

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.923.04+519.237.7

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, М. М. Дечко, Е. В. Сенчуров

Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет», Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ПО КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В работе представлены результаты экспериментального исследования параметров качества поверхности колец шарикоподшипников из стали ШХ15 при магнитно-абразивной обработке. Изучены зависимости размера блоков когерентного рассеяния, напряжений 1-го и 2-го родов, содержания аустенита в поверхностном слое от технологических факторов магнитно-абразивной обработки. Выявлено и объяснено сложное взаимодействие и взаимовлияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки поверхностей колец шарикоподшипников. Полученные регрессионные зависимости для всех исследованных параметров позволяют построить математическую модель процесса, с помощью которой может быть решена задача оптимизации режимов магнитно-абразивной обработки по критериям качества обработанной поверхности колец шарикоподшипников из стали ШХ15.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; качество поверхности; поверхностный слой; статистический анализ; оптимизация.

Рис. 2. Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, M. M. Dechko, E. V. Senchurov

Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
99 Nezavisimosti Av., 220023 Minsk, Republic of Belarus, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**FACTOR ANALYSIS OF THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS
BY THE QUALITY OF PROCESSED SURFACE CRITERIA**

The paper presents the results of the experimental research of surface quality parameters of ball bearing rings made of steel 100Cr6 during electrical discharge machining. We have investigated the dependence of the size of blocks of coherent scattering, structural strain, the content of austenite in the surface layer on technological factors of electrical discharge machining. We have identified and explained the complex interaction and interdependence of technological factors of electrical discharge machining of the surfaces of ball bearing rings. The obtained regression dependences for all the investigated parameters allow us to develop a mathematical model of the process, which can solve the problem of optimization of electrical discharge machining by the criteria of the quality of the processed surface of ball bearing rings made of steel 100Cr6.

Key words: electrical discharge machining; quality of surface; surface layer; statistical analysis; optimization.

Fig. 2. Tab. 3. Ref.: 8 titles.

Введение. Совершенствование технологии производства направлено на решение двух важнейших задач — повышение качества изделий и снижение затрат на их производство. Качество продукции определяет комплекс эксплуатационных параметров изделия. Однако оценка многих параметров на стадии проектирования проблематична ввиду сложности их моделирования. Поэтому для обеспечения качества изделий важно определить комплекс свойств, который позволяет надежно их прогнозировать, оценивать эти свойства на стадии разработки

изделия или процесса его производства, управлять каждым из этих свойств независимо друг от друга. Последнее условие определяется особенностями применяемой технологии изготовления.

Магнитно-абразивная обработка (далее — МАО) — один из перспективных способов финишной обработки, технологические особенности которого обеспечили ему особое место в ряду методов абразивного резания [1; 2]. Специфика взаимодействия абразивных зерен, удерживаемых магнитным полем (далее — МП), с обрабатываемой деталью обуславливает особенности формирования качества обработанной поверхности. Формирование свойств поверхностного слоя определяется процессами микрорезания и деформаций, реализуемыми при МАО и зависящими от ее режимов.

Цель исследования — на основе экспериментального изучения установить влияние режимов МАО на характеристики поверхностного слоя обработанного материала.

Материалы и методы проведения эксперимента. Экспериментальное исследование проведено при МАО колец шарикоподшипников из стали ШХ15 с использованием факторного и регрессионного анализов в различных технологических режимах МАО и диапазонах их варьирования (таблица 1).

Эксперименты выполнены по ротатбельному плану из 77 опытов с четырехкратным дублированием в центральной точке. На полученных образцах измерены следующие параметры качества обработанной поверхности:

- β_1, β_1' (нм) — размер блоков когерентного рассеяния (далее — БКР) в поверхностном слое до и после МАО соответственно;
- $\Delta\beta_1$ (нм) — изменение размера БКР в поверхностном слое;
- β_2, β_2' (нм) — напряжение 2-го рода в поверхностном слое до и после МАО соответственно;
- $\Delta\beta_2$ (МПа) — изменение напряжений 2-го рода в поверхностном слое;
- P, P' (МПа) — напряжения 1-го рода до и после МАО соответственно;
- ΔP (МПа) — изменение напряжений 1-го рода;
- A_0, A' (%) — содержание аустенита в поверхностном слое до и после МАО соответственно;
- ΔA (%) — изменение содержания аустенита в поверхностном слое.

