს - ინგლისურად მათ «**smart materials**» უწოდებენ.

ამ „ჭკვიანი“ ან ინტელექტუალურ მასალების მთავარი განმასხვავებელი თვისებაა მათი დამატებითი ფუნქციური შესაძლებლობები, რომლებიც განსხვავდებიან მასალის სტრუქტურით განპირობებული თვისებებისაგან. ამგვარი მასალები ასრულებენ 2-3 ჯერ მეტ ფუნქციას იმავე მასალებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებთან შედარებით. ზოგიერთ შემთხვევაში „ჭკვიანი“ მასალა „დაპროგრამირებულია“ გარკვეულ „ქცევაზე“, რისი ინიციატორიც შეიძლება იყოს გარე ზემოქმედება ამ „ჭკვიან“ მასალაზე. აღნიშნული

პროცესები „ჭკვიან“ მასალებში განპირობებულია მათი ქიმიური შემადგენლობით და კრისტალთქიმიური სტრუქტურით.

როგორც აღინიშნა, „ჭკვიანი მასალა“ არის ის, რომელსაც აქვს ერთი ან მეტი თვისება და რომლის მახასიათებლებიც შეიძლება შეიცვალოს, მაგალითად:

- მონოკრისტალებმა შეიძლება შეიცვალოს გამჭვირვალობა ან ფერი;
- ქსოვილები რეაგირებენ ტემპერატურის ცვლილებებზე ფერის ან ფაქტურის ცვლილებით;
- სამშენებლო ფილებს აქვს ჩაშენებული ნათება. ამგვარი ფილები არის მასალები, რომლებიც ურთიერთქმედებენ გარემოსთან ვიზუალური გადასხვაფერებით, რაც ადამიანის თვალისათვის ადვილი შესამჩნევია, რაც არღვევს მასალის შესახებ დადგენილ ტრადიციულ საზღვრებს, ფორმებსა და ფუნქციებს.

მაგალითად, როცა ადამიანი სიბნელეში (ელ. განათების ჩართვამდე) ოთახში შედის, ჭკვიანი ახალი მასალები დაეხმარება მას დაცემის გამო ტრამვის თავიდან აცილებაში და იქნება ოთახის დამატებითი მანათობელი გაფორმება. ამგვარი „ჭკვიანი“ ფილები ანათებს სიბნელეში მთელი რიგი ფოტოლუმინესცენტური პიგმენტების ფილებში წინასწარი შეტანის გამო, დაახლოებით ისე როგორცაა დროის ჩვენებისას საათის ციფერბლატის სიბნელის განათება.

გარე ზემოქმედება, რომელიც ცვლის "ჭკვიანი" მასალის თვისებებს, შეიძლება იყოს: მექანიკური დატვირთვები, ელექტრული ან მაგნიტური ველები, ტემპერატურა, სინათლე, ტენიანობა, გარემოს ქიმიური თვისებები და სხვ. „ჭკვიანი“ მასალის თვისებების შეცვლა შექცევადია და შეიძლება მრავალჯერ განმეორდეს. არსებობს მრავალი სახის "ჭკვიანი" მასალა [1], რომლებიც უფრო დეტალურად უნდა იქნას განხილული.

**შენადნობები "მახსოვრობის ეფექტით" ("ფორმის მახსოვრობა")** დეფორმაციის შემდეგ გაცხელებისას უბრუნდებიან პირვანდელ ფორმას. შენადნობი "მახსოვრობის ეფექტით" ფიქსირდება თავდაპირველ ფორმაში, რომელიც მას "ახსოვს", შემდეგ ექვემდებარება გამოწვას 500 °C ტემპერატურაზე. გახურების პროცესში წარმოიქმნება არაელასტიური მყარი ფაზა - ამ შენადნობის მაღალტემპერატურული ფაზა არის **აუსტენიტი**. ნიმუშის შემდგომი გაგრილებისას წარმოიქმნება ელასტიური, ადვილად დეფორმირებადი დაბალტემპერატურული ფაზა **მარტენსიტი**. შენადნობის შემდგომი დეფორმაციისა და გათბობის შემდგომ, ატომები ქმნიან ავსტენიტის გისოსს და შენადნობის ნიმუშის ფორმა აღდგენილია.

არსებობს ასევე „**ფორმის მახსოვრობის**“ პოლიმერები, რომლებიც უბრუნდებიან პირვანდელ ფორმას. აქ ფორმის აღდგენა ხდება სინათლის, ელექტროენერგიის, მაგნიტური ველის და გამხსნელების ზემოქმედების შედეგად.

**თვითაღდგენადი მასალები.** დღემდე, თვითაღდგენა [2] ყველაზე წარმატებით განხორციელდა პოლიმერებში მათი შედარებით მაღალი დიფუზიის სიჩქარის გამო, სადაც არსებობს

ჯვარედინი მოლეკულური ბმები. თვითაღდგენადი პოლიმერების შექმნის ერთერთი გზა არის თერმორეაქციული პოლიმერების და მათი გამკვრივების უნარის გამოყენება პოლიმერული ჯაჭვების ჯვარედინი კავშირის გამო.

პოლიმერში შეჰყავთ თხელკედლიანი ინერტული მასალების მყიფე კაფსულები აღმდგენი აგენტით. პოლიმერში თუ ბზარი გაჩნდა, კაფსულა იშლება, აღმდგენი აგენტი გამოიყოფა და ვრცელდება ბზარებში კაპილარების მეშვეობით. სადაც მას ურევენ კატალიზატორს და შემკვრელს, რომელიც ადრე იყო ჩართული მასალაში (ცალცალკე), ეს პროცესი ამკვრივებს და ხურავს ბზარებს პოლიმერის ნაკეთობაში.

პოლიმერების გარდა ამჟამად მუშავდება **თვითაღდგენადი კერამიკული მასალები** [2,3], ამ მასალებში ხშირად გამოიყენება ჟანგითი რეაქციები, ამასთან ოქსიდის მოცულობა აღემატება საწყისი მასალის მოცულობას. შედეგად, ამ რეაქციების პროდუქტებს, მოცულობის ზრდის გამო, შეუძლიათ მცირე ბზარების შევსება.

