

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ ДИССИПАЦИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ
В ДЕФЕКТНЫХ ПРОВОДНИКАХ.
Часть 2**

**В. М. Иванов¹, А. В. Лановая², А. В. Кобелев¹,
Ж. А. Зарандия¹, Е. О. Федосова¹**

*Кафедра «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов (1);
кафедра «Математика и информатика», ЧОУ ВО «Московский университет
имени С. Ю. Витте» (2), г. Москва, Россия; IVM-tstu@mail.ru*

Ключевые слова: внутреннее остаточное напряжение; микротвердость; разрушение; тепловыделение; трансформаторная сталь; чувствительность радиуса отверстия.

Аннотация: Экспериментально изучена диссипация электромеханической энергии в локальных дефектных зонах проводника под током. Показано, что химические и радиационные процессы в этих зонах существенно влияют на рабочее состояние трансформаторной стали и увеличивают потери энергии в магнитопроводе.

Доказано, что высокие давления и ударные волны способны изменять физические константы материала, такие как электропроводность, теплопроводность, температуру фазовых переходов, плотность, магнитную проницаемость [1 – 3]. Кроме того, ударная волна вызывает рентгеновское излучение, акустический и электрический сигналы. Результаты исследований проводников в таких условиях показывают, что возможны фазовые превращения, полиморфные переходы, а также другие изменения макро- и микроструктуры, связанные с процессом упрочнения, зарождения, торможения и залечивания дефектов [4 – 7].

Анализ напряженного состояния в зоне термического влияния (ЗТВ) показал, что в зависимости от параметров поля можно добиться целенаправленного и однозначного управления темпом разрушения как в сторону его ускорения, так и замедления вплоть до полной остановки растущей трещины. Причем в последнем случае процесс автокаталитичен: небольшое уменьшение скорости роста трещины приводит к большему тепловыделению в ее вершине, а следовательно, к прогрессирующему затуплению, заканчивающемуся в конце концов полным прекращением разрушения.

Следует отметить, что разделение энергетического воздействия электромагнитного поля (ЭМП) на проводник и диссипация электромагнитной (ЭМ) энергии в ЗТВ чисто условна. В действительности, при различных условиях эксплуатации проводников в электрических сетях наблюдаются редкие случаи преимуществен-

ной работы каждого из механизмов. В основном проводники испытывают и тепловые воздействия, и электродинамические усилия. Поэтому ЗТВ характерна не только измененной структурой, но и искаженной геометрией дефекта (рис. 1).

Поскольку все физические процессы описываются уравнением Лапласа, в том числе диффузия и массоперенос, можно предположить изменение концентрации примесей и легирующих элементов в ЗТВ. Действительно, в трансформаторной стали непосредственно к краю кратера примыкала деформированная область, в которой наблюдались сильно измельченные зерна микротвердостью (420 ± 50) МПа и размером 2...5 мкм против 5 мм в исходном состоянии.

Величина микротвердости в удалении от края кратера понижалась и на расстоянии $\sim 3R$ (R – средний в поперечном размере радиус образовавшегося отверстия, зависящий от параметров ЭМП) достигала исходной, равной 200 МПа. Экспериментально обнаружено, что при фиксированной длительности импульса величина микротвердости и размер ЗТВ изменяются пропорционально плотности тока. Укорачивание длительности импульса приводит к уменьшению R , а следовательно, и размеров ЗТВ без существенного уменьшения степени упрочнения в ней.

Для выяснения природы локального упрочнения применен метод рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра ДРОН-2 с радиационной регистрацией интенсивности. Сканирующий пучок ограничивался двумя взаимно перпендикулярными щелями, площадь пятна которого была $\sim 0,6 \text{ мм}^2$, что позволяло производить съемку малых участков в ЗТВ. Образец закреплялся в специальном координатном устройстве на базе столика от микроскопа МБИ-11 и имел возможность передвигаться с помощью микрометрических винтов с шагом 0,25 мм. Во всех случаях использовалась рентгеновская трубка с железным анодом. Действительно, содержание кремния в трансформаторной стали при ее обработке импульсами тока в ЗТВ неравномерное (рис. 2), а микротвердость и структура в данной области резко отличаются от полигона. Особенностью поведения α -фазы, легированной кремнием, является возникновение на расстоянии 2...3 мм от кромки кратера гетерогенных структур, наличие которых было обнаружено появлением дополнительных дифракционных максимумов на линиях интенсивности α -фазы (см. рис. 2), расположенных в непосредственной близости от брэгговских углов основной матрицы. Очевидно, это связано с образованием соединения FeSi, рентгеновская линия которого $(210)\alpha$ находится рядом с кривой интенсивности линии $(110)\alpha$ матричного твердого раствора. Данные участки характеризуются также смещением дифракционных рефлексов в сторону больших углов скольжения, что свидетельствует об увеличении параметра решетки и изменении концентрации α твердого раствора, влияющих на значительное деформационное упрочнение ЗТВ. Предложенные экспериментальные результаты свидетельствуют о диссипации ЭМ энергии в дефектной зоне проводника отчасти в энергию химическую. Причем, сам процесс диссипации волновой, о чем свидетельствует распределение максимумов интенсивности линии $(210)\alpha$ химического соединения FeSi в ЗТВ (см. рис. 2).

