

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕЦИФИКИ ЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИН В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И. В. Ушаков¹, А. Ю. Батомункуев²

Кафедра «Электроснабжение, электротехника и информационное обеспечение энергетических систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); ushakoviv@mail.ru; кафедра физики, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва (2)

Ключевые слова и фразы: аморфно-нанокристаллические металлические сплавы; залечивание трещин; компьютерное моделирование; пластичность; прочность.

Аннотация: Методом компьютерного моделирования исследован процесс залечивания трещин в тонких лентах аморфно-нанокристаллического металлического сплава. Залечивание инициировали воздействием наносекундных импульсов лазерного излучения с высокой плотностью мощности. Установлено, что высокую вероятность залечивания имеют трещины с малым углом раскрытия, в вершине которых возможно формирование высоких механических напряжений. Показано, что при лазерной обработке в первую очередь залечиваются наиболее опасные трещины. В целях верификации результатов компьютерного моделирования проведена серия экспериментов. Экспериментальные исследования показали возрастание пластических свойств материала после лазерной обработки. В ряде случаев возможно одновременное увеличение микротвердости и пластичности. Таким образом, экспериментальные данные косвенно подтверждают выводы, сделанные на основе компьютерного моделирования.

Введение

В настоящее время достаточно хорошо изучены магнитные свойства многих аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. К сожалению, получить комплекс необходимых эксплуатационных свойств магнитомягких аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов удастся далеко не всегда. При термообработке, улучшающей магнитные свойства аморфного металла, возможно резкое снижение его пластичности. В результате вероятно разрушение материала, что может привести к неисправности соответствующей аппаратуры.

Можно выделить ряд технических решений, направленных на устранение данной проблемы. В некоторых случаях возможно измельчение аморфно-нанокристаллического металлического сплава до состояния мелкодисперсионного порошка. Затем порошок добавляется в полимерный материал, который использует-

ся в качестве формы детали. Следует отметить, что при этом появляется вероятность определенного нежелательного изменения ряда эксплуатационных характеристик, например, магнитных. Кроме того, возникает проблема, связанная с необходимостью учета комплекса эксплуатационных свойств полимерного материала.

Таким образом, проблема формирования заданных эксплуатационных свойств аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов требует новых подходов, одним из которых является метод селективной лазерной обработки, позволяющий управлять механическими свойствами материала, не изменяя или почти не изменяя его магнитные свойства и структурное состояние.

В результате воздействия наносекундного лазерного импульса с высокой плотностью мощности на тонкую ленту аморфно-нанокристаллического металлического сплава активируется ряд сложных процессов, особенность протекания которых обусловлена как спецификой самого материала, так и характеристиками лазерного излучения и формирующейся лазерной плазмы [1, 2]. Комплекс механических свойств материала определяется его структурой и состоянием дефектов. Установлено, что за счет залечивания микротрещин и пор вероятно повышение пластичности материала при сохранении высокой микротвердости [3, 4].

Несмотря на развитие экспериментальной техники, невозможно прямое экспериментальное изучение явления залечивания трещин в аморфно-нанокристаллических металлических сплавах, стимулированное наносекундным лазерным импульсом. Возможны только косвенное экспериментальное исследование, исследование методами компьютерного моделирования и др. Следует отметить, что удачная компьютерная модель может быть построена с существенными упрощениями, а часть результатов – проверена экспериментально.

Целью данной работы является выявление специфики залечивания трещин в аморфно-нанокристаллическом металлическом сплаве с учетом рельефа их поверхности и угла раскрытия в условиях обработки материала наносекундными лазерными импульсами.

Методика эксперимента

Исследования проводили на аморфном металлическом сплаве $\text{Co}_{71,66}\text{V}_{4,73}\text{Fe}_{3,38}\text{Cr}_{3,14}\text{Si}_{17,09}$ (Ашинский металлургический завод). Для перевода материала в аморфно-нанокристаллическое состояние образцы подвергали отжигу в печи при $T_{\text{отж}} = 858$ К. Отожженные образцы наносили на полимерную подложку с металлическим основанием. В качестве полимерной подложки использовали полиэфирную шпатлевку со стекловолокном. Микротвердость подложки $\approx 3,6 \times 10^8$ Па. Подложка обладает необходимой пластичностью, чтобы не разрушаться при надавливании пирамидкой Вickersа и восстанавливаться до исходной формы после снятия нагрузки.