Как всякая технология обработки поверхности, реализуемая путем удаления части материала с обрабатываемой детали, МАО приводит к деформированию поверхностного слоя на микро- и макроуровне. На микроуровне деформация локализуется как внутри каждого отдельного зерна обрабатываемого материала, так и на межкристаллическом уровне

Т а б л и ц а 1. — Технологические режимы МАО

Фактор режима МАО	Единица измерения	Обозначение в нормированных координатах	Диапазон варьирования	
			min	max
Скорость вращения заготовки, V	м / с	X_1	1,15	5,85
Скорость осцилляции полюсных наконечников, V_0	м / с	X_2	0,121	0,319
Величина магнитной индукции, B	Т	X_3	0,42	0,98
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, A	мм	X_4	0,55	2,25
Шероховатость поверхности детали до МАО, Ra	мм	X_5	0,305	1,295
Время обработки, t	с	X_6	17,6	102,4

в результате изменения размеров зерен и их взаимного перемещения. Деформация отдельных зерен материала поверхности приводит к изменению их размеров, что может быть отражено в изменении размера БКР $\Delta\beta_1$, а перемещение зёрен приводит к изменению напряжений 2-го рода $\Delta\beta_2$. Поскольку оба процесса взаимосвязаны, следует ожидать тесную корреляцию этих параметров между собой.

Напряжения 1-го рода, являющиеся зональными напряжениями в деформируемой области тела, имеют ориентацию, связанную с направлением приложения нагрузки к деформируемой поверхности. При MAO силовое воздействие на поверхностный слой со стороны отдельных абразивных зерен в значительной степени хаотично, поэтому в отличие, например, от лезвийной обработки резанием, преимущественное направление деформирующего воздействия не столь однозначно предопределено. Поэтому изменение напряжений 1-го рода ΔP не должно иметь тесную связь с параметрами $\Delta\beta_1$ и $\Delta\beta_2$. То же касается и содержания аустенита, который является деформационно-метастабильным в составе стали ШХ15, вследствие чего фазовый состав изменяется по схеме $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ при воздействии импульсно-ударной нагрузки ферроабразивной «щетки». Дисперсные кристаллы ϵ - и α -мартенсита возникают в деформированном аустените обычно на пересечении двойников и образуют скопления в поясах скольжения аустенита [1]. Установлено, что очагами зарождения мартенсита при его деформационном превращении, обусловленном гетерогенной природой, являются ферромагнитно-упорядоченные нанокластеры в аустенитной матрице.

Существование в аустенитной матрице зародышей мартенсита субкритического размера, обладающих объемно-центрированной кристаллической решеткой (ОЦК-решеткой), и воздействие на них внешнего МП влияет на размеры аустенитных зерен и их устойчивость. В работе [2] выявлено, что в кристаллической структуре аустенита происходит образование характерного мидриба мартенситной пластины, который механически менее устойчив и представляет собой ферромагнитно-упорядоченный кластер, обеспечивающий при воздействии внешнего МП зарождение мартенситных кристаллов.

Результаты исследования и их обсуждение. В целях проверки изложенных выше предположений выполнен факторный анализ матрицы корреляций параметров качества поверхности, измеренных в эксперименте [3]. Приведены факторные нагрузки исходных параметров для трех главных компонент (таблица 2).

