

## МАГНИТОСТРИКЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ И МАГНИТНО-ДИСПЕРСИОННОЕ ТВЕРДЕНИЕ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Кинденко Н. И.

Настоящая работа посвящена исследованию вопросов, связанных с повышением эксплуатационных свойств инструментов из быстрорежущих сталей путем магнитно-импульсной обработки, представляющей собой сочетание электромагнитного и термодинамического способов управления неравновесной структурой вещества. Проведен анализ механизмов магнито-стрикционного упрочнения и магнитно-дисперсионного твердения быстрорежущих сталей в импульсных магнитных полях. Показано, что магнито-стрикционное упрочнение и магнитно-дисперсионное твердение быстрорежущей стали в результате воздействия магнитного поля позволяет объяснить улучшение эксплуатационных характеристик режущего инструмента, подвергнутого импульсной магнитной обработке. Отмечено, что первопричиной улучшения эксплуатационных характеристик инструмента, подвергнутого магнитной обработке, является изменение свойств инструментального материала, которое происходит за счет магнито-стрикционного упрочнения быстрорежущей стали. Установлено, что в результате магнитной обработки быстрорежущая сталь претерпевает объемное упрочнение, дисперсионное твердение, становится более однородной по структуре и улучшает свои физико-механические свойства.

Робота присвячена дослідженню питань, пов'язаних з підвищенням експлуатаційних властивостей інструментів з швидкорізальних сталей шляхом магнітно-імпульсної обробки, що представляє собою поєднання електромагнітного і термодинамічного способів управління не рівноважною структурою речовини. Проведено аналіз механізмів магнітострикційного зміцнення і магнітно-дисперсійного твердіння швидкорізальних сталей в імпульсних магнітних полях. Показано, що магнітострикційне зміцнення і магнітно-дисперсійне твердіння швидкорізальної сталі в наслідок впливу магнітного поля дозволяє пояснити поліпшення експлуатаційних характеристик ріжучого інструменту, що зазнає імпульсної магнітної обробки. Відзначено, що першопричиною поліпшення експлуатаційних характеристик інструменту, що зазнає магнітній обробці, є зміна властивостей інструментального матеріалу, яке відбувається за рахунок магнітострикційного зміцнення швидкорізальної сталі. Встановлено, що в наслідок магнітної обробки швидкорізальна сталь зазнає об'ємне зміцнення, дисперсійне твердіння, стає більш однорідною за структурою і покращує свої фізико-механічні властивості.

The article is devoted to the study of issues related to improving the operational properties of tools from high-speed steels by means of magnetic-pulse processing, which is a combination of electromagnetic and thermodynamic methods for controlling the non-equilibrium structure of substances. The analysis of the mechanisms of magnetostrictive strengthening and magnetic-dispersion hardening of high-speed steels in pulsed magnetic fields is carried out. It is shown that magnetostrictive strengthening and magnetic dispersion hardening of high-speed steel as a result of the influence of a magnetic field makes it possible to explain the improvement in the performance characteristics of a cutting tool subjected to pulsed magnetic processing. It is noted that the primary reason for improving the performance characteristics of the tool subjected to magnetic treatment is the change in properties of the tool material, which is due to magnetostrictive hardening of high-speed steel. It is determined that as a result of magnetic treatment high-speed steel undergoes volume strengthening, dispersion hardening, becomes more homogeneous in structure and improves its physical and mechanical properties.

Кинденко Н. И.

канд. техн. наук, доц. каф. ОПМ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.9.02

**Кинденко Н. И.**

## **МАГНИТОСТРИКЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ И МАГНИТНО-ДИСПЕРСИОННОЕ ТВЕРДЕНИЕ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Одним из основных направлений физической технологии является магнитная обработка материалов. Особое место в магнитной обработке материалов отводится способам улучшения физико-механических свойств быстрорежущих сталей [1].

В целом результат магнитной обработки рассматривается как проявление эффектов последствия в материалах, находящихся на границах стабильности их свойств и подвергнутых воздействию внешнего силового поля [2].