მრავალი კვლევა მიემდგვნა **ბეტონის თვითაღდგენას** [4]. ბეტონის დეფექტების

„შეხორცება“ შესაძლებელია კალციუმის იონების შემცველი წყალხსნარით [5] ან

სუპერშთამნთქმელი პოლიმერით, რომელიც გაჯირჯვდება ტენიანობის ზემოქმედებისას და „ლუქავს“ [6] ბეტონის ბზარებს.

მეტალის მასალების, პოლიმერებთან შედარებით, თვითაღდგენა ბევრად უფრო რთულია, ვინაიდან ლითონის ატომები ერთმანეთთან მჭიდროდ არის დაკავშირებული, აქვთ მცირე ზომები და დაბალი დიფუზიის კოეფიციენტები. ამჟამად, **სამი ძირითადი** მიმართულებაა დაფუძნებული, რომლებიც შექმნილია **თვითაღდგენადი ლითონის** სისტემებისათვის.

**პირველ რიგში**, ეს არის ნალექის წარმოქმნა დეფექტურ ადგილებში, რომელიც აჩერებს

რღვევის შემდგომ ზრდას. ამ მექანიზმს ეწოდება **"დაზიანების პრევენცია"**, რადგან ამ პროცესის იდეა მდგომარეობს სიცარიელების წარმოქმნის თავიდან აცილებაში, დიფუზიის გზით ნალექი ზეგაჯერებული მყარი ხსნარის [7] (შენადნობის) მეშვეობით.

გარდა აღნიშნულისა, გამოიყენება **განსხვავებული მიდგომა: შენადნობის მატრიცის გაძლიერება მიკრობოჭკოებით ან ძაფებით**, რომლებიც დამზადებულია **„ფორმის მახსოვრობის“** მქონე შენადნობიდან, როგორცაა, მაგალითად **ნიტინოლი**. თუ კომპოზიტი ექვემდებარება დაბზარვას, მასალის გათბობა ააქტიურებს ძაფების ფორმის აღდგენა **"მახსოვრობის ეფექტით"**, რომელიც კუმშავს ბზარებს [8] და ხურავს მათ.

**მესამე მიმართულება**ა ე.წ. **„სამკურნალო აგენტის“** გამოყენება [9] (მაგალითად, შენადნობი დაბალი დნობის წერტილით) რომელიც ჩასმულია ლითონის მატრიცაში, მსგავსი რამ კეთდება პოლიმერებშიც.

არსებობს მასალების თვითაღდგენის სხვა გზებიც. მაგალითად, მიკრომასშტაბიანი არხების არსებობა კომპოზიტებში [10], რომლებიც სავსეა სითხით; ან თვითაღდგენა აკუსტიკური ენერჯის გამოყენებით [11]. არსებობს იმგვარი თვითაღდგენადი კომპოზიტები - სადაც, პიეზოელექტრული ეფექტის გამო, მასალაზე მოქმედი მექანიკური ენერჯია გარდაიქმნება ელექტროენერჯიად, რაც, თავის მხრივ, იწვევს თვითაღდგენის ელექტროქიმიური პროცესის ინიცირებას ელექტროლიტის მონაწილეობით [12].

ეპოქსიდური მატრიცა **Ag** ნანონაწილაკებით, ჰანტიტის/ჰიდრომაგნეზიტის [Huntit - ქიმიური ფორმულით:  $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$  / მაგნიუმის კარბონატი (MAGNESIUM CARBONATE) - ქიმიური ფორმულით:  $\text{MgCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ] მინერალებით, ბარიუმის ჰექსაფერიტის ნაწილაკებით და ქიტოზანით არის მრავალფუნქციური მასალა - თვითაღდგენადი, ანტიბაქტერიული, ცეცხლგამძლე და რადიომთანთქმის უნარის მქონე [13].

თვითაღდგენის ეფექტი გამოიყენება აერო-კოსმოსურ ინდუსტრიაში [14], ლითონების კოროზიისგან დასაცავად [15], იქ სადაც საჭიროა მექანიკური და გეომეტრიული თვისებების აღდგენა [16] და სარეაბილიტაციოა აერო-კოსმოსური საფრენი აპარატის კორპუსი, რომელიც ზიანდება ჭურვის ბალისტიკური დარტყმის შემდეგ [17].

თვითშემზეთავი მასალები ამცირებს ხახუნს ან ცვეთას. მატერიალურ ზედაპირებზე ხახუნის ან ცვეთის შემცირების რამდენიმე მეთოდი არსებობს. ერთ-ერთი მათგანია აპლიკაცია თვითშემზეთავი დანაფარებით, რომლებიც ან საკმარისად მტკიცეა ცვეთის შესამცირებლად, ან აქვს დაბალი ზედაპირული ენერჯია, რითაც ამცირებს ადჰეზიას და ხახუნს.

საწარმოო გამოცდის სტადიაშია თვითშემზეთავი ლითონური, პოლიმერული და კერამიკული კომპოზიტები. მაგალითად, ნანოკომპოზიტების შემავსებელი, ნახშირბადის ნანომილები ან ფულერენები **C60**, ასრულებენ "საკისრების" როლს, რითაც ამცირებენ ხახუნს.

კომპოზიტში, რომელიც დამზადებულია სპილენძის საფუძველზე **ფხვნილოვანი მეტალურგით**, ამატებენ **პოლიტეტრაფტორეთილენს** [18], ხოლო ფოროვან პოლიფენილენ სულფიდის კომპოზიტს მოდიფიცირებას უკეთებდნენ ცეოლიტის 1% (მთლიანი მასის) დამატებით და ჟღენთავდნენ ლითიუმზე დაფუძნებული კომპოზიციით, რომელიც ამცირებს ხახუნის კოეფიციენტს 90%-ით [19].