Как и предполагалось, размер БКР и напряжения 2-го рода тесно взаимосвязаны и входят в первую главную компоненту. Причем тесно связаны также их значения до MAO (β_1 , β_2) и их изменение после MAO ($\Delta\beta_1$, $\Delta\beta_2$). То есть степень изменения зависит от исходного состояния: чем больше исходное значение параметров, тем меньше их изменение после MAO. Видимо, изменениям в большей степени подвержены изначально более мелкие элементы кристаллической структуры.

Напряжения 1-го рода и остаточный аустенит являются двумя независимыми параметрами качества поверхности. При этом изменение содержания аустенита, как и микроструктурных

Т а б л и ц а 2. — Факторные нагрузки для главных компонент относительно параметров качества поверхности после MAO

Параметры качества поверхности	Главные компоненты		
	F_1	F_2	F_3
β_1	0,879	0,186	0,066
β_1'	-0,200	0,539	0,411
$\Delta\beta_1$	-0,877	0,120	0,158
β_2	0,733	0,312	0,167
β_2'	-0,371	0,115	0,233
$\Delta\beta_2$	-0,812	-0,082	0,105
P	0,542	-0,115	0,049
P'	0,113	0,043	-0,921
ΔP	0,135	-0,186	0,926
A_0	-0,065	-0,716	0,082
A'	0,016	0,590	-0,051
ΔA	-0,064	-0,932	0,097
Доля объяснённой дисперсии	27%	19%	17%

параметров $\Delta\beta_1$ и $\Delta\beta_2$, зависит от величины его исходного содержания до МАО, а изменение напряжений 1-го рода и их значения после МАО не зависит от исходных значений.

Для оценки влияния режимов МАО на параметры качества поверхности выполнен регрессионный анализ результатов экспериментов. В результате для параметра $\Delta\beta_1$ после исключения статистически незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии вида $\Delta\beta_1 = 4,62 - 1,06\beta_1 - 0,10X_3X_5 + 0,10X_1X_3X_6$, в которое введен дополнительный фактор β_1 для учета влияния исходного состояния поверхности.

Согласно уравнению варьирование режимов МАО изменяет размер БКР на $\pm 0,2$ нм. Наибольшее влияние на размер БКР оказывают магнитная индукция, скорость вращения заготовки, исходная шероховатость поверхности и время обработки. Причем влияние этих факторов взаимосвязано. Так, увеличения размеров БКР можно достичь комбинациями режимов:

Скорость вращения заготовки, V	min	max	min	max
Величина магнитной индукции, B	min	min	max	max
Шероховатость поверхности детали до МАО, Ra	max	max	min	min
Время обработки, t	max	min	min	max

Влияние величины магнитной индукции и скорости вращения можно объяснить тем, что их увеличение ведет к усилению силового деформирующего воздействия на обрабатываемую поверхность со стороны абразивных зерен. Увеличение времени обработки также усиливает это воздействие. Взаимодействие факторов магнитной индукции и шероховатости разнонаправлено изменяет размеры БКР. Уменьшение этого параметра достигается либо комбинацией максимальной индукции при минимальной исходной шероховатости, либо минимальной индукцией при максимальной исходной шероховатости.

Известно, что БКР образуют мозаику зерен, определяемую через их разориентацию внутри структуры металла. В случае наличия МП и механического воздействия абразива происходит отклонение в ту или иную сторону размеров БКР, обусловленного магнито-пластическим эффектом, который не меняет общий характер протекания процесса микро-резания, а изменяет его полноту и эффективность, обеспечивая варьирование магнито-чувствительных характеристик структуры. Эффект влияния МП зависит от исходного структурного состояния и предварительной деформации и приводит к неоднозначному избирательному влиянию на развитие и формирование текстуры магнитно-стрикционных деформаций, либо частично подавляя, либо способствуя ее росту.

В работе [4] установлено, что многократное действие неомангнитных импульсов при импульсном магнитном полировании бериллиевой бронзы приводит к уменьшению размеров БКР и росту плотности дислокаций, обеспечивающих рост микротвердости поверхностного слоя. В работе [5] при старении бериллиевой бронзы БрБ-2 выявлено, что средний размер БКР при наложении постоянного МП практически всегда больше, чем без него.

