

# Влияние магнитно-импульсной обработки на усталостную прочность конструкционного материала

## Б.В. Бойцов

*д.т.н., профессор, научный руководитель кафедры 104 «Технологическое проектирование и управление качеством» Московского авиационного института (НИУ); Москва*

## Г.Н. Кравченко

*к.т.н., начальник сектора Московского авиационного института (НИУ); Москва*

*e-mail: gnkrav@mail.ru*

## Ю.В. Петухов

*к.т.н., доцент Московского авиационного института (НИУ); Москва*

**Аннотация.** На основе экспериментальных исследований рассмотрено влияние упрочнения магнитно-импульсной обработкой на характеристики сопротивления усталости (в многоциклового области) авиационного конструкционного материала Д16АТ. Установлено, что циклическая долговечность после упрочнения увеличивается в 2...2,5 раза.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка, упрочнение, усталостная прочность, алюминиевый сплав Д16АТ.

Магнитно-импульсная обработка (МИО) достаточно широко распространена в различных отраслях машиностроения и имеет большие перспективы дальнейшего развития и внедрения как высокоэффективный, производительный и универсальный метод технологической обработки деталей и заготовок [1].

Методы МИО применяются для различных видов обработки и формообразования металлов давлением: штамповка, обжим и раздача труб, отбортовка деталей, прошивка и пробивка отверстий и другие. Весьма важным является возможность проводить технологические операции по формообразованию, не осуществляемые другими методами: обработка давлением деталей, заключенных в оболочки из пластмасс или стекла, напрессовка ме-

таллических деталей на хрупкие токопроводящие материалы и пластмассы. Другим высокоэффективным направлением в технологическом применении МИО является улучшение качества материала и, следовательно, повышение эксплуатационных и прочностных свойств деталей: износостойкость, стойкость при повышенных температурах, сопротивление усталости, повышение триботехнических характеристик, коррозионной стойкости и т.п.

Методы МИО позволяют обрабатывать детали из различных сталей, других магнитных материалов, а также титановых, медных и алюминиевых сплавов. В случае необходимости обработки деталей из очень слабо токопроводящих материалов их сверху можно покрывать слоями меди, которые являются, можно сказать, своеобразными катализаторами.

Магнитно-импульсная обработка давлением основывается на использовании электромеханических сил взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в обрабатываемой детали, при пересечении их силовыми магнитными линиями магнитного поля индуктора и самим магнитным потоком. Эти силы являются движущими для обрабатываемой детали и прижимают ее к формообразующему или вырубному штампу. Важно, что при МИО электродинамическая энергия непосредственно преобразуется в механическую, и импульс давления магнитного поля действует непосредственно на заготовку без какой-либо передающей среды. Это позволяет осуществлять обработку как в вакууме, так и в любой среде, не препятствующей распространению магнитного поля.

Магнитно-импульсная обработка для улучшения физико-механических свойств материала детали и заготовки основывается на эффекте локального разогрева металла при взаимодействии наведенных в детали вихревых токов и импульсного магнитного поля индуктора-инструмента. Взаимодействие импульсного магнитного поля с токопроводящими материалами происходит тем интенсивнее, чем выше их структурная и энергетическая неоднородность. Поэтому чем выше концентрация поверхностных и внутренних напряжений в металлических материалах, тем больше вероятность локальной концентрации в них микро-вихрей внешнего поля и тем длительнее происходят релаксационные процессы.



Технология МИО непосредственно сводится к следующему. Деталь помещают в плоскость соленоида со стороны, например, северной полярности таким образом, чтобы центр тяжести детали был удален от положения равновесия в соленоиде. При включении установки МИО деталь втягивается магнитным полем в полость соленоида с некоторым ускорением и совершает внутри полости колебательные движения около положения равновесия. Таким образом, деталь, многократно пересекая магнитно поток, совершает в полости соленоида свободные колебательные перемещения, которые с течением времени уменьшаются и затухают за счет трения детали об индуктор. Когда колебания прекращаются, деталь располагается по центру соленоида-индуктора. Количество колебаний и амплитуда зависят от мощности магнитного поля, массы детали и электромагнитных свойств ее материала. При таких перемещениях в детали возникают вихревые токи, которые создают магнитное поле и локальные микро-вихри, которые в свою очередь нагревают участки вокруг кристаллов напряженных блоков и структурных неоднородностей металла. Градиент теплового потока при МИО тем выше, чем менее однородна микроструктура металла [1].