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-2. Исследуемые образцы, согласно данным рентгеноструктурного анализа, имеют аморфно-нанокристаллическую структуру.

В эксперименте использовали оптический квантовый генератор ELS-01 (Lotis III). Технические характеристики: длина волны $\lambda = 1064$ нм, энергия импульса излучения 50...100 мДж, $\tau \approx 15...20$ нс, диаметр пятна на поверхности непрозрачных материалов 50...500 мкм. Выбранные области образцов подвергали облучению серией импульсов (5 – 15) с частотой 1...50 Гц. Определение механических свойств осуществляли методом микроиндентирования с помощью пирамидки Вickersа.

Инденитрование обработанных образцов проводили на оси симметрии полосы лазерной обработки (в центре округлой области). Затем на фиксированных расстояниях $s_1, s_2, s_3, \dots, 850$ мкм, для каждой точки, проводили в общей сложности 100 испытаний. При этом на каждом расстоянии выполняли отдельное испытание, в свою очередь соответствующее отдельной лазернообработанной/исходной области. Использовали пять образцов, а на каждом из которых обрабатывали 20 областей.

Данная методика использовалась в целях устранения возможного влияния первого нагружения (механические напряжения, деформации, разрушения) на последующие. Аналогично проводили инденитрование и на округлом участке с оплавленной поверхностью. Подробнее методика эксперимента приведена в [5].

Компьютерное моделирование. Экспериментальные результаты. Обсуждение

Одна из причин одновременного возрастания микротвердости и пластичности аморфно-нанокристаллического сплава, подвергнутого импульсной лазерной обработке, связана с залечиванием трещин. Трещина рассматривается как зародыш разрушения. Вершина трещины может являться концентратором механических напряжений. Очевидно, что релаксация механических напряжений в вершине трещин, а также полное или частичное их залечивание будет способствовать повышению механической прочности образца.

В случае воздействия серии лазерных импульсов поверхность материала прогревается, а одновременное воздействие шокового давления $\approx 10^{10}$ Па вызывает сжатие материала и стимулирует залечивание (полное или частичное) части трещин.

В настоящее время установлено, что поры и трещины в аморфно-нанокристаллических материалах имеют специфику, отличающую их от трещин в кристаллических материалах [6]. Методами компьютерного моделирования показано, что в том случае, если образец обрабатывали серией из 10 лазерных импульсов с частотой 25 Гц, материал нагревался, а к началу десятого импульса температура образца (на границе с подложкой) составляла ≈ 350 К [5]. Поверхность трещины в аморфно-нанокристаллическом материале может иметь сложный рельеф, а вершины трещин – различные углы раскрытия.

С использованием компьютерного моделирования оценим вероятность залечивания трещины в зависимости от угла раскрытия при вершине и особенностей рельефа поверхностей. Выделим ключевые положения компьютерной модели. Пусть особенности рельефа поверхности трещины будут определяться случайным образом (генератор случайных/псевдослучайных чисел). В качестве критерия залечивания трещины (или возможности залечивания) примем сближение берегов трещины до их контакта. Под действием высокого давления прогретые поверхности трещины (расположенные параллельно поверхности образца) сближаются. Поверхность трещины в наноструктурном материале может иметь сложный рельеф. Как следствие, для сближения поверхностей трещины, необходимо совершить работу на пластическое деформирование/выдавливание материала из неоднородностей рельефа поверхностей трещины.

Для моделирования залечивания трещин разработана специальная программа [7], модернизированную версию которой и использовали в данной работе. Программа основана на следующем алгоритме.