В то же время результаты исследований медных сплавов показали, что размер БКР за счет применения постоянного МП $H = 7$ кЭ меньше в среднем на 20...35%, чем при его отсутствии [6].

В работе [7] установлено, что уменьшение размеров БКР и увеличение макро-напряжений обусловлены прямым механическим воздействием на обрабатываемый материал, которое приводит к значительному дроблению микроструктуры и увеличению плотности дефектов кристаллического строения при наложении переменного МП. Следовательно, увеличение размеров БКР при максимальной индукции и минимальной шероховатости либо при минимальной индукции и максимальной шероховатости связано со снижением как в первом, так и во втором случаях прямого механического воздействия ферроабразивной «щетки». Минимальная индукция при наличии максимальной

шероховатости не обеспечивает требуемого давления, а максимальная индукция и развиваемое при этом давление не приводит к последующему дроблению БКР ввиду достижения ими предельных значений.

Зависимость изменения напряжений 2-го рода в поверхностном слое после МАО описывается уравнением регрессии:

$$\Delta\beta_2 = 0,520 - 0,640\beta_2 - 0,014X_2 - 0,028X_3X_5 + 0,015X_4X_5 - 0,018X_3X_6 - \\ - 0,021X_4X_6 + 0,021X_1X_3X_5 - 0,015X_2X_4X_5 - 0,016X_1^2 - 0,011X_2^2.$$

Квадратичные эффекты факторов X_1 и X_2 указывают на наличие глобального максимума изменения напряжений 2-го рода $\Delta\beta_2$ в зависимости от этих факторов, соответствующих скоростям вращения заготовки и осцилляции полюсных наконечников. Однако положение точки максимума и соответствующее значение $\Delta\beta_2$ определяются также значениями факторов X_3 , X_4 и X_5 (рисунок 1).