Анализ существующих гипотез о возможности повышения стойкости инструмента из быстрорежущих сталей в результате воздействия магнитного поля показал, что условно можно разделить эти гипотезы на две группы, отличающиеся между собой.

Согласно гипотезам первой группы, обязательным условием повышения стойкости инструмента должно быть присутствие в зоне резания магнитного поля. Вторая группа гипотез не предполагает присутствие магнитного поля, как обязательного фактора, но обработку материалов производят магнитно обработанным инструментом [3].

Однако нет единого, всесторонне подтвержденного, взгляда на причины, вызывающие изменение эксплуатационных свойств режущего инструмента, изготовленного из быстрорежущих сталей, в результате воздействия импульсного магнитного поля.

Целью работы является рассмотрение механизмов магнитострикционного и магнитно-дисперсионного твердения быстрорежущих сталей в импульсных магнитных полях, основываясь на некоторых известных представлениях.

Быстрорежущая сталь, как любое твёрдое тело, обладает внутренним упругим полем, обусловленным реальной дислокационной структурой. С наложением магнитного поля на материал на это собственное упругое поле накладывается упругое поле, вызванное магнито-стрикционной деформацией.

Взаимодействие упругого поля, обусловленного магнитострикцией стали, с упругим полем её реальной дислокационной структурой приводит к появлению локальных перенапряжений. В этих местах резко возрастает вероятность термофлуктуационного разрыва межатомных напряженных связей.

В тех местах, где эти локальные перенапряжения превышают пределы упругости материала, формируются очаги пластической деформации. Именно здесь могут интенсивно протекать процессы размножения и перемещения дислокаций. С увеличением плотности дислокаций, когда лес дислокаций всё более затрудняет их собственное движение в других плоскостях скольжения, сталь претерпевает своеобразный наклёп, что в случае магнитной обработки выразилось в изменении параметра решетки мартенсита и снижении температуры обратного мартенситного превращения.

Положительная обратная связь в процессе взаимодействия дислокаций с междоельными атомами может выражаться в зарождении выделений избыточных фаз внутри металлической матрицы.

Устойчивость таких фаз против коагуляции и дислокационный характер магнито-стрикционного упрочнения быстрорежущей стали рассматриваются как физическая основа эффекта магнитной обработки.

В целом результат магнитной обработки должен рассматриваться как проявление эффекта последствия в материалах, находящихся на границах стабильности их свойств и подвергнутых воздействию внешнего силового поля.

На основе уравнений термодинамики получено выражение, отражающее дополнительное напряжение, возникающее в материале в результате магнитострикции:

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta W}{\lambda} = \frac{H \cdot \Delta B}{\lambda},$$

где  $\Delta W$  – работа намагничивания единицы объёма магнетика;

$\lambda$  – магнитострикция (относительное изменение размера образца  $\Delta l/l$ );

$H$  – напряженность магнитного поля;

$\Delta B$  – изменение величины магнитной индукции.

Суммарное напряжение в материале  $\sigma_{\text{сум}}$  будет складываться из напряжения, вызванного внутренним упругим полем реальной дислокационной структуры  $\sigma_{\text{д}}$  и напряжением  $\Delta\sigma_m$ :

$$\sigma_{\text{сум}} = \sigma_{\text{д}} + \Delta\sigma_m.$$

С помощью импульсных магнитных полей легко осуществить интенсивное энергетическое воздействие на материал посредством электромагнитных волн.

Параметром, который позволяет управлять дислокационной структурой стали, является в этом случае удельная мощность воздействия магнитного поля:

$$n = \frac{\Delta W}{\Delta t},$$

где  $\Delta t$  – время воздействия магнитного поля.

Процесс магнитострикционной деформации быстрорежущей стали сопровождается измельчением карбидов, выделившихся из основной фазы.

Это объясняется тем, что под действием локальных напряжений может происходить сегрегация примесных атомов, и прежде всего, атомов углерода на границах зёрен и дислокациях. Это приводит к зарождению дискретных частичек карбидной фазы, т. е. обнаруживается своеобразная картина дисперсионного твердения.