Высокую эффективность методы МИО показали в упрочнении лезвийного инструмента. Это в основном резцы, сверла, развертки, метчики и плашки, протяжки и прошивки, пилы и др. Стойкость этих инструментов после обработки МИО повышается в 2...2,5 раза. Это дало основание для широкого применения данного метода при упрочнении инструмента в машиностроении.

Упрочнение МИО может осуществляться по следующим технологическим схемам:

- циклическая обработка (от 2 до 10 циклов) с выдержками между циклами – 1–20 мин.;
- обработка с применением ферромагнитных сердечников и локальных концентраторов магнитного поля;
- обработка в металлических контейнерах или камерах с применением феррожидкости.

Технология МИО предусматривает также комбинирование перечисленных выше технологических схем. Практически для всех методов МИО необходима окончательная выдержка заготовок или деталей в течение 5–24 часов на немагнитной подложке. Магнитно-импульсная обработка деталей может выполняться с последующим размагничиванием и без размагничивания. С последующим размагничиванием упрочняют широкий ассортимент инструмента, зубчатые колеса, валы, оси, сварные соединения, собранные узлы и даже целые механизмы. Без размагничивания МИО упрочня-

ют слабомагнитные материалы, детали и заготовки из цветных деталей и сплавов.

Многократную циклическую МИО деталей следует применять при их сложном конструктивном исполнении. В основном это комбинированный инструмент, детали из высокопрочных сталей и сварные металлоконструкции со сложной геометрией, а также узлы с деталями, изготовленными из разнородных материалов. В этом случае число последовательных циклов МИО может составлять до 10 при выдержке между циклами от 10 до 300 секунд, что, естественно, ведет к увеличению оперативного времени обработки.

Крупногабаритные детали, типа турбин, для повышения прочности и износостойкости желательно обрабатывать во вращающемся магнитном поле при вращении самой детали. Обработку с применением ферромагнитных сердечников применяют для упрочнения полых и осесимметричных деталей. При этом форма сердечников определяется конфигурацией и геометрией обрабатываемой детали и может быть круглой, квадратной, прямоугольной и т.д. Кроме того для упрочнения таких деталей и узлов сложной геометрии сердечники и соленоиды могут быть сборно-разъемные [1].

Несмотря на множество публикаций [2, 3], посвященных упрочнению инструмента и деталей из магнитных материалов, количество исследований по повышению эксплуатационных характеристик деталей из цветных металлов и сплавов весьма ограничено. Мало работ по исследованию повышения характеристик сопротивления усталости после МИО деталей из цветных и легких сплавов. В работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований упрочнения МИО на усталостную прочность в малоцикловой области усталости образцов из алюминиевого сплава Д16 с анализом закономерности развития трещин от размеров зерна.

В данной работе проведены исследования влияния упрочнения МИО на характеристики усталости конструкционного алюминиевого сплава Д16АТ в многоцикловой области усталости, характерной для большинства силовых деталей авиационной техники, изготовленных из этого сплава.

Образцы (рис. 1) изготовлены из алюминиевого сплава Д16АТ в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [4], с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 1,05$ . Шероховатость образцов после механической обработки имела следующие значения:

$$R_a = 0,12 \text{ мкм}, R_z = 0,7 \text{ мкм}, R_m = 1,1 \text{ мкм}.$$

Упрочнение образцов МИО проводилось на установке «Импульс-3м», предназначенной для уве-

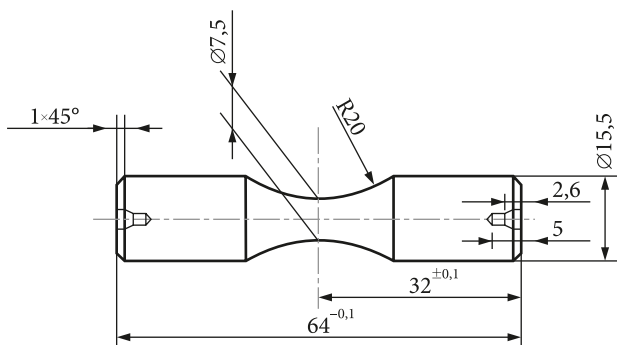


Рис. 1. Образцы для проведения испытаний на многоцикловую усталость

личения стойкости концевой лезвийного режущего инструмента диаметром до 30...70 мм (сверла, метчики, развертки, фрезы, резцы и др.). Особенностью этих установок является свободное перемещение обрабатываемых деталей в соленоиде, применение набора сменных соленоидов с магнитными сердечниками и соленоидов, позволяющих создавать градиент магнитного поля по длине. Установка позволяет проводить МИО небольших деталей, заготовок или изделий несложной конфигурации.