თვითშემზეთავი მასალების შექმნის ერთ-ერთი გზაა ქიმიური რეაქციის გამო, ხახუნის პროცესში შემზეთავი ფენის შექმნა. ასეთი რეაქცია შეიძლება წარიმართოს მექანიკური კონტაქტის გამო. მაგალითად, სპილენძის დამცავი ფენა წარმოიქმნება, ლითონის ზედაპირზე ხახუნის შედეგად სპილენძის იონების გადატანის გამო სპილენძის შემცველი შენადნობებიდან (მაგ. ბრინჯაო) ან საპოხი მასალიდან.

დამცავი ფენა, ასევე, შეიძლება ჩამოყალიბდეს ქიმიური დაჟანგვის ან წყლის ორთქლთან რეაქციით. ბორის ოქსიდი რეაგირებს წყლის ორთქლთან ჰაერში და წარმოქმნის ბორის მჟავას დამცავ ფენას:  $\text{B}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{BO}_3$



დამცავი საფარი, თავის მხრივ, იწვევს ხახუნის და ცვეთის შემცირებას.

ბორის მჟავა, ფენოვან-კრისტალური სტრუქტურით, სხვა მყარი ნაწილაკების მსგავსია (მაგ. MoS<sub>2</sub>, გრაფიტი და ჰექსაგონალური ბორის ნიტრიდი), თან კარგი საპოხი თვისებებით [20-23].

თვითშეზეთვის მექანიზმის ასახსნელად ზოგიერთი მკვლევარის მიერ

შემოთავაზებულია ბორის მჟავას ტრიკლინური კრისტალური სტრუქტურის მოდელი. ატომები, რომლებიც ქმნიან ბორის მჟავას მოლეკულებს განლაგებულია მჭიდროდ შეფუთულ ფენებად და ერთმანეთისგან დაშორებულია 0,318 ნმ-ით, რომლებიც დაკავშირებულია ერთმანეთთან სუსტი ძალებით, მაგალითად ისეთით როგორცაა ვან დერ ვალსის ძალები.

ავტორები ვარაუდობენ, რომ სრიალის დროს ეს ფენები შეიძლება ორიენტირდეს ფარდობითი მოძრაობის მიმართულების პარალელურად და შემდეგ ისინი ადვილად სრიალებენ ერთმანეთის მიმართ, რაც, თავის მხრივ, უზრუნველყოფს ხახუნის დაბალ კოეფიციენტს [24].

თვითშეზეთავი მასალების შექმნის კიდევ ერთი გზაა **მიკროტექსტურირებული ზედაპირის შექმნა**, რომლის დროსაც წარმოიქმნება რელიეფი მიკროდრმულებით, რომლებიც, თავის მხრივ, ასრულებენ შეზეთვის რეზერვუარების როლს.

**თვითგამწმენდი მასალები** არ სველდებიან წყლით, ორგანული სითხეებით და სხვა დამაბინძურებლებით. მიკროსტრუქტურირებული ზედაპირების **თვითგამწმენდის თვისება** ეფუძნება იმ მოვლენას, რომ მიკროსტრუქტურებსა და მათ სივრცულ ორნამენტებს შეუძლიათ ხელი შეუწყონ ჰაერიან წყლის წვეთს მოძრაობაში, რომელიც ჩაკეტილია სტრუქტურებს შორის სივრცეებში. ამ ტიპის კონტაქტი ზრდის კონტაქტის კუთხეს წყალთან ზედაპირული დაჭიმულობის გამო და, შესაბამისად, წყლის წვეთი შეიძლება გადაგორდეს მიკროსტრუქტურულ ზედაპირზე, რითაც მასალის ზედაპირს ამორებით მტვერს, ე.ი. უზრუნველყოფს თვითწმენდას [25-26].

ახალი მეთოდი საშუალებას იძლევა შეიქმნას თვითგამწმენდი დანაფარები ორი საერთო მასალის - ტეფლონისა და თბოკუმშვადი პლასტმასის შერწყმით. ამ კვლევის ფარგლებში და მის შემდგომ, მკვლევარებმა დაადგინეს, რომ კარგი სუპერ-ჰიდროფობიური ზედაპირის გასაღები არის მიკრო და ნანომასშტაბიანი შაბლონების/ორნამენტის კომბინაცია.

მკვლევარებმა დაფარეს ტეფლონით თბოშეკუმშვადი პლასტმასი, შემდეგ გააცხელეს და მიიღეს ტეფლონის დანაოჭებული ზედაპირი. ასეთ ზედაპირთან წვეთების შეხების კუთხე 172°-ია, რაც იმას ნიშნავს, რომ წყლის ბურთულები ზედაპირს ოდნავ ეხებიან. შემუშავებული დანაფარი თითქმის ისეთივე მდგრადია, როგორც ალუმინის ფენა. ხოლო ნაკაწრების გაჩენისას, საფარის წყალგაუმტარი თვისებები შენარჩუნებულია [27].

მასალათა, დამაბინძურებელი სუბსტანციების მიმართ, „**სუპერუკუდების**“ თვისებები ქსოვილებს ანიჭებს თვითწმენდის ფუნქციას, რომელიც მოიცავს როგორც

დამაბინძურებლების ფიზიკურ წმენდას, ასევე ქიმიურ თვითწმენდის პროცესს, რომელიც მოიცავს ფერადი ლაქების და ხსნარების დეგრადაციას ულტრაისფერი გამოსხივების ზემოქმედებისას და ბიოლოგიურ - ანტიბაქტერიულ თვისებებს. მაგალითად, თვითგამწმენდი თვისებები შეიძლება მივანიჭოთ ბამბის ქსოვილს  $\text{TiO}_2$  ნანონაწილაკების [28-31] ან  $\text{ZnO}$  ნანოღეროების დამატებით [32-33].

$\text{TiO}_2$ -ზე დაფუძნებული თვითგამწმენდი დანაფარი ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას ისტორიული შენობებისა და ძეგლების დასაცავად [34-36].

### დენის გამტარი პოლიმერები

გამტარ პოლიმერებში ელექტრული გამტარობის არსებობა აიხსნება იმით, რომ მათი სტრუქტურის დეფექტების ადგილებში წარმოიქმნება დაუწყვილებელი ელექტრონი, რომელსაც შეუძლია გადაადგილება პოლიმერული ჯაჭვის გასწვრივ. გამტარი პოლიმერის ლეგირება ელექტრონის აქცეპტორებით ან დონორებით იწვევს მისი ელექტრული გამტარობის ზრდას, მობილური ელექტრონის ფორმირებისთვის საჭირო ენერჯის შემცირების გამო. ყველაზე ცნობილი და ფართოდ გამოყენებული დენის გამტარი პოლიმერებია პოლიანილინი და პოლიპიროლი [37].