Улучшение свойств у ферромагнитных деталей, прошедших магнитно-импульсную обработку (МИО) достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала. Взаимодействие импульсного магнитного поля с деталью из токопроводящего материала происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность вещества.

Поля локальных перенапряжений в быстрорежущих сталях появляются в результате магнитострикции. В этих условиях частицы карбидной фазы оказываются концентраторами напряжений, которые уменьшаются за счет дополнительных источников дислокаций.

Энергетическое состояние ферромагнетика определяется энергетическим и квантовым взаимодействием магнитных моментов всех внешних электронов атомов вещества, образующих конкретную деталь.

Для конкретного атома сплава его энергетическое состояние ( $\Phi$ ) с учетом его возбуждения внешним магнитным полем можно определить по следующей зависимости:

$$\Phi = \Phi_{(x,y,z,t)} \times S(L) \times P_s,$$

где  $\Phi(x,y,z,t)$  – энергетическое состояние материала массой  $m$  при объеме  $V$ ;

$S(L)$  – неравновесное состояние атомов вещества, способных изменять его под действием внешнего магнитного поля средней напряженности;

$P_s$  – коэффициент, характеризующий магнитную энергию этих атомов.

При изготовлении реальных деталей в материале неравномерно концентрируется некоторое количество избыточной энергии ( $F$ ), с увеличением которой возрастает вероятность разрушения детали ( $P$ ).

Для повышения надежности работы механизма необходимо величину максимальной вероятности разрушения детали снизить примерно в 4 раза. Это возможно за счет уменьшения избыточной энергии материала внешними физико-технологическими методами.

Из рис. 1 следует, что для каждого материала существует оптимальное значение внешнего импульсного магнитного поля  $H_{opt}$ , при котором концентрация напряжений в материале, а, следовательно, и избыточная энергия предельно уменьшается ( $F \rightarrow F_{min}$ ), вследствие чего повышается надежность детали.

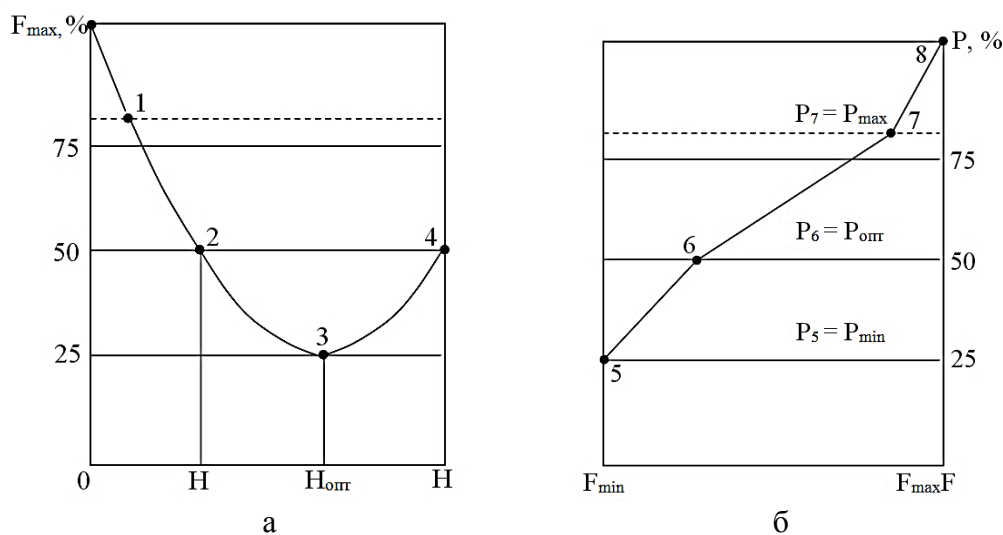


Рис. 1. Изменение избыточной энергии  $F$  в образце из ферромагнитного сплава в зависимости от напряженности поля  $H$  при МИО (а) и влияния избыточной энергии  $F$  на вероятность разрушения детали  $P$  (б)