1. Вводим произвольный угол раскрытия трещины.
2. Задаем две матрицы точек, моделирующие две поверхности трещины. Размер матрицы можно варьировать, по умолчанию это 1000×1000 . То есть

за поверхности трещины принимаем два квадрата размером 1000×1000 . Учитывая, что размер межатомного расстояния составляет примерно 2 \AA ($0,2 \text{ нм}$), получаем, что матрица точек 1000×1000 , может соответствовать трещине с размером $\approx 200 \times 200 \text{ нм}$. То есть для случая аморфно-нанокристаллических металлических сплавов данный размер трещины согласуется с реальными размерами трещин.

3. Генератор случайных/псевдослучайных чисел задает: 1) количество неоднородностей рельефа на первой $N_{\max 1}$ и второй $N_{\max 2}$ поверхностях трещины; 2) координаты центров локальных неоднородностей рельефа на первой и второй поверхностях трещины $plx1(i)$, $ply1(i)$, $plx2(i)$, $ply2(i)$; 3) площадь каждой неоднородности, занимаемой на поверхности трещины (проекция на поверхность трещины).

4. Выполняем подсчет площади, занимаемой неоднородностями на поверхности трещины (сумма проекций неоднородностей на поверхность трещины),

$$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_{\max 1}} S_i + \sum_{i=1}^{N_{\max 2}} S_i, \quad (1)$$

где $N_{\max 1}$ и $N_{\max 2}$ – количество неоднородностей рельефа на первой и второй поверхностях трещины; S_i – площадь поверхности i -й неоднородности.

5. Определяем общее количество неоднородностей на поверхности трещины

$$N_{\text{но}} = \min(N_{\max 1}, N_{\text{ms}1}) + \min(N_{\max 2}, N_{\text{ms}2}), \quad (2)$$

где $N_{\text{ms}1}$ и $N_{\text{ms}2}$ – количество неоднородностей рельефа на первой и второй поверхностях трещины, которые получают при уточнении количества неоднородностей из условия, что суммарная площадь неоднородностей не должна превышать площадь поверхности трещины.

6. Генератором случайных/псевдослучайных чисел определяем характер неоднородности (выпуклый или вогнутый участок): $V > 0$; $V < 0$. Далее необходимо вычислить объем материала, который должен подвергнуться значительной пластической деформации в случае смыкания поверхностей трещины.

Для этого необходимо определить высоту неоднородностей h_i . Очевидно, что максимальная высота неоднородности определяется близостью к вершине трещины. Следовательно, допустимая высота каждой неоднородности должна быть определена генератором случайных/псевдослучайных чисел, причем высота может меняться от нуля до биссектрисы угла раскрытия трещины. Вычисляем объем материала, который будет вытеснен при залечивании трещины,

$$V_{\text{sum}} \leq \sum_{i=1}^{N_n} S_i h_i k, \quad (3)$$

где k – коэффициент, связанный с формой неоднородности.

Очевидно, что энергия, необходимая для залечивания трещины, зависит от объема неоднородностей, подвергающихся значительной деформации при сближении поверхностей трещин. В первом приближении можно принять, что требуемая для залечивания трещины энергия пропорциональна объему материала неоднородностей. На основании данных, полученных при проведении компьютерного моделирования, построен график вероятности залечивания трещины в зависимости от угла при вершине трещины. Проведено две серии модельных экспериментов с разными начальными условиями. Вероятность залечивания трещин равна $0,5$.

Исследованы два случая: для угла раскрытия равного 6° и 17° . Каждой точке, приведенной на рис. 1, соответствует 1000 модельных экспериментов.

На основании полученных результатов можно сделать заключение, что трещины с малым углом раскрытия при вершине залечиваются полностью. В то же время трещины с большим углом раскрытия практически не залечиваются. При этом вероятность их залечивания остается отличной от нуля.

Результаты исследований позволяют сделать ряд косвенных выводов. В частности, при воздействии на тонкую пленку шокового давления, рельеф поверхности трещины может меняться. В этом случае, воздействие на образец серии лазерных импульсов способствует повышению вероятности залечивания трещин. В настоящее время широко используются как наноструктурные, так и наномодифицированные материалы [8]. Полученные результаты демонстрируют возможности управления механическими свойствами различных наноструктурных материалов.