Обработка образцов осуществлялась по следующей схеме:

I партия образцов – обработка МИО повторялась 3 раза при напряженности 500 кА/м, время обработки 0,3–1 с, время между обработками 5 мин;

II партия образцов – обработка МИО повторялась 5 раз при напряженности 500 кА/м, время обработки 0,3–1 с, время между обработками 5 мин;

III партия образцов – обработка МИО повторялась 5 раз при напряженности 1000 кА/м, время обработки 0,3–1 с, время между обработками 5 мин.

Усталостные испытания проводились на электромагнитной установке ЭД-100М [5]. Установка предназначена для испытаний образцов в многоцикловой области усталости. Конструктивно установка выполнена в настольном варианте и состоит из двух основных блоков: механического блока нагружения, в состав которого входят электромагнитный возбудитель, устройство создания асимметрии колебаний и индуктивный датчик измерения деформаций, и электронного блока управления и контроля.

Испытания проводятся при консольном изгибе образца в одной плоскости. Применение лазера для контроля амплитуды напряжения позволило увеличить точность значения задаваемой нагрузки и следить за кинетикой накопления повреждений и развитием микротрещин в образце, фиксировать момент начала образования трещины, оценивать скорость ее развития.

Результаты усталостных испытаний исходных и упрочненных образцов представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из диаграмм на рис. 2 и 3, МИО обработка позволяет, в зависимости от режимов обработки и уровня амплитуды напряжения при усталостных испытаниях ( $\sigma_a = 320$  МПа и  $\sigma_a = 300$  МПа), увеличить долговечность образцов из сплава Д16АТ в 2,1...2,5 раз.

Дополнительно были проведены экспериментальные исследования по влиянию прохождения импульсного тока высокого напряжения через образцы (рис. 1) из сплава Д16АТ. Обработка велась по следующей схеме: батарея конденсаторов заряжалась до напряжения 2 кВ и 4 кВ и затем разряжалась через стандартные образцы. Были обработаны две партии образцов.

I партия образцов – через образцы пропускался один импульс напряжением 4 кВ;

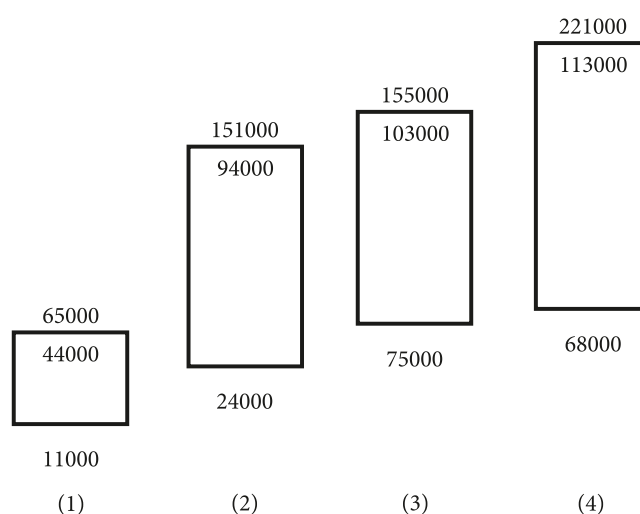


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний образцов из сплава Д16АТ при амплитуде нагрузки  $\sigma_a = 320$  МПа. На диаграмме указаны средние значения циклической долговечности, сверху и снизу максимальное и минимальное значение долговечности. Исходные образцы – (1); образцы, обработанные МИО: (2) – I партия; (3) – II партия; (4) – III партия

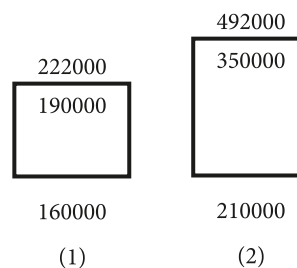


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний образцов из сплава Д16АТ. При амплитуде нагрузки  $\sigma_a = 300$  МПа. Внутри диаграммы указаны средние значения циклической долговечности, сверху и снизу максимальное и минимальное значение долговечности. Исходные образцы – (1); обработанная МИО III партия – (2)



II партия образцов – через образцы пропускали предварительно два импульса напряжением 2 кВ, а затем два импульса напряжением 4 кВ.