მაქსიმალური ელექტრული გამტარობა შეინიშნება სუფთა(ე.ი. მინარევების გარეშე) ორიენტირებულ პოლიმერებში დიდი მოლეკულური მასით. უმაღლესი მიღებული მნიშვნელობებია - 107 1/ომი 1/მ პოლიაცეტილენისთვის და 2-105 1/ომი 1/მ პოლიანილინისთვის [38].

იმედი იმისა, რომ გამტარი პოლიმერები შეცვლიდნენ სპილენძს ელექტროსადენებში, ჯერ არ ახდა. ამისთვის პოლიანილინი საკმაოდ სტაბილურია, მაგრამ მისი ელექტრული გამტარობა გაცილებით დაბალია და კუთრი სითბოტევადობა უფრო დაბალია ჩვეულებრივ ლითონებთან შედარებით, ამიტომ შემადგენლობის ნებისმიერმა არაერთგვაროვნებამ შეიძლება გამოიწვიოს ადგილობრივი გადახურება და ასეთი პოლიმერული გამტარის მწყობრიდან გამოსვლა.

გამტარ პოლიმერები გამოიყენება როგორც ქიმიური სენსორები, რაც ეფუძნება მათი თვისებების ცვლილებას ნაერთებთან და იონებთან ურთქმედებისას, რომლებსაც აქვთ

ჟანგვა-აღდგენით აქტივობა.

ამ ტიპის უმარტივესი სენსორია პოლიმერული ფირი, რომელიც მდებარეობს ელექტროდებს შორის, და რომლის წინააღმდეგობა კონტროლდება აქტიური ქიმიური ნაერთის ზემოქმედებით. მაგალითად, პოლიანილინი შექცევადად იცვლის ფერს, გარემოს მჟავიანობის ცვლილების მიხედვით, რაც გამოყენებულია pH მზომის შესაქმნელად.

პოლიანილინზე დაფუძნებულ გაზის სენსორს, კერძოდ, აირადი ამიაკისა და აზოტის დიოქსიდისთვის, აქვს საკმაოდ მაღალი მგრძნობელობა.

პოლიანილინი შეიძლება გამოყენებულ იქნას ანტიკოროზიული დაცვისთვის, ძირითადად ფოლადისა და ალუმინისათვის, ატმოსფერული ჭანგადით ლითონის დაჟანგვის თავიდან აცილების ან შენელების გზით [39-40].

**პოლიანილინით დაფარული პოლიურეთანის ელექტრო გამტარობა მგრძობიარეა**

**მოდებულ წნევაზე 0–100 ნ/მ<sup>2</sup> დიაპაზონში, შესაბამისად, ასეთი მასალა შეიძლება იყოს**

გამოიყენებული როგორც წნევის სენსორი [41].

გარდა აღნიშნულისა, დენის გამტარი პოლიმერები შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც ანტისტატიკური საიზოლაციო დანაფარები [42-43], რაც ზრდის ქსოვილების ცეცხლგამძლეობას [44] და შესაძლებელს ხდის შეიქმნას ბიოთავსებადი მასალები, აკუმულატორები, კონდენსატორები და ა.შ.

პოლიანილინზე დაყრდნობით, მზადდება კომპოზიტები, მაგალითად, შემავსებლად ნიკელის ფერიტის ნანონაწილაკების გამოყენებით [45]; ან მისი მექანიკური და ელექტროგამტარებლობის თვისებებითა გასაუმჯობესებლად სხვადასხვა ქიმიკატების დამატების გზით [46-48].

კომპოზიტი პოლიაკრილონიტრილის 3% წონითი დანამატით და პოლიანილინის 1% წონითი დანამატი და AgNO<sub>3</sub> აჩვენებს ანტიმიკრობულ აქტივობას [49].

პოლიანილინის და რეზინის კომპოზიტები გამოიყენება **ელექტრომაგნიტური ეკრანიებისათვის [50].**

პოლიანილინის/პოლივინილქლორიდის ნარევის გამოყენებისას დამცავ დანაფარად ელექტრო კონტაქტებისთვის - მცირდება **ფრეტინგ-კოროზია** (ინგლ. [fretting corrosion](#)) და ელექტრო კონტაქტების ცვეთა [51].

**მაგნიტორეოლოგიური და ელექტრორეოლოგიური სითხეები - მაგნიტურ ან ელექტრულ ველში, მკვეთრად ზრდის სიბლანტეს.**

ტიპური მაგნიტორეოლოგიური სითხე არის მაგნიტური მიკრონაწილაკების, სითხის (ზეთი, წყალი ან გლიკოლი) სუსპენზია, სადაც დაბინძურების საწინააღმდეგო დანამატების გამოლექვა გამორიცხულია. მაგნიტური ველის არარსებობის შემთხვევაში, სითხის ნაწილაკები ნაწილდება შემთხვევით და როდესაც მოხდება ველის მოდება, ისინი ჯაჭვების სახით განლაგდებიან ველის ძალწირების გასწვრივ, რაც მკვეთრად ზრდის სიბლანტეს ველის პერპენდიკულარული მიმართულებით. მაგნიტური ველის მოხსნის შემდეგ, სითხის გაზრდილი სიბლანტე ქრება.

მრავალი ნაშრომი ეძღვნება **მაგნიტორეოლოგიური სითხეების შესწავლას:**

მოდელირება [52], ზედაპირის ხაოიანობის გავლენის შესწავლა ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედებებზე [53], გარედან მოქმედი წნევის ეფექტი ამგვარ სითხეების თვისებებზე [54], დაბერების ტესტები [55], ორივე, მაგნიტურ(რკინა) და არამაგნიტურ ნაწილაკების (პოლიმეთილმეთარიალატი) შემცველი მრავალკომპონენტური სითხეების სტაბილურობის შესწავლა [56] და სხვა.