Для уменьшения значения избыточной энергии в материале конкретного инструмента необходимо затратить некоторое количество электромагнитной энергии ( $W_o$ ), которая может быть определена из уравнения:

$$W_o = K_1 \cdot K_2 \int \int \int_{mV\Phi} m dm \cdot V_d \cdot V_m \cdot \Phi^n \cdot d\Phi,$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий влияние концентраций поверхностных и внутренних напряжений на стойкость инструмента (связан с конструированием и технологией изготовления детали (для стальных деталей  $K_1 = 1,5 \dots 2,5$ ));

$K_2$  – коэффициент, учитывающий потери энергии при МИО детали;

$\Phi$  – функция, отражающая физико-механические свойства материала;

$n$  – показатель, учитывающий надежность детали (для стальных деталей, работающих при статических нагрузках  $n = 2$ ).

Энергия магнитного поля, развиваемая соленоидными магнитно-импульсными установками, определяется по формуле:

$$W = K_2 \times (B \times H) \times V,$$

где  $B$  – магнитная индукция в соленоиде, Тл;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м;

$V$  – объем пространства, где концентрируется магнитное поле, м<sup>3</sup>.

При МИО за время импульса в соленоиде установки выделяется энергия магнитного поля, которая распределяется в основном следующим образом:

$$W_0 = K_{nn} \times (W_1 + W_2),$$

где  $K_{nn}$  – коэффициент неучтенных потерь энергии, зависящий от взаимоиנדукции поля детали с полем соленоида;

$W_1$  – энергия, расходуемая на намагничивание детали, Дж;

$W_2$  – энергия, расходуемая на локальный нагрев детали, Дж.

Энергия, расходуемая на намагничивание детали, пропорциональна величине намагниченности ( $M$ ) и зависит от свойств материала:

$$W_1 = K_3 \times V,$$

где  $K_3$  – коэффициент, учитывающий электромагнитные свойства материала.

Для каждой стали существует определенная величина напряженности импульсного магнитного поля, а, следовательно, и величина магнитной энергии  $W_1$ , которая поглощается материалом в течение времени обработки ( $t$ ) и максимально улучшает его механические и технологические свойства. Между повышением стойкости детали и магнитной проницаемостью существует корреляционная зависимость.

Магнитострикционное упрочнение быстрорежущей стали, вызывающее улучшение физико-механических свойств материала, тесно связано с напряженностью наложенного на инструментальный материал магнитного поля.

Из рис. 2 следует, что с увеличением напряженности магнитного поля, в котором проводилась обработка инструмента, возрастало и значение твердости и теплостойкости стали Р6М5К5.

Импульсное магнитное поле, взаимодействуя с материалом детали, изменяет ее тепловые и электромагнитные свойства, улучшает структуру и эксплуатационные характеристики, что положено в основу технологии магнитного упрочнения.

Первопричиной улучшения эксплуатационных характеристик инструмента, подвергнутого магнитной обработке, является изменение свойств инструментального материала. Оно происходит за счет магнитострикционного упрочнения быстрорежущей стали, что выражается в повышении ее теплостойкости.

При магнитной обработке детали вследствие неоднородной кристаллической структуры в ней возникают вихревые токи. Вихревые токи обуславливают магнитное поле и локальные микро вихри, которые в свою очередь, нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. В местах концентрации остаточных или усталостных напряжений, связанных с технологией производства, обработки или эксплуатации детали теплота, наведенная при магнитной обработке вихревыми токами, частично уменьшает избыточную энергию составляющих кристаллитов и зерен структуры образца особенно в зоне контакта напряженных участков.

Одновременно с тепловыми процессами за счет импульсного магнитного поля в металле происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, расположенных в области контакта кристаллитов и зерен сплавов, вследствие чего улучшаются механические свойства материала.

Время выдержки инструмента в процессе магнитной обработки является важным элементом режима магнитной обработки. Так для стали Р6М5 (рис. 3) достаточно времени воздействия магнитного поля в течение 60 сек., чтобы достичь наибольшего увеличения твердости материала.

