

## **МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ПОВЕРХНОСТНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН**

*Самохвалова Ж.В.*

*Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара*

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, упрочнение, микроструктура.

**Аннотация.** Рассмотрены технологические возможности обработки конструкционных материалов воздействием импульсных магнитных полей. Показана возможность повышения прочности, износостойкости и снятия остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей рабочих органов машин без их термообработки. С помощью магнитно-импульсного воздействия можно управлять характеристиками поверхностных слоев материала деталей машин в нужном направлении, получать заданный комплекс свойств.

## **MAGNETIC-IMPULSE METHOD OF SURFACE STRENGTHENING TREATMENT OF PARTS WORKING BODIES OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES**

*Samokhvalova Zh. V.*

*Samara State Transport University, Samara*

**Keywords:** machine parts, hardening, pulsed magnetic field.

**Abstract.** The technological possibilities of processing structural materials by the action of pulsed magnetic fields are considered. The possibility of increasing the strength, wear resistance and removing residual stresses in the surface layers of the details of the machine working parts without their heat treatment is shown. With the help of magnetic-pulse action, it is possible to control the characteristics of the surface layers of the material of machine parts in the desired direction, to obtain a given set of properties.

Долговечность работы деталей рабочих органов машин во многом лимитируется их износом. В связи с этим разрабатываются различные возможности управления параметрами поверхностных слоев деталей в процессе их изготовления и ремонта, позволяющие изменять их физико-механические, свойства. Современные методы упрочнения металлов основаны на создании условий для торможения дислокаций, вследствие увеличения их плотности, а также взаимодействия дислокаций с атомами легирующих элементов, а также за счет измельчения блоков и образования дисперсных частиц карбидов, нитридов и т.п.

Снижение затрат на эксплуатацию и ремонт строительного-дорожного техники можно обеспечить повышением износостойкости деталей рабочих органов машин за счет изменения состояния их поверхностного слоя при использовании импульсного энергетического воздействия, которое

сопровождающиеся упрочнением вследствие изменения энергетического запаса поверхностного слоя.

Обработку импульсным магнитным полем высокой напряженности можно применять для упрочнения сварных, соединений, элементов зубчатых и червячных передач, опорных устройств строительного-дорожного машин, муфт, рессор и пружин, а также стальных канатов грузоподъемных машин. Магнитно-импульсная обработка деталей из конструкционных материалов проводится воздействием импульсных магнитных полей напряженностью до  $(2...3)10^7$  А/м, и связанных с этим вихревых импульсных токов плотностью до  $10^8...10^9$  А/м<sup>2</sup>, при длительности импульса менее  $10^{-3}$  с. Такие магнитные поля генерируются при разряде батареи конденсаторов магнитно-импульсной установки на индуктор, располагаемый вблизи поверхности обрабатываемой детали.

Достоинством магнитно-импульсного упрочнения деталей машин, по сравнению с другими методами упрочнения, является неизменность геометрических параметров и качества поверхности упрочняемых изделий. Не требуется проведения дополнительной термообработки и финишных операций. Процесс магнитно-импульсного упрочнения характеризуется низким энергопотреблением при высокой производительности и экологической чистоте.

Факторами, определяющими влияние магнитно-импульсного воздействия на физико-механические и эксплуатационные свойства конструкционных материалов, являются: непосредственно магнитное воздействие (намагничивание, перемагничивание, магнитострикция); вихревой ток, индуцированный переменным магнитным полем; силовое взаимодействие магнитного поля с индуцированным вихревым электрическим током; джоулево тепло; электронно-пластический эффект, который обусловлен движением электронов при их взаимодействии с дислокациями.