**ელექტროლოგიური სითხე** არის ნაწილაკების ხსნარი არაგამტარ სითხეში. სიბლანტის გაზრდის პრინციპი იგივეა, რაც მაგნიტოლოგიური სითხეებისთვის.

ელექტრული ველის გავლენის ქვეშ შემავსებლის ნაწილაკები იძენენ სხვადასხვა პოლარობის ზედაპირულ მუხტებს, რაც მათ აიძულებს ჯაჭვებად განლაგებას სავსე მალწირების გასწვრივ.

ელექტროლოგიური სითხეების თვისებებზე გავლენას ახდენს ელექტრული ველის სიმძლიერე, ტემპერატურა, წანაცვლების სიჩქარე [57], ნაწილაკების ზედაპირის ფართობი [58] და შემავსებლის ტიპი [59].

ელასტიური კომპოზიტი, რომელიც დამზადდა რკინის კარბონილის წვრილდისპერსული ფხვნილის გამოყენებით, დაფარული იყო პოლიმერული დიელექტრიკული გარსით და სილიკონის ელასტომერით, ავლენს ელექტრო და მაგნიტოლოგიურ თვისებებს [60].

მაგნიტო- და ელექტროლოგიურ სითხეებს იყენებენ ვიზრაციის კონტროლისთვის მათი სწრაფი რეაგირების დროის გამო მაგნიტური/ელექტრული ველის მოდებისას და მათი სიხისტისა და დემფირებადი(ვიზრაციული) თვისებების შექცევადი ცვლილების გამო [61].

**ელექტროქრომული მასალები** იცვლიან ოპტიკურ თვისებებს ელექტრული ზემოქმედების ქვეშ. ზოგიერთი არაორგანული ნაერთი, განსაკუთრებით პოლივალენტური ლითონის ოქსიდები, ფერს იცვლიან, რაც დამოკიდებულია მათი კათიონების ჟანგვის ხარისხზე. ეს თვისება იწვევს **ელექტროქრომიზმს**, რომელიც შექცევადია. ასეთი ჟანგვა-აღდგენითი რეაქციები ინდუცირებულია დაბალი ელექტრული ძაბვით (დაახლოებით  $\pm 1$  ვოლტი, მუდმივი დენის).

**ზოგიერთ პოლიმერს ასევე აქვს ელექტროქრომული თვისებები**, მაგალითად, **კარბაზოლის** შემცველი პოლიმერები [62]. პოლიანილინისა და პოლიაკრილის მჟავის კომპოზიტური ფირები იცვლის ფერს ყვითელიდან მეწამულამდე [63].

ელექტროქრომული მოწყობილობა არის მრავალშრიანი კონსტრუქცია, რომელის ერთ-ერთ ფენას აქვს ელექტროქრომული თვისებები. ეს მოწყობილობა მუშაობს გალვანური უჯრედის პრინციპით. ყველაზე ცნობილი ელექტროქრომული მასალაა ვოლფრამის ტრიოქსიდი ( $WO_3$ ), რომელიც აღდგენისას ქმნის მკვეთრ ცისფერ ტუტეს.

როგორც წესი, დაბალი ძაბვის ელექტროქრომული მოწყობილობები ფერის ცვალებადი კათოდით დამუხტვისას ფერადდება და გამორთვისას უფერულდება.



ამჟამად, ელექტროქრომული მოწყობილობების ძირითადი გამოყენებაა "ჭკვიანი ფანჯრები", ე.ი. ელექტრონულად მართვადი ფანჯრები, რომლებიც შეიძლება გახდეს გამჭვირვალე ან დაჩრდილული და რეგულირდება მზის შუქის რაოდენობის მიხედვით

დღის დროისა და სეზონის შესაბამისად. ჭკვიანი ფანჯრები ამცირებს შენობებში ენერჯის მოხმარებას და ქმნის კომფორტული ატმოსფერო შიდა სივრცეში [64-65].

"ჭკვიან" ჰიდროგელებს შეუძლიათ გაჯირჯვდნენ (გადიდნენ საწყის ზომებთან შედარებით 1000-ჯერ). ჰიდროგელებს აქვთ ბადისებრი, "შეკერილი" სტრუქტურა და შედგებიან ჰიდროფილური ჰომო- ან კოპოლიმერებისგან.

ჰიდროგელების „შეშუპება“ ხდება გარემოში ცვლილებების საპასუხოდ. ჰიდროგელებს შეუძლიათ შეცვალონ „შეშუპების“ ხარისხი pH-ის, ტემპერატურის, სითხის ტიპის, ელექტრომაგნიტური ველის ცვლილებით.

ჰიდროგელების გამოყენება მედიცინაში ძალზე აქტუალურია, მაგალითად, როგორც ბიოთავსებადი მასალების [65]. წამლების მიწოდების სისტემებისთვის [66] ან სამედიცინო ინსტრუმენტების ბაქტერიციდული დანაფარებისათვის [67].

ახლად შემუშავებული ჰიდროგელი იქცევა როგორც ხელოვნური კუნთი, იკუმშება ერთი მიმართულებით და ფართოვდება მეორე მიმართულებით, წყლის შთანთქმის ან გამოთავისუფლების გარეშე [68].

ჰიდროგელის რამდენიმე ფენიანი კომპოზიტები [69], სადაც თითოეულ ფენას აქვს განსხვავებული მგრძობელობა, შესაძლებელს ხდის მათ საფუძველზე შეიქმნას ახალი ტიპის სენსორები, მემბრანები [70] და ა.შ.

### **"ჭკვიან" მასალებს ასევე განეკუთვნებიან:**

- მაგნიტოსტრექციული და ელექტროსტრექციული მასალები, რომლებიც ფორმას იცვლიან მაგნიტურ ან ელექტრულ ველში;
- პიეზოელექტრიკები წარმოქმნის ელექტროენერჯიას მექანიკური დატვირთვის დროს;
- ფოტომექანიკური მასალები იცვლის ფორმას სინათლის ზემოქმედებისას;
- პიროელექტრიკები წარმოქმნიან ელექტროენერჯიას ტემპერატურის ცვლილებისას.