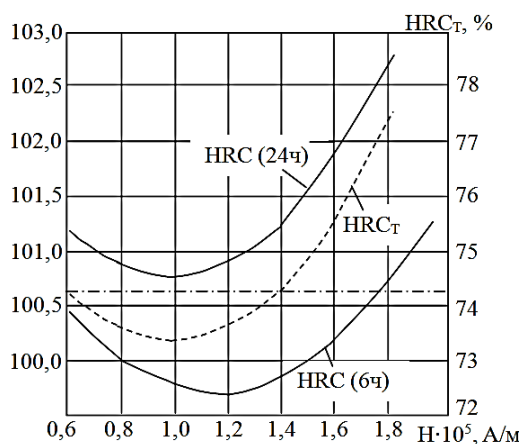


Рис. 2. Зависимость изменения твердости и теплостойкости стали Р6М5К5 от напряженности поля и времени старения

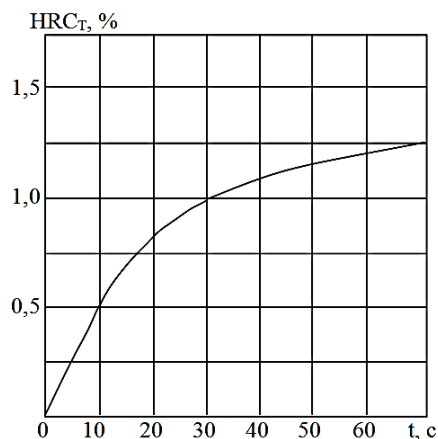


Рис. 3. Зависимость изменения твердости быстрорежущей стали Р6М5 от продолжительности магнитной обработки

После обработки импульсным магнитным полем в инструментальном материале происходят изменения как в кристаллической решетке матрицы, так и в карбидной фазе.

В результате увеличения амплитуды колебаний кристаллическая решетка аустенита стремится превратиться в решетку мартенсита. Под воздействием импульсного магнитного поля возбуждение вызвано изменением направления спиновых моментов электронов, в том числе в ядрах дислокаций, что сопровождается появлением упругих напряжений магнито-стрикционной природы и активизацией дислокационных процессов.

## ВЫВОДЫ

Проведенный анализ магнито-стрикционного упрочнения и магнитно-дисперсионного твердения быстрорежущих сталей в импульсных магнитных полях, позволяет сделать следующие выводы:

- гипотеза о магнито-стрикционном упрочнении и магнитно-дисперсионном твердении быстрорежущей стали в результате воздействия магнитного поля позволяет объяснить улучшение эксплуатационных характеристик режущего инструмента, подвергнутого импульсной магнитной обработке;

- в результате магнитной обработки быстрорежущая сталь претерпевает объемное упрочнение, дисперсионное твердение, становится более однородной по структуре и улучшает свои физико-механические свойства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование влияния магнитно-импульсных поверхностных воздействий на эксплуатационные характеристики инструментальных сталей и инструмента // В. Л. Володин, Л. Б. Зуев, Т. В. Володин, В. В. Гайдук // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – М., 2009. – № 6. – С. 61–65.
2. Кинденко Н. И. Физическая сущность и классификация методов магнитной обработки режущих инструментов из быстрорежущей стали [Электронный ресурс] / Н. И. Кинденко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск, 2014. – № 1 (13E). – С. 38–45. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/%E2%84%961\(13%D0%95\)\\_2014/article/8.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(13%D0%95)_2014/article/8.pdf).
3. Кинденко Н. И. Анализ гипотез о причинах повышения стойкости инструмента в результате воздействия магнитного поля на зону резания [Электронный ресурс] / Н. И. Кинденко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии [Электронный ресурс]. – Краматорск, 2015. – № 2 (17E). – С. 83–88. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/%E2%84%962\(17%D0%95\)\\_2015/article/16.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(17%D0%95)_2015/article/16.pdf).