

Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий

Magnetic-pulse Stiffening Machining Metal Parts

Алифанов, А. В., Благодарный, В. М., Лях, А. А.

Аннотация

Обосновано применение магнитно-импульсной обработки для упрочнения металлических изделий. Разработано экспериментальное оборудование, подобраны режимы упрочнения стальных шариков для шарикоподшипников, исследованы их механические свойства и микроструктура до и после магнитно-импульсной упрочняющей обработки.

Ключевые слова: магнит, обработка, шероховатость поверхности, микроструктура

Abstract

The paper presents substantiation of using the magnetic pulse processing for hardening of metallic items. The experimental equipment has been developed and the conditions required for hardening of steel balls for ball bearings have been determined. The investigation has been made of mechanical properties and microstructure of ball bearings prior to and after their magnetic pulse hardening processing.

Keywords: magnet, machining, surface quality, microstructure

1 Введение

Развитие современного производства требует создания металлических материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных свойств. Такая задача может быть решена как совершенствованием существующих, так и созданием принципиально новых технологий обработки металлов и сплавов. В настоящее время возможности традиционных способов обработки металлических материалов во многом ограничены. Основой для создания новых технологий являются результаты последних исследований по взаимодействию электромагнитного поля, ультразвука, излучения лазера и т.д. с металлами и сплавами.

Взаимодействие электромагнитного поля с металлами наиболее полно изучено применительно к технологиям обработки давлением (например, магнитно-импульсная штамповка). Вместе с тем, высокая технологичность и экологичность магнитных методов воздействия делает их перспективными в плане создания на их базе разнообразных технологий обработки металлов и сплавов. Влияние магнитных полей на изменение структуры и свойств металлов и сплавов изучено мало. Целью данной работы является исследование влияния электромагнитного поля на изменение структуры и свойств шариков из стали ШХ15, применяемых в шарикоподшипниках, и обоснование эффективности применения магнитноимпульсной обработки (МИО) для упрочнения металлических изделий.

2 Анализ взаимодействия внешнего электромагнитного поля с проводящими средами

Основными факторами, определяющими воздействие магнитно-импульсной обработки (МИО) на металлические материалы, являются [1]: непосредственное магнитное воздействие (намагничивание, перемагничивание, магнитострикция); ток проводимости, индуцированный переменной во времени составляющей магнитного поля; силовое воздействие магнитного поля на индуцированный электрический ток; джоулево тепловыделение; электроннопластический эффект, обусловленный движением электронов и их взаимодействием с дислокациями, вызывающий снижение сопротивления деформированию и повышение пластичности металлов; упрочнение и пластические деформации.

Для общего случая падения плоской волны на плоскую поверхность металла значения напряженностей электрического E_x и магнитного H_x полей соответственно имеют вид [2]:

$$E_x = E_0 \exp \left[-\frac{2\pi x}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left(2\pi f t - \frac{2\pi x}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right), \quad (1)$$

$$H_x = H_0 \exp \left[-\frac{2\pi x}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left(2\pi f t - \frac{2\pi x}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} - \frac{\pi}{4} \right), \quad (2)$$

где E_0 и H_0 — значения напряженностей электрического и магнитного полей на поверхности металла, c — скорость света, μ — магнитная проницаемость, ρ — удельное электросопротивление, f — частота колебаний, t — время, x — расстояние от поверхности в глубь металла.

При проникновении плоской электромагнитной волны в металл (рис. 1) уменьшается амплитуда напряженности электрического и магнитного полей; меняются фазы колебаний; фаза магнитного поля отстает от фазы электрического поля на $\pi/4$. С переходом к глубинным слоям металла количество поглощенной энергии убывает:

$$\frac{4\pi}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} = \frac{2}{d}, \quad (3)$$

где d — глубина проникновения магнитного поля в металл.

В слое $x=d$ поглощается 86,5% всей энергии, переданной в металл. Величина d зависит от констант материала и частоты электромагнитных колебаний f , что показано в табл. 1. Оценка воздействия импульса

магнитного поля на тонкую проводящую пластину перпендикулярно ее поверхности дана в [1].