„ჭკვიან“ მასალებთან ერთად, რომელთა იდეებსაც, თავად ბუნება გვაწვდის, აქტიურად ვითარდება და შეისწავლება ეგრეთ წოდებული „მეტამასალები“, რომელთა თვისებებს ბუნებაში ანალოგი არ გააჩნიათ. მაგალითად, ამ კლასის მასალების წარმომადგენელია მასალა - „უხილავი“, რომელიც უხილავს ხდის იმას, რაც მის უკან დგას. ამ ტიპის მეტამასალები შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც იზოლატორები არასასურველი ეფექტების წინააღმდეგ, როგორცაა ვიბრაცია ან აკუსტიკური ტალღები [71].

ბოლო დროს წარმოჩინდა ახალი მიმართულება - მეტამასალების გამოყენება ნივთიერებების დაყოფისათვის, მათი გამოყოფისათვის ნარევიდან არაქიმიური მეთოდებით [72].

„ჭკვიანი“ მასალები უკვე ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე მსოფლიოში. ელექტროქრომული მასალების მაგალითია თხევადი კრისტალური დისპლეები და პიეზოელექტრული მასალების საფუძველზე მუშავდება ტანსაცმლის ელექტრონიკა, რომლის მუშაობა/ფუნქციონირება ინიცირდება ადამიანის მოძრაობით.

საავტომობილო საღებავს შეუძლია მისი ნაკაწრების „მოშუშება“, სპეციალური მასალები რეაგირებენ გარემოში მავნე ნივთიერებების არსებობაზე ფერის ცვლით [72-73] და ავეჯი თვითონ იკვებება [74-77] ადამიანის ჩარევის გარეშე.

თუ „ჭკვიანი“ მასალების ზედაპირები არ არის დაბინძურებული, ლითონის ნაწილები დეფორმაციის შემდეგ უბრუნდება პირვანდელ ფორმას, ხოლო "ჭკვიან" ფანჯრებს შეუძლიათ შეცვალონ კონდიციონერი, რადგან ისინი მეტ-ნაკლებ შუქს უშვებენ ოთახში, თავად რეაგირებენ გარე ტემპერატურაზე და ყოველივე ზემოთაღნიშნული დღეისათვის უკვე რეალობაა.

ამრიგად, ჩვენ დღეს უკვე შევსწარით გადასვლას მასალების თვისებებით (ეს თვისებები განისაზღვრება მხოლოდ მათი სტრუქტურით) განპირობებული გამოყენებიდან, მასალათა სფეროს უმაღლესი პილოტაჟის "ჭკვიანი", მრავალფუნქციური, მასალების თვისებებით რომაა განპირობებული და რომლებიც რეაგირებენ გარე ზემოქმედების ფაქტორებზე (აქ უნდა გავავლოთ პარალელი თვითორგანიზებად საზოგადოებებსა და ქვეყნებზე), რომლებსაც შეუძლიათ გააუმჯობესონ მრავალი სახის პროდუქტი და ხელი შეუწყონ პროდუქციის ახალი სახეობების შექმნას.

### გამოყენებული ლიტერატურა

1. Encyclopedia of smart materials/ [redactor Mel Schwartz]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2002; 1193 p.
2. Kessler M. Self-healing: a new paradigm in materials design // Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering. 2007. Vol. 221. P. 479-495.
3. Saavedra Flores E., Friswell M., Xia Y. Variable stiffness biological and bio-inspired materials // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2013. Vol. 24. №5. P. 529-540.
4. Han B. et al. Smart concretes and structures: A review // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26. №11. P. 1303-1345.
5. Huang H., Ye G. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca<sup>2+</sup> ions in the healing agent // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26. №3. P. 309-320.

6. Snoeck D. et al. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol 25. №1. P. 13–24.
7. Shinya N., Kyono J., Laha K. Self-healing Effect of Boron Nitride Precipitation on Creep Cavitation in Austenitic Stainless Steel // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2006. Vol. 17. P. 1127-1133.
8. Bor T. et al. Modeling of Stress Development During Thermal Damage Healing in Fiber-reinforced Composite Materials Containing Embedded Shape Memory Alloy Wires // *Journal of Composite Materials*. 2010. Vol. 44. № 22. P. 2547-2572.
9. M. Nosonovsky, P.K. Rohatgi. *Biomimetics in material science*. Springer, 2012. 415 p.
10. Olugebefola S. et al. Polymer Microvascular Network Composites // *Journal of Composite Materials*. 2010. Vol. 44. № 22. P. 2587-2603.
11. Fehrman B., Korde U. Targeted delivery of acoustic energy for self-healing // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2013. Vol. 24. № 15. P. 1865-1887.
12. Soroushian P., Nassar R., Balachandra A. Piezo-driven self-healing by electrochemical phenomena // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2013. Vol. 24(4). P. 441–453.
13. Atay H., Celik E. Multifunctional polymer composites: Antibacterial, flame retardant, radar absorbing and self-healing // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49. № 20. P. 2469–2482.
14. Williams H., Trask R., Bond I. A probabilistic approach for design and certification of self-healing advanced composite structures // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O: J. Risk and Reliability*. 2011. Vol. 225. P. 435-449.
15. Brancart J. et al. Atomic force microscopy-based study of self-healing coatings based on reversible polymer network systems // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol 25. №1. P. 40–46.
16. Phillips D., Baur J. A Granular Core for Self-healing, Variable Modulus Sandwich Composites // *Journal of Composite Materials*. 2010. Vol. 44. № 22. P. 2527-2545.
17. Haase T., Rohr I., Thoma K. Dynamic temperature measurements on a thermally activated self-healing ionomer // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol 25. № 1. P. 25–30.
18. Chen S. et al. Preparation of novel polytetrafluoroethylene/copper-matrix self-lubricating composite materials // *Journal of Composite Materials*. 2014. Vol. 48. № 13. P. 1561–1574.
19. Wang H. et al. Tribological performances on porous polyphenylene sulfide self-lubricating composites with super wear resistance // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2014. Vol 27. №1. P. 82–92.
20. Srikant R.R., Ramana V., Vamsi Krishna P. Development and performance evaluation of self-lubricating drill tools // *Journal of Engineering Tribology*. 2015. Vol. 229. № 12. P. 1479–1490.