Результаты моделирования могут быть верифицированы экспериментальными исследованиями механических свойств лазернообработанных участков аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Выявлять механические свойства локальных лазернообработанных участков тонких лент аморфно-нанокристаллических металлических сплавов возможно с использованием специально разработанного метода механических испытаний [9].

Приведенная на рис. 2 зависимость демонстрирует плавное снижение пластических свойств материала по мере удаления от оси симметрии. Материал становится значительно пластичнее внутри зоны оплавления. Значения микротвердости в указанной части образца меняются незначительно. По мере удаления от центра лазернообработанной области резко снижается величина пластической характеристики материала ϵ'' . Качественным свидетельством снижения пластичности является формирование разрушения с образованием большого числа трещин при индентировании данной области.

Таким образом, в результате облучения лазерным импульсом происходит преимущественное воздействие на дефектные области, залечивание трещин. Возможно значительное повышение величины пластической характеристики материала ϵ'' при сохранении (незначительном изменении) высокой микротвердости.

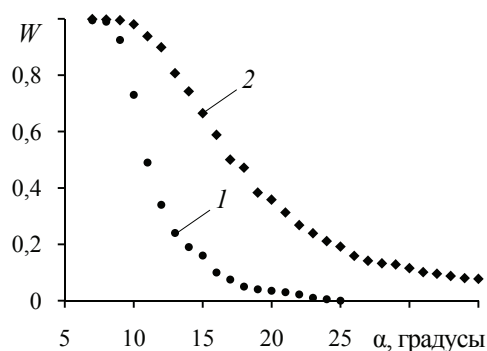


Рис. 1. Зависимость вероятности залечивания трещин W от угла их раскрытия α :
1 – 6° ; 2 – 17°
(при проведении компьютерного моделирования принимали, что вероятность залечивания трещин равна 0,5)

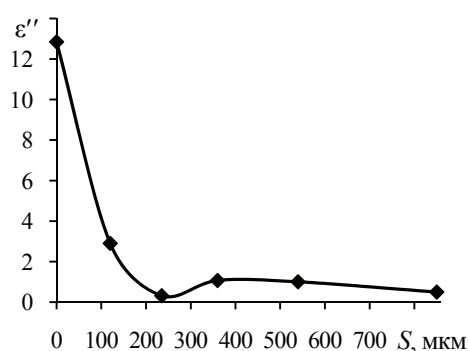


Рис. 2. Изменение коэффициента пластичности материала ϵ'' при увеличении расстояния до центра зоны обработки (перед лазерной обработкой образец подвергнут отжигу при 858 К)

Установлено, что эффективность залечивания резко возрастает с ростом температуры. В работе [10] показано, что повышение температуры всего на 65 К (с 300 до 365 К) активизировало процессы залечивания микротрещин примерно в 4 раза. После воздействия серии лазерных импульсов отмечается одновременное повышение микротвердости и пластичности ϵ'' [4, 5], что возможно в материале, в котором частично залечены поры и трещины. Вероятно также, что эффективность залечивания будет выше при воздействии серии лазерных импульсов, так как при этом материал успевает прогреться.

Выводы

1. Одна из причин одновременного возрастания микротвердости и пластичности аморфно-нанокристаллического сплава после лазерной обработки связана с залечиванием трещин под действием лазерных импульсов. Релаксация механических напряжений в вершине трещин, полное или частичное их залечивание будет способствовать повышению механической прочности материала.

2. Вероятность залечивания выше для трещин с малым углом раскрытия. Это особенно важно, так как в вершине таких трещин возможно формирование высоких механических напряжений. То есть преимущественно залечиваются наиболее опасные трещины.

3. При обработке консолидированного наноструктурного материала вероятность залечивания трещин резко снижается при увеличении угла их раскрытия. Однако вероятность залечивания трещин должна возрастать при обработке материала серией лазерных импульсов. Это связано как с возможной эволюцией рельефа поверхностей трещин, особенно вблизи вершины, так и с некоторым прогревом материала, активизирующим процессы залечивания.