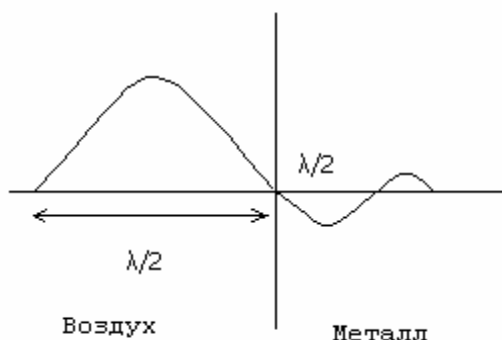


Рис. 1 Схема проникновения плоской электромагнитной волны в металл

Fig. 1 Scheme flat electromagnetic wave penetration into the metal

Таб. 1 Зависимость глубины проникновения излучения в медь от частоты магнитного поля

Table 1 Dependence of penetration depth of radiation into the copper, depending on frequency magnetic field

| Частота, Гц | Глубина проникновения в медь d , мм |
|------------------|---------------------------------------|
| 10^8 | 0,007 |
| 10^6 | 0,67 |
| 10^5 | 0,21 |
| 10^4 | 0,67 |
| $2 \cdot 10^3$ | 1,5 |
| $0,5 \cdot 10^2$ | 9,5 |

Для медного образца при времени импульса 10^{-4} с и индукции 1 Тл приращение температуры составляет порядка 20 К, давления ~ 15 МПа; плотность тока — $6 \cdot 10^3$ А/мм². Силовое воздействие в данном случае достаточно эффективно для того, чтобы вызвать структурные изменения [3], но не достигает пределов упругости и прочности. Плотность тока достаточна для достижения электроннопластического эффекта [4].

Дальнейшие исследования показали, что под действием импульсного магнитного поля возникает ударная волна, которая, распространяясь вглубь образца, вызывает упрочнение внутренних слоев. Если отсутствует видимая деформация, то можно считать, что упрочнение внутренних слоев обусловлено в первую очередь распространением ударной волны. Для меди М1 зависимость микротвердости от глубины исследуемого слоя x представлена на рис. 2, а.

Упрочнение при увеличении расстояния от поверхности возрастает, что согласуется с данными [5]. Дополнительное упрочнение не зависит от величины исходного зерна и может быть связано либо с измельчением зерна, либо с изменением дислокационной структуры. Зависимость микротвердости от энергии емкостного накопителя w представлена на рис. 2, б.

3 Методика обработки штучных изделий в электромагнитном поле

Обработка осуществляется в цилиндрическом индукторе (рис. 3) на экспериментальной магнитно-импульсной установке МИУ. Энергия импульса 2 – 5 кДж, ко-

личество циклов 1 – 5. Характеристики МИУ представлены в табл. 2. На рис. 4 показана схема экспериментальной установки для обработки сильным импульсным магнитным полем штучных заготовок.

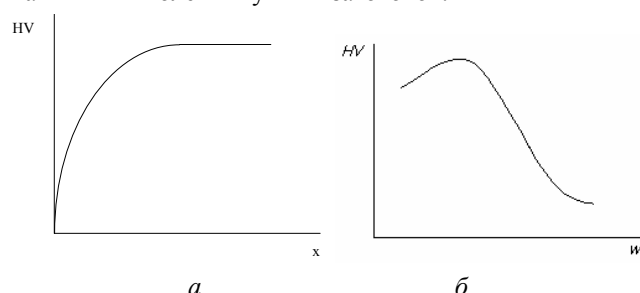


Рис. 2 Зависимость микротвердости от глубины слоя (а) и энергии емкостного накопителя (б)

Fig. 2 Dependence of microhardness depth layer (a) and energy of capacitor pumping (b)

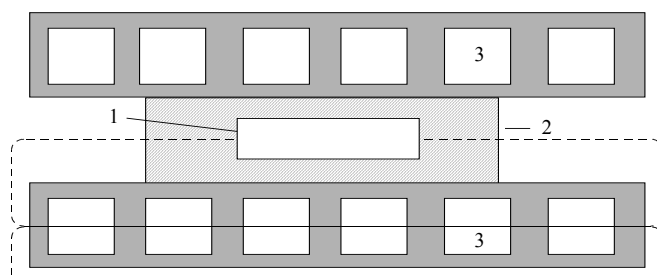


Рис. 3 Схема расположения образцов в индукторе: 1—образец; 2—диэлектрический вкладыш для фиксации образца внутри индуктора; 3—токопровод

Fig. 3 The scheme layout object inductor. 1 – muster, 2 – dielectrical specimen for fixation pattern inside the inducer, 3 - driver