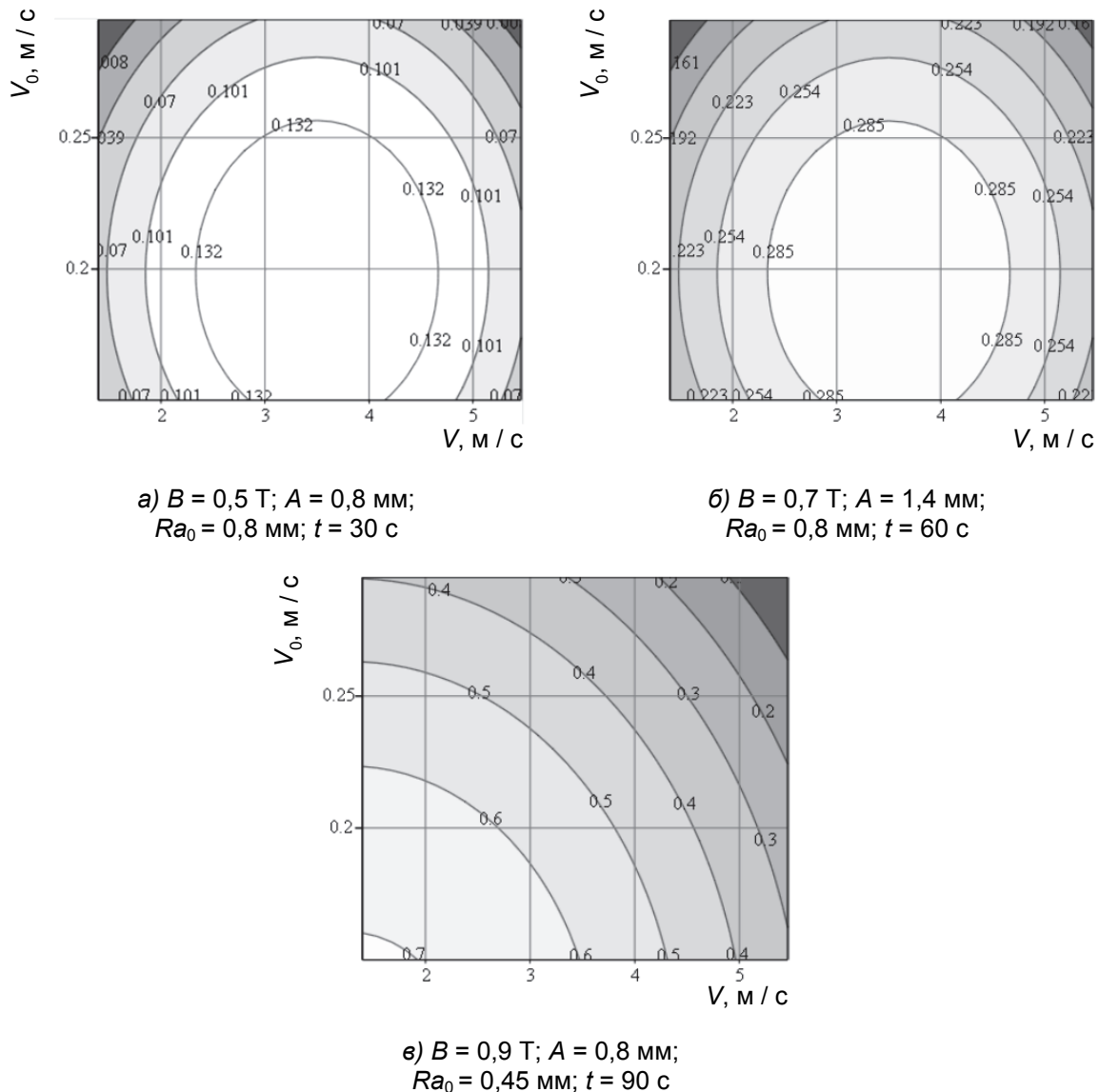


Рисунок 1. — Влияние технологических факторов на изменения напряжений 2-го рода после МАО

Наибольший рост напряжений 2-го рода в поверхностном слое наблюдается при минимальных значениях скорости вращения заготовки, осцилляции полюсных наконечников, амплитуде осцилляции и максимальных значениях индукции, исходной шероховатости и времени обработки (см. рисунок 1, в). Соответственно, при минимальной индукции, максимальной шероховатости и минимальном времени обработки влияние остальных факторов на изменение 2-го рода не столь значительно (см. рисунок 1, а, б).

Причиной выявленного эффекта является механизм упругой и пластической деформации, поскольку максимальные индукция и время обработки обеспечивают рост продолжительности пластического сдвига материала под воздействием наибольшей жесткости ферроабразивной «щетки». Процесс проскальзывания в отличие от процесса резания в первом случае не приводит к появлению царапины, которая способствовала бы разделению материала на две части — стружку и матрицу. Минимальная индукция, максимальная шероховатость и минимальное время обработки — это сочетание, гарантирующие высокую степень подвижности ферроабразивной частицы, увеличение глубины съема материала и уменьшение количества проходов данной частицы по пути резания, исходя из классического представления о процессе резания, что приводит к скольжению частицы по поверхности обрабатываемой заготовки. Итогом этого является реализация механизма упругой деформации, которая никоим образом не связана с самоупрочнением и с возникновением концентрации напряжений. Пластичность металла обеспечивает, несмотря на первоначальную нагрузку, устранение причины, вызвавшей изменения межатомных расстояний, их возврат в исходное состояние, исчезновение деформации и, следовательно, отсутствие роста напряжений 2-го рода.