Список литературы

1. Леонтьев, П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, М. Г. Хан, Н. Т. Чекалова. – М. : Металлургия, 1986. – 142 с.
2. Садовский, В. Д. Лазерный нагрев и структура стали / В. Д. Садовский [и др.]. – Свердловск : УрО АН СССР, 1989. – 100 с.
3. Бетехтин, В. И. Врожденная субмикропористость и кристаллизация аморфных сплавов / В. И. Бетехтин, А. Г. Кадомцев, О. В. Толочко // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43, № 10. – С. 1815 – 1820.
4. Ушаков, И. В. Механические характеристики тонкой ленты многокомпонентного аморфно-нанокристаллического металлического сплава, обработанного серией наносекундных лазерных импульсов / И. В. Ушаков, И. С. Сафронов // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 6 – 9.
5. Сафронов, И. С. Выявление механизмов формирования механических свойств тонкой ленты металлического сплава при импульсной лазерной обработке : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Сафронов Иван Сергеевич. – Великий Новгород, 2013. – 190 с.
6. Гуткин, М. Ю. Дислокационно-дисклинационные модели миграции границ зерен в сверхтонких нанокристаллических пленках / М. Ю. Гуткин, Н. К. Дынкин // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 54, № 4. – С. 750 – 758.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610797. Компьютерное моделирование неоднородностей рельефа поверхностей трещин в наноструктурном материале «COMP_SIM_RELIEF_SURFACE_

CRACKS» / Ушаков И. В., Сафронов И. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Моск. гос. гор. университет». – № 2013660756, заявл. 23.09.2013 ; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 17.01.2014 ; опублик. 20.02.2014.

8. Образцов, Д. В. Исследование прочностных и теплофизических свойств наномодифицированных строительных и теплозащитных материалов / Д. В. Образцов, В. М. Фокин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 1051 – 1061.

9. Патент 2494039 Российская Федерация, МКП G 01 N 3/42, В 82 Y 32/00. Способ определения коэффициента пластичности тонких пленок из многокомпонентных аморфно-нанокристаллических металлических сплавов / Ушаков И. В., Сафронов И. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Моск. гос. гор. университет». – № 2012116406/28 ; заявлено 24.04.2012 ; опублик. 27.09.2013, Бюл. № 27. – 6 с.

10. Плужникова, Т. Н. Самозалечивание микротрещин в ионных кристаллах и его стимулирование воздействием электромагнитного излучения видимого и рентгеновского диапазонов длин волн : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Плужникова Татьяна Николаевна. – Белгород, 2000. – 141 с.

Computer Simulation of Cracks Healing in Nanocrystalline Alloy after Nanosecond Laser Impulse Treatment

I. V. Ushakov¹, A. Yu. Batomunkuev²

*Department “Power Supply, Electrical Engineering
and Information Support of Energy Systems”, TSTU (1); ushakoviv@mail.ru;
Department of Physics, National University of Science
and Technology “MISIS”, Moscow (2)*

Key words and phrases: amorphous nanocrystalline alloys; computer simulation; crack healing; plasticity; strength.

Abstract: The phenomenon of crack healing in thin bands of amorphous nanocrystalline metallic alloy was studied by the method of computer simulation. The process of healing was initiated by nanosecond high powerful laser impulses. The material was exposed to high shock stress and heating. In such a condition crack healing can occur. The probability of crack healing depends on the crack size, its geometry and other factors. Special computer program was used for simulation. We established that cracks with little opening angle are characterized by high probability of healing. It is important that in tips of such cracks high mechanical stress may take place. It was shown that under laser treatment the most dangerous cracks were healed at first. As a result the strength of material increased.

A series of experiments was made to verify the data of computer simulation. We established that plasticity of material increases after laser treatment. We also detected simultaneous growth of plasticity and micro-hardness in some cases. Such method of laser treatment can be used to increase the mechanical strength of thin nanocrystalline materials. We can conclude that experimental results indirectly confirm the computer simulation data.