Таб. 2 Параметры установки МИУ

Table 3 Parameters settings MPS

| Характеристики генератора и индуктора | Диапазон изменения |
|---------------------------------------|--------------------|
| Максимальная энергия импульса | 20 кДж |
| Длительность фронта импульса | 20 мкс |
| Максимальная амплитуда тока | 16 кА |
| Длительность импульса | 100 мкс |

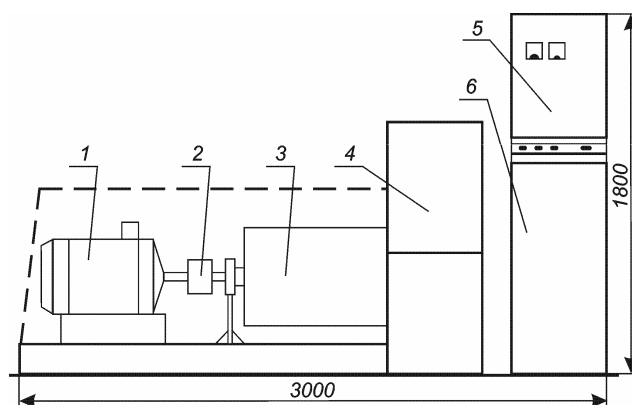


Рис. 4 Экспериментальная установка для магнитно-импульсной обработки токопроводящих штучных заготовок: 1—двигатель; 2—муфта; 3—генератор импульсных токов; 4—стойка управления; 5—пульт управления; 6—технологический блок

Fig. 4 Experimental machine for magnet-stress machining drivers. 1 – motor, 2 – clutch, 3 – generator impulse currents, 4 – stand, 5 – counter dilution, 6 – technology unit

4 Исследование структуры и прочностных свойств шариков, предназначенных для шарикоподшипников, после их магнитно-импульсной обработки

Исследования производили на образцах, соответствующих техническим требованиям ГОСТ 3722-81. Отбирали закаленные шарики, изготовленные на ОАО «Минский подшипниковый завод» диаметром 3/8" (сталь ШХ15), и проводили их дополнительную обработку магнитно-импульсным методом. Испытания шариков на разрушение после их магнитно-импульсной обработки проводили на испытательной машине ЦДМ-100 по ГОСТ 3722-81. При проведении испытаний определяли нагрузку разрушения в кН по шкале В для различных режимов магнитно-импульсной обработки.

На рисунках 5–6 представлены результаты определения усилия разрушения шариков после их обработки импульсным магнитным полем. Рис. 5 иллюстрирует зависимость усилия разрушения от количества импульсов МИО, рис. 6 — от энергии импульса. Наибольшее усилие разрушения показали шарики, обработанные по варианту: 2 кДж, 2 импульса.

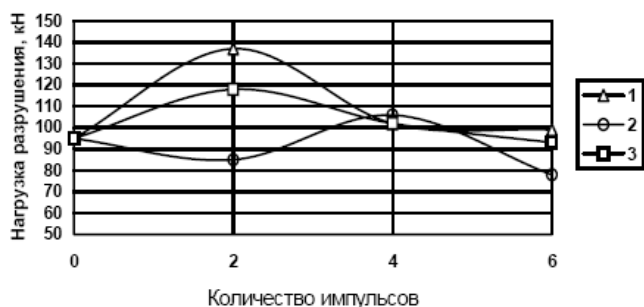


Рис. 5 Изменение усилия разрушения в зависимости от количества импульсов обработки:

1—2 кДж, 2—3,75 кДж, 3—5,8 кДж

Fig. 5 Change forces breach, depending on number of pulses: 1—2 kJ, 2—3,75 kJ, 3—5,8 kJ



Рис. 6 Изменение усилия разрушения в зависимости от энергии импульса: 1—2 импульса, 2—4 импульса,

Fig. 6 Change forces breach, depending on the energy pulse: 1—2 pulse, 2—4 pulse, 3—6 pulses

Полученные и проанализированные результаты обработки шариков импульсным магнитным полем показывают, что этот метод имеет большие возможности для решения поставленной задачи — повышения прочностных свойств шариков за счет оптимизации их структуры.

Структура поверхности разрушения после МИО с энергией 0,6 кДж представлена на рис. 7. Структура характеризуется достаточно хорошей равномерностью.