Пластическое деформирование при МАО при наличии такого сочетания факторов, как минимальные скорости вращения заготовки, осцилляции наконечников, амплитуды осцилляции, исходной шероховатости и максимальных значений индукции и времени обработки, — протекает в более сложных условиях, связанных с дроблением блоков мозаики внутри зерен, зарождением и развитием царапины. Создание полезной плотности дислокаций, определяющей уровень напряжений 2-го рода, придает поверхностному слою материала после МАО требуемые показатели наклепа, а в конечном счете и рост долговечности изделия. В противоположность описанному, максимальная индукция и время обработки обеспечивают жесткость частиц ферроабразивного порошка (далее — ФАП) и повышение продолжительности давления этих частиц на обрабатываемую поверхность заготовки, приводя к увеличению напряжений 2-го рода, поскольку они возникают между отдельными элементами структур и влияние исходной шероховатости в этом случае незначительно. Минимальные значения скоростей вращения заготовки, осцилляции полюсных наконечников, а также амплитуды осцилляции способствуют образованию напряжений 2-го рода вследствие ударно-импульсного воздействия частиц ФАП на поверхностный слой материала, исключая проскальзывание по нему данных частиц.

Зависимость изменения напряжений 1-го рода в поверхностном слое после МАО описывается уравнением регрессии вида

$$\Delta P = 22,01 - 2,35X_4 - 2,13X_1X_5 - 2,32X_4X_6 - 2,27X_1X_2X_4 + \\ + 2,31X_1X_5X_6 - 2,24X_2X_3X_4 + 2,07X_4^2 + 0,60X_3^3.$$

Согласно полученному уравнению минимальное изменение напряжений 1-го рода возникает при максимальной скорости осцилляции полюсных наконечников и минимальных значениях всех остальных факторов режима МАО. Очевидно, что при минимальной магнитной индукции и минимальной амплитуде колебания деформирующее воздействие со стороны абразивных зерен на обрабатываемую поверхность уменьшается, вследствие чего напряжения 1-го рода изменяются незначительно. Столь же очевидно, что при минимальном

времени обработки непродолжительное силовое воздействие мало изменяет эти напряжения. Меньшая исходная шероховатость обрабатываемой поверхности, видимо, способствует снижению напряжений вследствие того, что профиль поверхности изначально близок к «приработанному» и не происходит удаления его значительных фрагментов.

Сочетание минимума скорости вращения детали и максимума скорости осцилляции обуславливает уменьшение угла атаки микронеровностей поверхностного слоя частицами ФАП. В результате частицы ФАП вынуждены огибать микронеровность и осуществлять круговые движения по ее поверхности, а не производить сдвиг обрабатываемого материала, так как угол атаки минимален. Следовательно при таком режиме МАО в большей степени реализуется процесс проскальзывания частицы ФАП вдоль боковой поверхности микронеровности, в отличие от противоположного варианта, когда действуют прямые столкновения частиц с поверхностью, вызывающие ее наклеп и рост напряжений 2-го рода.

При анализе влияния МАО на содержание аустенита в поверхностном слое следует учесть, что микрорезание абразивным порошком не может вызвать достаточного температурного воздействия на поверхностный слой, способного привести к структурным превращениям стали ШХ15. Изменение содержания аустенита может быть связано с удалением некоторой части поверхностного слоя, в котором аустенит возник на предыдущих технологических операциях. Вследствие чего и обнаруживается тесная связь между его содержанием в поверхности до МАО и его изменения после МАО (см. таблицу 2). Поэтому в уравнение регрессии был добавлен член, отражающий исходное содержание аустенита перед МАО. В результате получено регрессионное уравнение вида $\Delta A = A_0 - 1,36 + 0,637X_3 - 0,462X_3^3$, указывающее на то, что единственным фактором МАО, влияющим на изменение содержания аустенита в поверхностном слое, является индуктивность МП. При этом, если обратиться к уравнению регрессии удельного съёма [8], то фактором, оказывающим наибольшее влияние на величину удельного съёма, также является индуктивность МП. Таким образом, причиной изменения содержания аустенита в поверхностном слое после МАО является удаление некоторой его части, так как содержание аустенита в исходном состоянии меняется по глубине поверхностного слоя. Зависимость изменения содержания аустенита в поверхностном слое после МАО от его исходного содержания и индуктивности представлена графически (рисунок 2).