Импульсное магнитное поле (ИМП) проникает в материал детали на толщину скин-слоя, зависящую от частоты электромагнитных колебаний и электропроводности материала детали. Поэтому можно обеспечить повышение твердости только поверхностного слоя детали при сохранении высокой вязкости основного материала, без термообработки детали. Это необходимо для повышения ударной стойкости и ресурса работы деталей рабочих органов строительного-дорожной техники. Процессами, которые приводят к упрочнению поверхностных слоев деталей из конструкционных и инструментальных сталей при воздействии магнитного импульса, кроме непосредственно деформаций приводящих к уплотнению структуры поверхностного слоя, являются фазовые превращения аустенит-мартенсит, перемещение примесей и дефектов по границам зерен. У легированных сталей 60С2А, 65Г, 60С2ХФА, 6ХВ2С, 6ХС и 35ХГТ образуется мелкодисперсная структура на поверхности детали глубиной от 50 до 250 мкм, обусловленная образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [1-3]. Этот слой плохо травится, так как имеет повышенную плотность, что позволяет значительно повысить прочностные и износостойкие свойства стальных изделий.

Магнитно-импульсная обработка наиболее целесообразна при наличии внутренних изменений структуры материала детали, которые возникают, например, в процессе эксплуатации машин. Эффект магнитно-импульсного воздействия обусловлен концентрацией магнитного поля и вихревых токов на дефектах структуры. При времени действия импульса магнитного поля не превышающем время адиабатичности, как следствие, возникают градиенты потенциала температуры и термоупругие сжимающие напряжения.

Анализ исследований по влиянию магнитно-импульсной обработки на эксплуатационные свойства конструкционных материалов [4] показал, что при магнитно-импульсном упрочнении, в результате одновременного действия давления импульсного магнитного поля и вихревых токов, возможна локализация или полное устранение дефектов структуры поверхностных слоев материала детали, способствующих появлению зародышевых трещин. Смыкание пор и усталостных трещин зависит от амплитуды импульса давления ИМП, величины переданной в систему удельной энергии и характера нагружения. Установлено, что для деталей из углеродистых сталей, при удельной энергии порядка  $2,5...3,5 \text{ Дж/мм}^3$ , импульс электромагнитного поля и связанный с ним импульс вихревого тока оказывают существенное влияние на повышение механических свойств материалов в поверхностных слоях [4-6].

Импульсное воздействие магнитного поля обеспечивает наиболее высокий уровень характеристик конструкционной прочности для вязкого разрушения деталей машин. Повышается сопротивляемость материала зарождению и распространению трещин. Увеличивается усталостная долговечность материала по отношению к исходному состоянию в 2 раза, а к отожженному состоянию на 30...35%, как на стадии зарождения трещины, так и в период роста до фиксируемого размера [4]. Магнитно-импульсная обработка дает возможность интенсифицировать восстановление механических свойств материалов деталей рабочих органов строительно-дорожных машин после длительного динамического нагружения в процессе эксплуатации. Магнитно-импульсное воздействие позволяет ликвидировать усталостные трещины и полностью восстановить ресурс деталей, работающих при циклическом нагружении, после наработки близкой к разрушению [4]. Это позволяет значительно увеличить или восстановить как многоцикловую, так и малоцикловую стойкость материала деталей в процессе ремонта деталей рабочих органов машин.

В процессе сборки или ремонта машин, магнитно-импульсная обработка также является эффективным методом упрочнения сварных соединений без их механической нагартовки, т.е. упрочнение возможно в конструкциях с малой жесткостью. При воздействии импульсных магнитных полей и токов в результате рекристаллизации происходит локальное изменение структуры как околосшовной зоны, так и самого шва, что приводит к снятию внутренних напряжений в сварном соединении.

Усталостная прочность сварных швов после воздействия ИМП увеличивается на 60...80% в основном за счет «залечивания» зародышевых

трещин. В зоне термического воздействия происходит измельчение зерна приблизительно в два раза и переход растягивающих напряжений в сжимающие, что повышает ресурс работы деталей при циклической нагрузке. Этот эффект обусловлен движением электронов и их взаимодействием с дислокациями, вызывающим снижение сопротивление деформированию и повышение пластичности металлов, а также локальным нагревом материала вихревым током в зоне дефектов структуры. Вводимая при магнитно-импульсной обработке энергия вызывает сдвиговые и диффузионные релаксационные процессы и стимулирует переход системы (конструкционного материала) из неравновесного состояния в более стабильное состояние.