Важной особенностью является наличие зон вязкого излома (рис. 7, а – г). Для образца с усилием разрушения 119 кН наблюдается хрупкий излом (рис. 7, д, е), этот образец обладает достаточно однородной мелкодисперсной структурой.

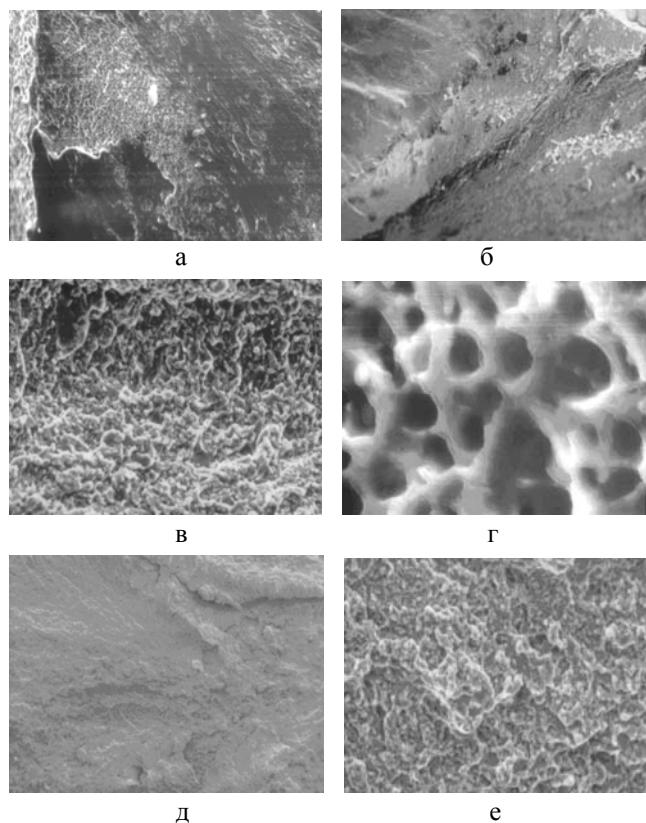


Рис. 7 Структура поверхности разрушения шариков после МИО при различных режимах: а–г — 0,6 кДж, 1 импульс, усилие разрушения 109 кН, д–е—0,6 кДж, 2 импульса, усилие разрушения 119 кН; а—х390, б—х39, в, е—х930, г—х9300, д—х93

Fig. 7 The structure of the surface of damaged bullets, by parameters а – г – 0,6 kJ, 1 impulse, 109 kN, д – е 0,6 kJ, 119 kN, а – х390, б – х36, в, е – х930, д – х93:

5 Исследование структуры упрочненных шариков методом прицельной металлографии

Для получения более корректных и убедительных доказательств влияния МИО на структурные изменения в шариках была выбрана случайная группа готовых шариков, на которых после их разрушения был приготовлен шлиф поверхности. В связи с тем, что структура подшипниковой стали имеет высокую дисперсность, место на шлифе для проведения прицельной металлографии помечалось тремя отпечатками микротвердости, по которым можно было идентифицировать определенное место на шлифе. Было произведено травление и фотографирование шлифа шарика в исходном состоянии. После этого производилась магнитно-импульсная обработка одним импульсом при энергии 2 кДж, после чего производился снимок структуры в том же месте шлифа. Результаты приведены на рис. 8.

Сравнение микроструктур до и после воздействия магнитным полем позволяет выделить изменение характерных структурных групп.

Основные результаты воздействия магнитного поля на структуру сводятся к следующему. Изменяется стру-

ктура матрицы сплава (скрытоугольчатого мартенсита), которая приобретает вид, характерный для отожженной структуры. Устраняются участки различной травимости матрицы, связанные, по-видимому, с неоднородностью мартенсита.