21. Suiyuan C. et al. Synthesis of New Cu-based Self-lubricating Composites with Great Mechanical Properties // *Journal of Composite Materials*. 2011. Vol. 45. № 1. P. 51-63.
22. Suiyuan C. et al. Effect of BN fraction on the mechanical and tribological properties of Cu alloy/BN self-lubricating sleeves // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49. №30. P. 3715–3725.
23. Singh S. et al. Microstructural analysis and tribological behavior of aluminum alloy reinforced with hybrid alumina/nano graphite particles // *Journal of Engineering Tribology*. 2015. Vol. 229. № 5. P. 597–608.
24. M. Nosonovsky, P.K. Rohatgi. *Biomimetics in material science*. Springer, 2012. 415 p.
25. Kong L. B., Cheung C. F., To S. Design, fabrication and characterization of threedimensional patterned microstructured surfaces with self-cleaning properties from hydrophilic materials // *Journal of Engineering Manufacture*. 2012. V. 226. №9. P. 1536– 1549.
26. Vorobyev A., Guo C. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 117. № 3. DOI: 10.1063/1.4905616.
27. Scarratt L. et al. Durable Superhydrophobic Surfaces via Spontaneous Wrinkling of Teflon AF // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. DOI: 10.1021/acsami.5b12165.
28. Ibrahim N., Refaie R., Ahmed A. Novel Approach for Attaining Cotton Fabric with MultiFunctional Properties // *Journal of Industrial Textiles*. 2010. Vol. 40. № 1. P. 65-83.
29. Sundaresan K. et al. Influence of nano titanium dioxide finish, prepared by sol-gel technique, on the ultraviolet protection, antimicrobial, and self-cleaning characteristics of cotton fabrics // *Journal of Industrial Textiles*. 2012. Vol. 41. № 3. P. 259-277.
30. Qi K., Wang X., Xin J. H. Photocatalytic self-cleaning textiles based on nanocrystalline titanium dioxide // *Textile Research Journal*. 2011. Vol. 81. № 1. P. 101-110.
31. Lee H. J., Kim J., Park C. H. Fabrication of self-cleaning textiles by TiO<sub>2</sub>-carbon nanotube treatment // *Textile Research Journal*. 2014. Vol 84. № 3. P. 267–278.
32. Ashraf M. et al. Study the multi self-cleaning characteristics of ZnO nanorods functionalized polyester fabric // *Journal of Industrial Textiles*. 2014. DOI: 10.1177/1528083714562086.
33. Ashraf M. et al. Photocatalytic solution discoloration and self-cleaning by polyester fabric functionalized with ZnO nanorods // *Journal of Industrial Textiles*. 2015. Vol. 44. № 6. P. 884–898.
34. Ranogajec J. et al. Protection of Cultural Heritage Objects with Multifunctional Advanced Materials // *Progress in Cultural Heritage Preservation – EUROMED*. 2012. P.255-258.
35. Goffredo G. B. et al. TiO<sub>2</sub> nanocoatings for architectural heritage: Self-cleaning treatments on historical stone surfaces // *Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2014. Vol. 228. № 1 P. 2–10.
36. Hadnadjev M. et al. Design of self-cleaning TiO<sub>2</sub> coating on clay roofing tiles // *Philosophical Magazine*. 2010. V. 90. № 22. P. 2989-3002.
37. Yanılmaz M., Sarac A. S. A review: effect of conductive polymers on the conductivities of electrospun mats // *Textile Research Journal*. 2014. Vol. 84. № 12. P. 1325–1342.



38. <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/special-materials/200-provodyashie-polymeri>
39. Ates M., Kalender O. Comparison of anticorrosion behavior of polyaniline and poly(3,4-methylenedioxyaniline) and their titanium dioxide nanocomposites //High-Performance Polymers. 2015. Vol. 27. № 6. P. 685–693.
40. Tiitu M. et al. Aminic epoxy resin hardeners as reactive solvents for conjugated polymers: polyaniline base/epoxy composites for anticorrosion coatings //Polymer. 2005. V. 46. P. 6855–6861.
41. Muthukumar N., Thilagavathi G., Kannaian T. Polyaniline-coated polyurethane foam for pressure sensor applications //High-Performance Polymers. 2015. DOI: 10.1177/0954008315583703.
42. Hoghoghifard S., Mokhtari H., Dehghani S. Improving the conductivity of polyaniline coated polyester textile by optimizing the synthesis conditions // Journal of industries textiles. 2015. DOI: 10.1177/1528083715594981.
43. Muthukumar N., Thilagavathi G., Kannaian T. Polyaniline-coated nylon lycra fabrics for strain sensor and electromagnetic interference shielding applications //High-Performance Polymers. 2015. Vol. 27. № 1. P. 105–111.
44. Yu J. et al. Flame retardancy and conductive properties of polyester fabrics coated with polyaniline // Textile Research Journal. 2015. DOI: 10.1177/0040517515606360.
45. Prasanna G.D. Synthesis and characterization of magnetic and conductive nickel ferrite– polyaniline nanocomposites // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. № 21. P. 2649–2657.
46. Kumar V. et al. Mechanical and electrical properties of PANI-based conductive thermosetting composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2015. Vol. 34. № 16. P. 1298–1305.
47. Kizildag N. et al. Polyacrylonitrile/polyaniline composite nano/microfiber webs produced by different dopants and solvents // Journal of Industrial Textiles. 2015. DOI: 10.1177/1528083715598654.
48. Kizildag N. et al. Polyacrylonitrile/polyaniline composite nanofiber webs with electrostatic discharge properties // Journal of Composite Materials. 2016. DOI: 10.1177/0021998316630583.
49. Eren O. et al. Synergistic effect of polyaniline, nanosilver, and carbon nanotube mixtures on the structure and properties of polyacrylonitrile composite nanofiber // Journal of Composite Materials. 2015. DOI: 10.1177/0021998315601891.
50. Al-Ghamdi A.A. et al. On the prospects of conducting polyaniline/natural rubber composites for electromagnetic shielding effectiveness applications // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2014. Vol. 27. № 6. P. 765–782.
51. Lam Y.-Z., Swingler J., McBride J. W. The Contact Resistance Force Relationship of an Intrinsically Conducting Polymer Interface // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2006. Vol. 29. № 2. P. 294-302.