Другим преимуществом высокоэнергетического магнитно-импульсного воздействия является возможность устранения остаточных напряжений в поверхностном слое детали без ее нагрева. Вихревые токи, протекающие в поверхностных слоях материала детали на глубине скин-слоя, нагревают только локальные участки вокруг кристаллитов напряженных блоков, а также у неоднородностей структуры металла, практически без разогрева остальной части материала. При наличии остаточных или усталостных напряжений в материале детали, которые возникают в процессе эксплуатации машины, теплота, индуцированная вихревыми токами при магнитно-импульсном воздействии, частично уменьшает избыток энергии кристаллитов и зерен структуры материала детали, особенно в зоне контакта напряженных участков. Воздействие на металл оказывает высокая локальная тепловая энергия, возникающая при обработке электромагнитным полем, вызывающая диффузионную подвижность легирующих элементов, дислокаций, подвижность отдельных блоков. Все это приводит к снятию внутренних остаточных напряжений, микронапряжений. Эффект магнитно-импульсной обработки, устраняющий деформационное упрочнение, линейно зависит от уровня удельной энергии в импульсе, как при упругом, так и при пластическом деформировании материала детали. Даже после значительной степени использования ресурса пластичности материала детали, в процессе эксплуатации, последующее магнитно-импульсное воздействие приводит к уменьшению величины остаточных напряжений 1-го рода в 3...4 раза и полному снятию остаточных напряжений 2-го рода [4].

Для устранения остаточных напряжений в приповерхностном слое материала детали необходимо воздействие импульсным магнитным полем, с частотой обеспечивающей равенство глубины зоны остаточных напряжений и толщины скин-слоя вихревых токов в изделии [7]:

$$f = (\pi \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot \Delta^2)^{-1},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\gamma$  – электропроводность материала детали,  $\Delta$  – толщина слоя остаточных напряжений.

Такая обработка позволяет снять остаточные напряжения в поверхностном слое материала детали, в том числе тонкостенной, без ее разогрева. Это исключает возможное коробление или поводку деталей.

Установлено, что магнитно-импульсное воздействие приводит к принципиальному изменению структуры поверхностных слоев стальных деталей без изменения чистоты и геометрии этой поверхности. В поверхностных слоях металла образуется структура типа «белого слоя» с высокой микротвердостью и износостойкостью, а также наблюдаются структурные изменения типа сдвига в мартенситных иглах и дробление блоков структуры. Импульсное воздействие импульсного магнитного поля формирует в материале мелкозернистую структуру, определяемую аномальными процессами рекристаллизации. Движущими силами здесь являются локально неоднородные выделения энергии электромагнитного поля на дефектах структуры.

У деталей из ферромагнитных материалов, при магнитно-импульсной обработке, на участках с повышенной магнитной проницаемостью возникают локальные механические напряжения, превосходящие напряжения, достаточные для реализации сдвиговых деформаций, что вызывает образование мелкодисперсной структуры на поверхности детали, вследствие дробления зерен по границам этих участков. Это приводит к дополнительному упрочнению материала.

Магнитно-импульсное воздействие на сталь 110Г13Л, применяемую для изготовления рабочих органов строительно-дорожных машин, благоприятно влияет на структурные изменения: измельчается блочная структура и карбидная фаза, появляются двойники деформации, что существенно повышает износостойкость и трещиностойкость этого материала в поверхностных слоях.

Исходя из конкретно поставленной задачи, в каждом случае есть принципиальная возможность с помощью магнитно-импульсного воздействия управлять характеристиками поверхностных слоев материала деталей машин в нужном направлении, получать новые состояния и заданный комплекс свойств. При оптимальных режимах магнитно-импульсного воздействия в процессе производства и ремонта строительно-дорожных машин можно:

- увеличить износостойкость элементов рабочих органов;
- восстановить прочность в околошовной зоне сварных соединений до прочности основного материала;
- повысить предел выносливости и ресурс на многоцикловую усталость деталей, работающих при длительном динамическом нагружении;
- повысить циклическую долговечность на малоцикловую усталость элементов рабочих органов машин, работающих при больших знакопеременных нагрузках.