References

1. Leont'ev P.A., Khan M.G., Chekalova N.T. *Lazernaya poverkhnostnaya obrabotka metallov i splavov* (Laser surface treatment of metals and alloys), Moscow: Metallurgiya, 1986, 142 p.
2. Sadovskii V.D., Schastlivtsev V.M., Tabachnikova T.I., Yakovleva I.L. *Lazernyi nagrev i struktura stali* (Laser heating and steel structure), Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1989, 100 p.
3. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Tolochko O.V. *Physics of the Solid State*. 2001, vol. 43, no. 10, pp. 1892-1897.
4. Ushakov I.V., Safronov I.S. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2012, no. 10, pp. 6-9.
5. Safronov I.S. *PhD dissertation (Physical and Mathematical Sciences)*, Velikii Novgorod, 2013, 190 p.
6. Gutkin M.Y., Dynkin N.K. *Physics of the Solid State*, 2012. vol. 54, no. 4, pp. 798-807.
7. Ushakov I.V., Safronov I.S., Moscow State Mining University, *Kompyuternoe modelirovanie neodnorodnosti rel'efa poverkhnosti treshchin v nanostrukturnom materiale "COMP_SIM_RELIEF_SURFACE_CRACKS"* (Computer modeling of irregularities of a surface relief cracks in nanostructured materials "COMP_SIM_RELIEF_SURFACE_CRACKS"), Moscow, RU, 2014, Certificate of state registration of computer programs no. 2014610797.
8. Obratsov D.V., Fokin V.M. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1051-1061.
9. Ushakov I.V., Safronov I.S., Moscow State Mining University, *Sposob opredeleniya koeffitsienta plastichnosti tonkikh plenok iz mnogokomponentnykh amorfno-nanokristallicheskih metallicheskih splavov* (Method of determining plastic characteristics of films of multicomponent amorphous-nanocrystalline metal alloys), Moscow, RU, 2013, Pat. 2494039.
10. Pluzhnikova T.N. *PhD dissertation (Physical and Mathematical Sciences)*, Belgorod, 2000, 141 p.

Computermodellierung der Besonderheit des Heilens der Risse in der nanokristallischen metallischen Legierung unter der Handlung der Nanosekundenlaserimpulse

Zusammenfassung: Von der Methode der Computermodellierung ist der Prozess des Heilens der Risse in den feinen Banden der amorph-nanokristallischen metallischen Legierung untersucht. Das Heilen wurde von der Einwirkung der Nanosekundenimpulse der Laserausstrahlung mit der hohen Dichte der Kapazität aktiviert. Es ist festgestellt, dass die hohe Wahrscheinlichkeit des Heilens die Risse mit dem kleinen Winkel des Öffnens haben, in deren Gipfel die Bildung der hohen mechanischen Anstrengungen möglich ist. Es ist vorgeführt, dass bei der Laserbearbeitung die gefährlichsten Risse in erster Linie geheilt werden. Zwecks der Verifizierung der Ergebnisse der Computermodellierung war eine Serie der Experimente durchgeführt. Die experimentalen Forschungen haben das Anwachsen der plastischen Eigenschaften des Materials nach der Laserbearbeitung vorgeführt. In einer Reihe von den Fällen ist die gleichzeitige Vergrößerung der Mikrofestigkeit und der Plastizität möglich. So bestätigen die experimentalen Daten indirekt die Schlussfolgerungen, die aufgrund der Computermodellierung gemacht sind.

Modélage informatique de la spécificité du traitement des fissures dans un alliage métallique nanocristallique sous l'action des impulsions lasers de nanosecondes

Résumé: Par la méthode du modélage informatique est étudié le processus du traitement des fissures dans les bandes fines d'un alliage métallique nanocristallique amorphe. Le traitement est initié par une action des impulsions lasers de nanosecondes avec une haute densité de la capacité. Est établi que les fissures avec un petit angle de l'ouverture ont une grande probabilité du traitement. Pour la vérification des résultats du modélage informatique est réalisée une série des expériences. Ces derniers ont montré l'augmentation des propriétés plastiques du matériel après le traitement laser. Ainsi ont été affirmées les conclusions faites à la base du modélage informatique.

Авторы: *Ушаков Иван Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение, электротехника и информационное обеспечение энергетических систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Батомункуев Амагалан Юрьевич* – аспирант кафедры физики, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Рецензент: *Шибков Александр Анатольевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов.