52. Ghaffari A., Hashemabadi S. H., Ashtiani M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 8. P. 881–904.
53. Vereda F., de Vicente J., Hidalgo-Alvarez R. Effect of surface roughness on the magnetic interaction between micron-sized ferromagnetic particles: Finite element method calculations // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016. doi: 10.1177/1045389X15624793.
54. Spaggiari A., Dragoni E. Enhanced properties of magnetorheological fluids: Effect of pressure // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 14. P. 1764–1775.
55. Guth D., Maas J. Long-term stable magnetorheological fluid brake for application in wind turbines // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016. DOI: 10.1177/1045389X15624794.
56. Iglesias G. R. et al. Stability behavior of composite magnetorheological fluids by an induction method // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 14. P. 1836–1843.
57. Freyer H. et al. Scale effects of the rheological properties of electrorheological suspensions // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 14. P. 1856–1860.
58. Ma L., Zheng F., Zhao X. Sedimentation behavior of hierarchical porous TiO<sub>2</sub> microspheres electrorheological fluids // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 14. P. 1936–1944.
59. Korobko E. V. et al. Time stability studies of the electrorheological response of dispersions with different types of charge carriers // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 14. P. 1782–1788.
60. Borin D., Stepanov G. Elastomer with magneto- and electrorheological properties // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. № 14. P. 1893–1898.
61. Eshaghi M., Sedaghati R., Rakheja S. Dynamic characteristics and control of magnetorheological/electrorheological sandwich structures: A state-of-the-art review // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. doi: 10.1177/1045389X15620041.
62. Vacareanu L., Catargiu A.-M., Grigoras M. Spectroelectrochemical characterization of isomeric conjugated polymers containing 2,7- and 3,6-carbazole linked by vinylene and ethynylene segments // *High-Performance Polymers*. 2015. Vol. 27. № 4. P. 476–485.
63. Xu N. et al. A facile process for the preparation of polyaniline/polyacrylic acid composite electrochromism films // *High-Performance Polymers*. 2011. Vol. 23. № 7. P. 489–493.
64. Mardaljevic J., Waskett R. K., Painter B. Neutral daylight illumination with variable transmission glass: Theory and validation // *Lighting Res. Technol*. 2015. Vol. 0. P. 1–19. DOI: 10.1177/1477153515620339.
65. Wang M. et al. Binary Solvent Colloids of Thermosensitive Poly(N-isopropyl acrylamide) Microgel for Smart Windows // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. V. 53. № 48. P. 18462–18472. DOI: 10.1021/ie502828b.

66. Nonoyama T., Gong J. P. Double-network hydrogel and its potential biomedical application: A review // *Journal of Engineering in Medicine*. 2015. Vol. 229. № 12. P. 853–863.
67. Zhang D. et al. Electroactive hybrid hydrogel: Toward a smart coating for neural electrodes // *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 2015. Vol. 30. № 6. P. 600–616.
68. M. Jaiswal, V. Koul. Assessment of multicomponent hydrogel scaffolds of poly(acrylic acid2-hydroxy ethyl methacrylate)/gelatin for tissue engineering applications // *Journal of Biomaterials Applications*. 2013. V. 27. № 7. P. 848–861.
69. Cometa S. et al. Analytical characterization and antimicrobial properties of novel copper nanoparticle-loaded electro synthesized hydrogel coatings // *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 2013. V. 28. № 5. P. 508–522. DOI: 10.1177/0883911513498960.
70. Kim Y. S. et al. Thermo-responsive actuation enabled by permittivity switching in an electrostatically anisotropic hydrogel // *Nature Materials*. 2015. V.14. P. 1002–1007. DOI: 10.1038/nmat4363.
71. Sobczyk M., Wallmersperger T. Modeling and simulation of the electrochemical behavior of chemically stimulated polyelectrolyte hydrogel layer composites // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. DOI: 10.1177/1045389X15606997.
72. Reynolds M., Daley S. Enhancing the band gap of an active metamaterial // *Journal of Vibration and Control*. 2015, DOI: 10.1177/1077546315600330.
73. P. F. Pai. Metamaterial-based Broadband Elastic Wave Absorber // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2010. Vol. 21. P. 517-528.
74. Restrepo-Flórez J. M., Maldovan M. Mass Separation by Metamaterials // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. DOI: 10.1038/srep21971.
75. Weis J., Swager T. Thiophene-Fused Tropones as Chemical Warfare Agent-Responsive Building Blocks // *ACS Macro Lett*. 2015. V. 4. №1. P. 138–142.
76. Ackerman E. 4-D Printing Turns Carbon Fiber, Wood Into Shapeshifting Programmable Materials // *IEEE Spectrum*. 2014. URL: <http://spectrum.ieee.org/techtalk/computing/hardware/4d-printing-turns-carbon-fiber-wood-into-shapeshiftingprogrammable-materials>.
77. Correa D. et al. 3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations // *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2015. Vol. 2. № 3. P. 106-116. DOI: 10.1089/3dp.2015.0022.

# For technological aspects of "smart" materials

**Mamuka Matsaberidze<sup>1</sup>, Inga Janelidze<sup>2</sup>**

Professor, Faculty of Chemical Technology and Metallurgy of Georgian Technical University

Association Professor, Faculty of Chemical Technology and Metallurgy of Georgian Technical University

---

## **Abstract**

Article about the mechanisms for obtaining effects self-healing of initial properties or any characteristics in various artificially created materials, such as polymers, ceramics, metals, composite materials, etc. The chemical and physical processes that cause the effects of self-healing are briefly considered, as well as examples and experimental prototypes of self-healing materials are given.

**Keywords:** self-healing, polymers, ceramics, types of cement concretes, metals, new composite materials.