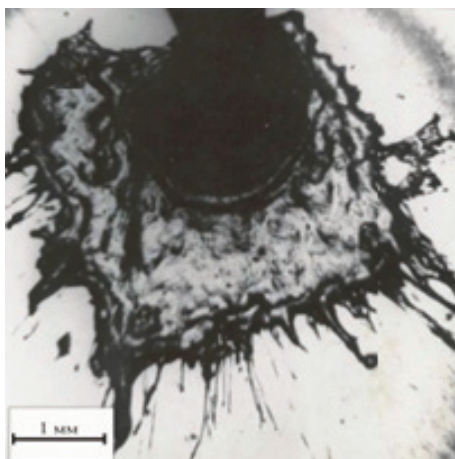


Рис. 1. Образование кратера в вершине острого дефекта зоны термического влияния (трансформаторная сталь)

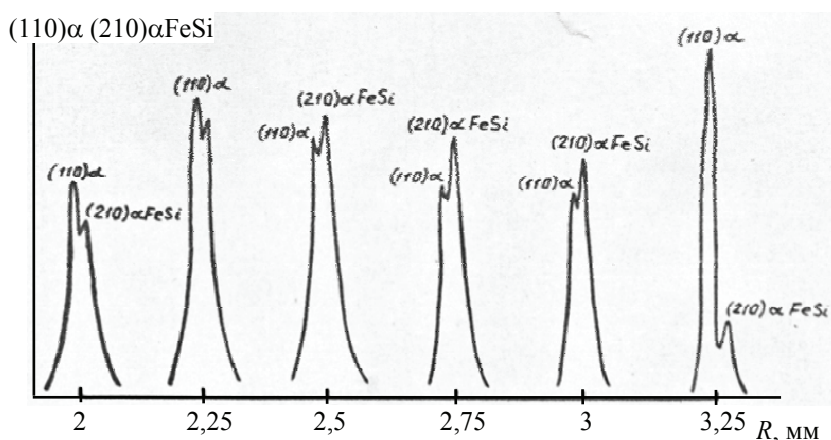


Рис. 2. Кривые интенсивности α -фазы, легированной кремнием, в зоне термического влияния (трансформаторная сталь)

Скоростная фоторегистрация процессов разрушения проводника в ЭМП подтверждает интенсивное излучение как в видимой, так и инфракрасной и рентгеновской областях спектра [8].

Следует отметить, что приведенные результаты связаны с традиционными критериями разрушения механики деформируемого твердого тела: энергией зарождения трещины и вязкостью разрушения. Последняя характеристика определена критическим коэффициентом интенсивности напряжений, который зависит от геометрии дефекта и служит мерой опасности его развития. Само по себе затупление вершины острого надреза должно приводить к снижению концентрации напряжений и увеличению несущей способности пластины. Проведены механические испытания на разрывной машине Instron 5565. В экспериментах испытывались пластины из трансформаторной стали размерами $80 \times 30 \times 0,5$ мм³, на которых имелся сквозной поперечный надрез, длиной 10 мм с радиусом в вершине 0,1 мм, выполненный на электроискровом станке. Образцы перед механическими испытаниями обрабатывались импульсами тока в направлении, перпендикулярном к надрезу, амплитуда и длительность которого соответствовали параметрам ЭМП для образования в вершине надреза кратера. Испытания проводились с высокой скоростью деформации 50 мм/мин, чтобы максимально приблизиться к хрупкому разрушению, и при разрыве образцов площадки текучести почти не наблюдалось.

Первый этап заключался в выяснении чувствительности радиуса отверстия, полученного механическим путем, к работе зарождения трещины. Изготовлена серия образцов с надрезами одинаковой длины, в вершинах которых засверливались отверстия разных радиусов. Во втором случае пластины с той же длиной дефекта обрабатывались в ЭМП. Результаты испытаний, представленные на рис. 3, показывают монотонное увеличение работы зарождения трещины с ростом до $R = 0,4$ мм.