Как видно из рис. 4, обработка образцов I и II партий при амплитуде напряжения  $\sigma_a = 320$  МПа привела к увеличению долговечности в 1,9...2,4 раза по сравнению с исходными образцами.

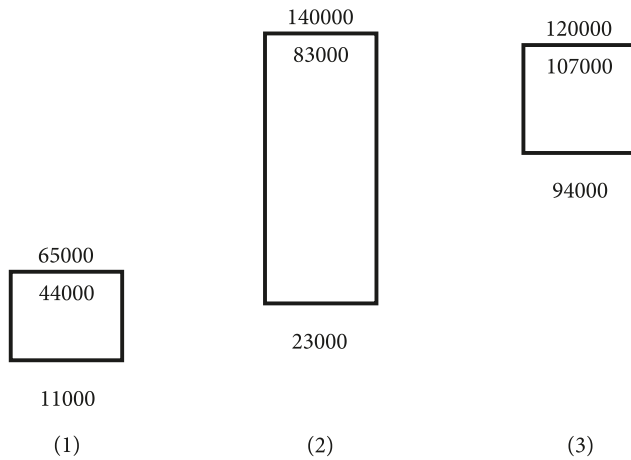


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний образцов из сплава Д16АТ при амплитуде нагрузки с  $\sigma_a = 320$  МПа. На диаграмме указаны среднее значение циклической долговечности, сверху и снизу максимальное и минимальное значение долговечности. Исходные образцы - (1); образцы, через которые пропущено импульсное напряжение (2) - I партия; (3) - II партия

### Выводы

1. Магнитно-импульсная обработка позволяет увеличить долговечность образцов из алюминиевого сплава Д16АТ, в зависимости от выбранных режимов обработки, в 2,1...2,5 раза. Данный метод можно рассматривать как перспективный для упрочнения авиационных деталей из алюминиевых сплавов, работающих в условиях переменного нагружения.

2. Прохождение импульсного тока через образцы из сплава Д16АТ приводит к увеличению их долговечности в 1,9...2,4 раза.

### Литература

1. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1998. – 130 с.
2. Здор Г.Н., Анисович А.Г., Яскович А.Г. Применение импульсного магнитного поля для повышения механических свойств сплавов цветных металлов / Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 5. – С. 121–125.

3. Алифанов А.В., Попова Ж.А., Ционенко Н.М. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле // Литье и металлургия. – 2012. – № 4. – С. 151–155.

4. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

5. Бойцов. Б.В., Иванов А.Л., Егоров Н.А. Установка для программных испытаний при консольном изгибе. – Заводская лаборатория. – 1981. – № 10. – С. 83–85.

### Influence of the Treatment by Magnetic-Pulse on the Resistance's Fatigue of a Constructional Material

**B.V. Boytsov**, doctor of technical sciences, professor, head of the department 104 «Technological design and quality management» of Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow

**G.N. Kravchenko**, candidate of technical sciences, head of sector of Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow

e-mail: gnkrav@mail.ru

**Yu.V. Petukhov**, candidate of technical sciences, assistant professor of Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow

**Summary.** On the basis of pilot studies hardening influence by magnetic-pulse processing on characteristics of resistance of fatigue (in multi-cycle area) the aviation constructional material D16AT is considered. It is established that the cyclic durability after hardening increases by 2–2.5 times.

**Keywords:** magnetic-pulse processing, hardening, fatigue durability, aluminum alloy D16AT.

### References:

1. Maligin B.V. Magnetic hardening of tools and machine parts. *Mashinostroenie*. Moscow, 1998. 130 p.
2. Zdor G.N., Anisovich A.G., Yaskovich A.G. The use of a pulsed magnetic field to enhance the mechanical properties of alloys of non-ferrous metals. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2004, No. 5. pp. 121–125.
3. Alifanov A.V., Popova J.A., Bargu, Tsionenko N.M. The mechanism of hardening of alloyed steels in a pulsed magnetic field. *Casting and metallurgy*. 2012, No. 4. pp. 151–155.
4. State Standard 25.502-79 Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Fatigue test methods.
5. Boytsov B.V., Ivanov A.L., Egorov N.A. Installation for software testing in console bending. *Factory laboratory*. 1981, No. 10. pp. 83–85.