Как видно из графика, содержание аустенита в поверхностном слое после МАО возрастает с увеличением магнитной индукции неравномерно. Более интенсивное возрастание происходит при $B < 0,6$ Т и $B > 0,8$ Т. Вероятно, характер этой зависимости определяется распределением аустенита по глубине поверхности в исходном состоянии.

Заключение. В целом тесное взаимовлияние всех факторов режима МАО позволяет подобрать их сочетания, благоприятные не только с точки зрения параметров качества поверхностного слоя, но и обеспечения приемлемых значений производительности процесса и получаемой шероховатости, которые можно рассчитать по полученным нами ранее уравнениям [8]. Полученные регрессионные зависимости для всех исследованных параметров позволяют нам построить математическую модель процесса, с помощью которой может быть решена задача оптимизации режимов МАО по критериям качества обработанной поверхности и производительности процесса. Решение этой задачи будет представлено в последующих публикациях.

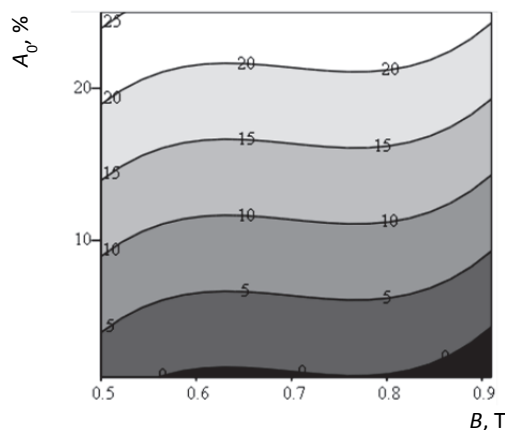


Рисунок 2. — Влияние магнитной индукции на изменение содержание аустенита (%) в поверхности после МАО

Список цитируемых источников

1. Перспективная аустенитная сталь для криогенной техники / Л. А. Мальцева [и др.] // Междунар. науч.-исследоват. журн. — 2016. — № 5. — Ч. 3. — С. 138—143.
2. *Pustovoit, V. N.* Special features of the structure of martensite formed by hardening of steel in magnetic field in the temperature range of superplasticity of austenite / V. N. Pustovoit, Yu. V. Dolgachev // Metal Science and Heat Treatment. — 2012. — Vol. 53. — P. 515—519.
3. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ : пер. с англ. / Дж.-О. Ким [и др.] ; под ред. И. С. Енюкова. — М. : Финансы и статистика, 1989. — 215 с.
4. *Осинская, Ю. В.* Влияние частоты ИМП, температуры и времени старения на магнитоэластический эффект бериллиевой бронзы БрБ-2 / Ю. В. Осинская, С. С. Петров, А. В. Покоев // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. — 2009 — № 5. — С. 56—63.
5. *Петров, С. С.* Кинетика старения медно-бериллиевых сплавов в постоянном магнитном поле : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / С. С. Петров : ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет». — Самара, 2011. — 20 с.
6. Способ термической обработки деталей из медных сплавов : пат. 2218423 Российская Федерация : МПК С 21 D 1 / 04 / А. В. Покоев, Ю. В. Осинская : опубл. 20.08.03 // Бюл. / Роспатент. — 2003. — № 11.
7. Структурные состояния и магнитные свойства нанокристаллического никеля после интенсивной пластической деформации в шаровой мельнице / А. Е. Перекоп [и др.] // Бернштейновские чтения при термической обработке металлических материалов. — М., 2009. — С. 6.
8. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки и оптимизация ее технологических режимов / Л. М. Акулович [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2016. — № 2. — С. 33—39.

Поступила в редакцию 02.03.2017