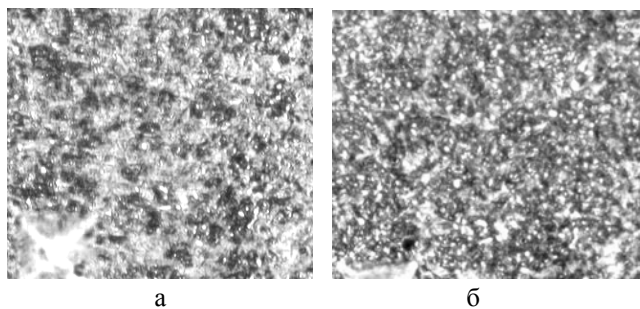


Рис. 8 Микроструктура шарика (образец 1) из стали ШХ15; $\times 1500$, а — в исходном состоянии, б — после обработки магнитным полем

Fig. 8 Microstructure balls (sample 1), steel 100Cr6; $\times 1500$, а — base state, б — after treatment in magnetic field

Изменяется морфология и пространственное распределение карбидной фазы. Заметно укрупнение карбидов и их глобуляризация. Изменяется их взаимное расположение в направлении повышения однородности распределения карбидов в матрице сплава. Анализ структуры дает основание предполагать, что магнитно-импульсная обработка способствует дополнительному выделению карбидов из матрицы сплава.

6 Выводы

В результате проведения теоретических и экспериментальных работ показано, что при воздействии сильного электро-магнитного поля происходят довольно существенные структурные изменения в металлических изделиях, приводящие к их упрочнению. Магнитно-импульсная обработка закаленных стальных шариков диаметром 3/8" (сталь ШХ15), применяемых для шарико-

коподшипников, позволила повысить их прочность на разрушение в среднем на 20% за счет улучшения микроструктуры, что говорит о перспективности данного метода для упрочняющей обработки стальных изделий.

Алифанов А. В.,

Благодарный В. М.,

Лях А. А.

Барановичский государственный университет

Республика Беларусь

225411 г. Барановичи ул. Королика 8

Тел. (10 375 163) 46 59 51

E-mail: blagodar@list.ru

Литература

- [1] Отчет о НИР: «Исследование эффектов обработки сильными импульсными магнитными и электрическими полями на пластические и физико-механические свойства материалов для машино- и приборостроения». Фонд фундаментальных исследований РБ; Физико-технический институт НАН РБ. Проект №Т94-367. № ГР 19942666. Минск, 1997.
- [2] Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. М.: 1950.—316с.
- [3] Стрижало В.А. и др. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. — Киев: Наукова думка, 1990.
- [4] Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов.—М.: Наука, 1985.
- [5] Брон О.Б., Епечурин В.П. Распределение давлений в детали при магнитно-импульсной обработке. Кузнечно-штамповочное производство, 1968.—№5.—с.26–29.
- [6] Баткилин Я.М., Легеза А.В. / Особенности упрочнения меди при магнитно-импульсной обработке // Вестник Харьковского политехнического института, 1974.—№94.—вып.2.—с.53.

Continuance Papers from Page 16/ Pokračovanie príspevku zo str. 16

- [10] HOLEŠOVSKÝ, F., NOVÁK, M.: Ground Surface and its Behaviour Under Load, In: „Transfer 2008“, TU, Trenčín, Slovensko, 2008, ISBN 978-80-8075-357
- [11] HOLEŠOVSKÝ, F., NOVÁK, M.: The Influence of Construction Element Durability and Surface While Grinding. *Výrobné inžinierstvo*, VIII, 3, pp. 5-7, 2009, ISSN 1335-7972
- [12] MADL, J.: Material aspects of chip formation by precision machining, In: *ICPM 2003*, CTU in Prague, Prague, pp. 42-49. 2003
- [13] CHEN, W.: Cutting Forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40pp. 455-466, 2000
- [14] KOSHY, P., DEWES, R.C., ASPINWALL, D.K.: High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~58 HRC), *Journal of Materials Processing Technology*, 127, pp. 266-273., 2002
- [15] MÁDL, J., SUTANTO, H.: Surface Roughness of Hardened Steel in Precision Milling with Ceramic and Cubic Boron Nitride Cutting Tool. In: *Science Report - Project PL-007 - Modern Metrology in Quality Management Systems*. Kielce: Kielce University of Technology, 2006, p. 111-118. ISBN 978-83-88906-66-4.
- [16] MÁDL, J., SUTANTO, H.: Residual Stresses in Machining of Hardened Steel. In: *ICPM 2007 - 4th International Congress on Precision Machining 2007*. Kielce: Kielce University of Technology, vol. 1, p. 29-34. 2007, ISBN 978-83-88906-91-6.
- [17] TRMAL, G.J. HOLEŠOVSKÝ, F.: Wave Shift and Its Effect on Surface Quality in Super-abrasive Grinding. *Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp.979-989, 2001,