Работа, затрачиваемая на проталкивание зародившейся трещины, мало зависит от способа ее получения. В пластинах с отверстиями в конце надреза радиусом до $R = 0,4$ мм, полученным воздействием ЭМП и сверлением, она в пределах разброса экспериментальных данных ($\pm 10\%$) одинакова. Следовательно, в данных режимах охрупчивающее действие ЭМП, обусловленное фазовыми превращениями, происходящими в ЗТВ, и внутренними остаточными напряжениями, компенсирует снижение концентрации напряжений. Трещина зарождается в ЗТВ

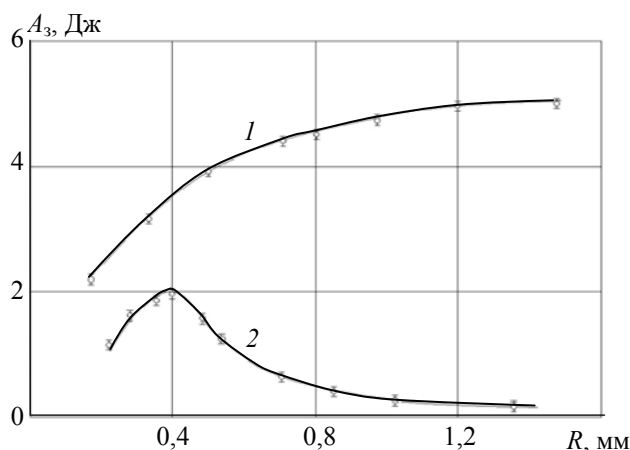


Рис. 3. Работа зарождения трещины A_3 :
 1 – отверстия в вершине надреза выполнены сверлением;
 2 – отверстия в вершине надреза получены обработкой в ЭМП

задолго до наступления предела текучести образца и может считаться вполне хрупкой.

Предложен новый способ проведения механических испытаний, нуждающихся в образцах с трещинами (как, например, в экспериментах по измерению критического коэффициента интенсивности напряжений или ударной вязкости). Образцы с надрезом, выполненным режущим или другим инструментом, подвергали обработке в ЭМП в целях локального охрупчивания материала в вершине надреза. Затем в испытательной машине его нагружали напряжениями ниже предела текучести, но достаточными для образования макротрещин в ЗТВ. Усталостные трещины, которые обычно вводят для проведения подобных испытаний, менее остры и, что более существенно, для их создания требуется гораздо больше времени.

Следует отметить, что при значении радиуса закругления в вершине дефекта больше 0,4 мм происходит снижение полной работы разрушения (рис. 4).

Это объясняется образованием кратера больших размеров ($R > 0,4$ мм) и обширной ЗТВ вокруг него. Причем, в кольцевой области, примыкающей к кромке кратера, успевают проходить структурные превращения с образованием мелкодисперсных гетерогенных структур, обладающих еще большей микротвердостью, чем в исходном состоянии, а остаточные напряжения способствуют зарождению в данной области микротрещин, что и приводит к ослаблению пластин из трансформаторной стали.

Таким образом, воздействие ЭМ энергии на дефектную зону в проводнике связано с различной степенью диссипации, а критические ее значения – с различными механизмами разрушения, приводящими к потере устойчивости проводников в процессе эксплуатации и влияющими на техническое состояние электрических сетей в целом.

Список литературы

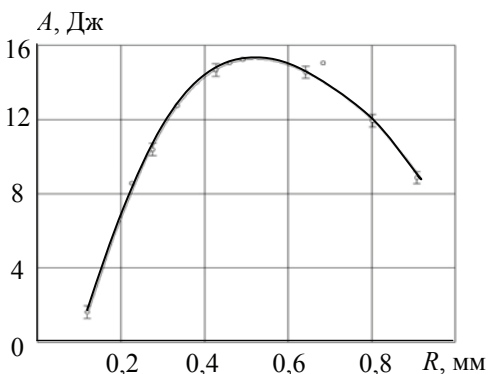


Рис. 4. Зависимость полной работы разрушения A от радиуса при вершине надреза R , полученного с помощью ЭМП (трансформаторная сталь)

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Криштал, М. А. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера / М. А. Криштал, А. А. Жуков, А. Н. Кокора. – М. : Metallurgiya, 1973. – 192 с.
3. Миркин, Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазера / Л. И. Миркин. – М. : МГУ, 1975. – 383 с.
4. Райнхарт, Дж. С. Поведение металлов при импульсивных нагрузках / пер. с англ. / Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. – М. : Изд-во иностр. лит., 1958. – 296 с.
5. Черепанов, Г. П. О точечном взрыве в идеально хрупком теле / Г. П. Черепанов // Прикладная механика и теоретическая физика. – 1969. – № 4. – С. 145 – 148.
6. Дубовицкая, Н. В. Исследование структурных изменений в монокристаллах ванадия под действием единичного электроимпульсного разряда / Н. В. Дубовицкая, С. М. Захаров, Л. Н. Ларионов // Физика и химия обработки материалов. – 1978. – № 6. – С. 121 – 123.
7. Клыпин, А. А. Структура и свойства сплавов при воздействии электрического поля / А. А. Клыпин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1979. – № 3. – С. 12 – 15.
8. Механизмы электромагнитного разрушения элементов электрооборудования и электроники / А. В. Лановая [и др.] // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2009. – № 9(23). – С. 144 – 151.