При магнитно-импульсной обработке изделий сложного профиля, эффект упрочнения лучше реализуется на участках, имеющих минимальное расстояние до рабочей зоны индуктора, где создается максимальная напряженность поля. При упрочнении деталей сложной формы, для обеспечения однородности характеристик упрочнения по всей поверхности, необходимо применять индуктор, рабочая зона которого эквидистантна поверхности обрабатываемой детали.

### Список литературы

1. Алифанов А.В., Богданович И.А., Малеронок В.В. Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2017. – Вып. 5. – С. 18-24.
2. Попова Ж.А. Особенности изменения физико-механических свойств конструкционных сталей при магнитно-импульсной обработке // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 43-46.
3. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милукова А.М. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса // Перспективные материалы и технологии. – Витебск: ВГТУ, 2017. – Гл. 2. – С. 31-52.
4. Курилкин Б.В., Самохвалов В.Н. Эксплуатационная характеристика легких деформируемых сплавов. – Самара: СамГАПС, 2005. – 86 с.
5. Курлаев Н.В., Гулидов А.И., Рынгач Н.А. Экспериментальные исследования изменения прочностных свойств и структуры материалов при обработке импульсным магнитным полем // Сборник научных трудов НГТУ. – 2004. – №4 (38). – С.75-82.
6. Володин В.Л., Бадина М.И., Володин Т.В. Поверхностное упрочнение металлических материалов импульсными магнитными полями // Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов. – Воронеж, 1994. – С. 29.
7. А.с. № 1759947 СССР. Способ обработки изделий / Самохвалов В.Н., Лебедев Г.М., Цуканов В.Ф., Голиусов Т.А. – Оpubл. 1992, Бюл. № 33.

### References

1. Alifanov A.V., Bogdanovich I.A., Maleronok V.V. Investigation of the effect of magnetic-pulse treatment of the surface layer of steel samples on their physical and mechanical properties // Bulletin of BarSU. Ser. Technical science, 2017, Issue. 5, pp. 18-24.
2. Popova Zh.A. Features of the change in the physical and mechanical properties of structural steels during magnetic-pulse processing // Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Mechanical Engineering, 2012, no. 4, pp. 4346.
3. Alifanov A.V., Tsionenko D.A., Milyukova A.M. Physics of the process of magnetic-pulse hardening of steel products, calculation of inductors and process parameters // Perspective materials and technologies. Vitebsk, Vitebsk State University, 2017. – Ch. 2. – P. 31-52.
4. Kurilkin B.V., Samokhvalov V.N. Performance characteristics of light wrought alloys. – Samara: Samara State Academy of Railway Transport Publ., 2005. – 86 p.
5. Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Rynkach N.A. Experimental studies of changes in strength properties and structure of materials during processing by a pulsed magnetic field // Collection of scientific works of NSTU, 2004. no.4 (38), pp. 75-82.
6. Volodin V.L., Badina M.I., Volodin T.V. Surface hardening of metallic materials by pulsed magnetic fields // Effect of electromagnetic fields on plasticity and strength of materials. – Voronezh, 1994. – P. 29.
7. Inventor's Certificate of the USSR no. 1759947. . Product processing method / Samokhvalov V.N., Lebedev G.M., Tsukanov V.F., Goliusov T.A. – Publ. 1992, Bul. №33.

#### *Сведения об авторах:*

**Самохвалова Жанна Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия, zhanna\_sam@mail.ru

#### *Information about authors:*

**Samokhvalova Zhanna Vladimirovna** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the departments "Ground transportation technology tools", Samara State Transport University, Samara, Russia, zhanna\_sam@mail.ru

*Получена 15.01.2021*