Energy Channels of Electromagnetic Energy Dissipation in Flawed Conductors. Part 2

V. M. Ivanov¹, A. V. Lanovaya², A. V. Kobelev¹,
Zh. A. Zarandiya¹, E. O. Fedosova¹

*Department "Electrical Power Engineering", TSTU (1), Tambov, Russia;
Department "Mathematics and Informatics", Witte Moscow University (2), Moscow,
Russia; IVM-tstu@mail.ru*

Keywords: destruction; heat release; internal residual stress; microhardness; sensitivity of the hole radius; transformer steel.

Abstract: The dissipation of electromechanical energy in local defective zones of a conductor under current is experimentally studied. It is shown that the chemical and radiation processes in these zones significantly affect the operating state of the transformer steel and increase the energy losses in the magnetic circuit.

References

1. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov* [Laser and electron beam processing of materials], Moscow: Mashinostroenie, 1985, 496 p. (In Russ.)
2. Krishtal M.A., Zhukov A.A., Kokora A.N. *Struktura i svoistva splavov, obrabotannykh izlucheniem lazera* [Structure and properties of alloys treated with laser radiation], Moscow: Metallurgiya, 1973, 192 p. (In Russ.)
3. Mirkin L.I. *Fizicheskie osnovy obrabotki materialov luchami lazera* [Physical basis of material processing by laser beams], Moscow: MGU, 1975, 383 p. (In Russ.)

4. Rainkharth Dzh.S., Pirson Dzh. *Povedenie metallov pri impul'sivnykh nagruzkakh* [The behavior of metals with impulsive loads], Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1958, 296 p. (In Russ.)

5. Cherepanov G.P. [On a point explosion in an ideally fragile body], *Prikladnaya mekhanika i teoreticheskaya fizika* [Applied mechanics and theoretical physics], 1969, no. 4, pp. 145-148. (In Russ.)

6. Dubovitskaya N.V., Zakharov S.M., Larikov L.N. [Investigation of structural changes in single crystals of vanadium under the action of a single electroimpulse discharge], *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of material processing], 1978, no. 6, pp. 121-123. (In Russ.)

7. Klypin A.A. [Structure and properties of alloys under the action of an electric field], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 1979, no. 3, pp. 12-15. (In Russ.)

8. Lanovaya A.V., Pluzhnikova T.N., Ivanov V.M., Vinokurov E.B., Lozenkov A.A., Zheltov A.I. [Ways of Electromagnetic Destruction of Energy and Electronics Equipment Elements], *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*, 2009, no. 9(23), pp. 144-151. (In Russ., abstract in Eng.)

Energetische Kanäle der Dissipation der elektromagnetischen Energie in den defekten Leitern. Teil 2

Zusammenfassung: Es ist die Dissipation der elektromechanischen Energie in den lokalen defekten Zonen des Leiters unter dem Strom experimentell erlernt. Es ist gezeigt, dass die Chemie- und Radiationsprozesse in diesen Zonen den Arbeitszustand des Umspannstahls wesentlich beeinflussen und die Verluste der Energie in dem magnetischen Leiter vergrößern.

Canaux énergétiques de la dissipation de l'énergie électromagnétique dans les conducteurs défectueux. 2-ième partie

Résumé: Est étudiée expérimentalement la dissipation électromécanique de l'énergie dans les zones locales défectueuses du conducteur sous le courant électrique. Est montré que les processus chimiques et radiologiques dans ces zones influencent sensiblement sur l'état du fonctionnement de l'acier de transformateur et augmentent les pertes de l'énergie dans le circuit magnétique.

Авторы: *Иванов Владимир Михайлович* – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Лановая Анна Владимировна* – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Математика и информатика», ЧОУ ВО «Московский университет имени С. Ю. Витте», г. Москва, Россия; *Кобелев Александр Викторович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика»; *Зарандия Жанна Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика»; *Федосова Екатерина Олеговна* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Федоров Виктор Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор института математики, естествознания и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.