



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДШИПНИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье представлены результаты проведенного анализа факторов, влияющих на изменение размеров колец подшипников, выполнен кластерный, дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ результатов исследований с целью выявления наиболее значимых факторов. По результатам обработки экспериментальных данных получены математические модели, позволяющие прогнозировать изменение геометрии колец при термической обработке в зависимости от конструктивных параметров кольца (толщина стенки, наличие канавок под уплотнение, жесткость и т. п.).

Производство подшипников, термическая обработка, тепловые деформации, математическая модель, эксплуатационные свойства изделий.

Изготовление колец подшипников является сложным многоступенчатым технологическим процессом. После тепловой обработки макрогеометрические отклонения кольца могут значительно увеличиться. В связи с этим требуется учитывать возможные изменения размеров на начальном этапе изготовления и в процессе самой термообработки.

Оцинкованная стальная полоса является одним из самых востребованных конструкционных материалов на мировом рынке. Она нашла свое применение в строительстве, автомобилестроении, производстве бытовой техники и многих других отраслях промышленности и хозяйства. Основным свойством оцинкованной стали, определяющим его широкое промышленное использование, является высокая коррозионная стойкость при сохранении всех качеств обычного стального листа.

На сегодняшний день в мире действует около 550 агрегатов оцинкования стального листа, а доля оцинкованного проката в структуре мирового потребления составляет порядка 8–9 % [1]. Российский рынок оцинкованного проката между собой делят три крупнейшие металлургические компании – это ОАО «НЛМК» («Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк), ПАО «Северсталь» («Череповецкий металлургический комбинат», г. Череповец) и ОАО «ММК» («Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск). ПАО «ЧМК» и ОАО «ММК» имеют по два агрегата непрерывного горячего цинкования (АГНЦ), а ОАО «НЛМК» ввел в эксплуатацию уже четвертый агрегат.

К основным технологическим узлам линии непрерывного горячего цинкования (АГНЦ) относятся: механизмы подготовки горячекатаных рулонов (размотка, правка, обрезка концов, сварка в непрерывную полосу); узел предварительной очистки и подготовки

поверхности полосы к нанесению покрытий и узел основной очистки (химическая + электролитическая + мойка + сушка); башенная вертикальная или горизонтальная печь термохимической подготовки поверхности, применяющаяся также для рекристаллизационного отжига полосы; сменные ванны горячего цинкования с расплавами различных составов; воздушные ножи и выходные устройства (промасливатель, ножицы, моталки, весы, упаковка) [1].

В узлах секций прижимных, натяжных и опорных роликов линии непрерывного горячего цинкования применяются различные типы роликовых подшипников. Крупнейшими производителями таких подшипников являются всемирно известные фирмы SNR (Франция, крупнейший европейский бренд), SKF (Швеция, крупнейший мировой производитель подшипников, второй производитель в Европе), FAG (Германия), NSK (Япония, второй по объемам производитель в мире), Timken (США, крупнейший производитель в мире по подшипникам конической группы). Среди российских производителей подшипников для металлургического и прокатного производств это ОАО «Самарский подшипниковый завод», ОАО «Московский подшипник», ОАО «Волжский подшипниковый завод».

Крупнейшим в России производителем подшипников для различных отраслей экономики является ЗАО «ВПЗ» (Вологодский подшипниковый завод, г. Вологда, торговая марка VBF). На его долю приходится до 18% всего объема продукции подшипниковых предприятий в России и свыше 1700 производимых типоразмеров. Вместе с тем перспективными планами развития предприятия предусмотрено освоение новых типов подшипников, в том числе применяющихся в опорах роликовых секций линий непрерывного цинкования. Для этого осуществляется ре-

конструкция и модернизация производства. Одно из ключевых мест в производстве подшипников занимает термическая обработка колец и тел качения.

Основу парка технологического оборудования термического производства ЗАО «ВПЗ» составляют агрегаты типа СИЗа 6/40, СКЗа 8/40 (СССР, Россия). Дополнительно в цехе установлены высокопроизводительные агрегаты МБФА компании «SES» г. Атланта, США.

Российское и американское оборудование применяется для термической обработки колец различных типов подшипников, поэтому возникает необходимость поэтапного пересмотра технологии их изготовления и перераспределения всей номенклатуры обрабатываемых колец между этими видами технологического оборудования.

Во время термической обработки колец подшипников происходит существенное изменение их формы, что может привести к ухудшению качества деталей и изделия в целом. Поэтому основной задачей представленной работы является получение математических моделей для прогнозирования и оценки изменения геометрии колец подшипников при термической обработке для дальнейшей корректировки и совершенствования технологии их производства.

Исследования температурных (тепловых) деформаций колец подшипников проводились в термическом цехе Вологодского подшипникового завода на агрегатах СИЗа (СССР, Россия) №№ 4, 6, 21, 23, 26 и МБФА (США) №№ 24, 25 по режимам, соответствующим действующей нормативно-технической документации.

Исследовались 01 кольца роликовых радиальных самоцентрирующихся, роликовых конических, роликовых радиальных сферических подшипников, с наружным диаметром $150 \div 180$ мм (типы 3517, 3518, 3519, 3520, 2120, 2120, 2121, 2122, 7219).

Сложность эксперимента обусловлена тем, что он проводился на действующем оборудовании в условиях непрерывного производственного цикла, поэтому возможность изменять технологические режимы в широком диапазоне была затруднена.

Перед термообработкой была определена микроструктура колец, измерены геометрические параметры колец, проведен анализ закалочного масла в соответствии с методикой [2].

Термическая обработка колец проведена в соответствии со схемой на рисунке.

Кольца, поступив в термический цех после токарной обработки, дробились в партии в зависимости от нежесткости и типа заготовок.

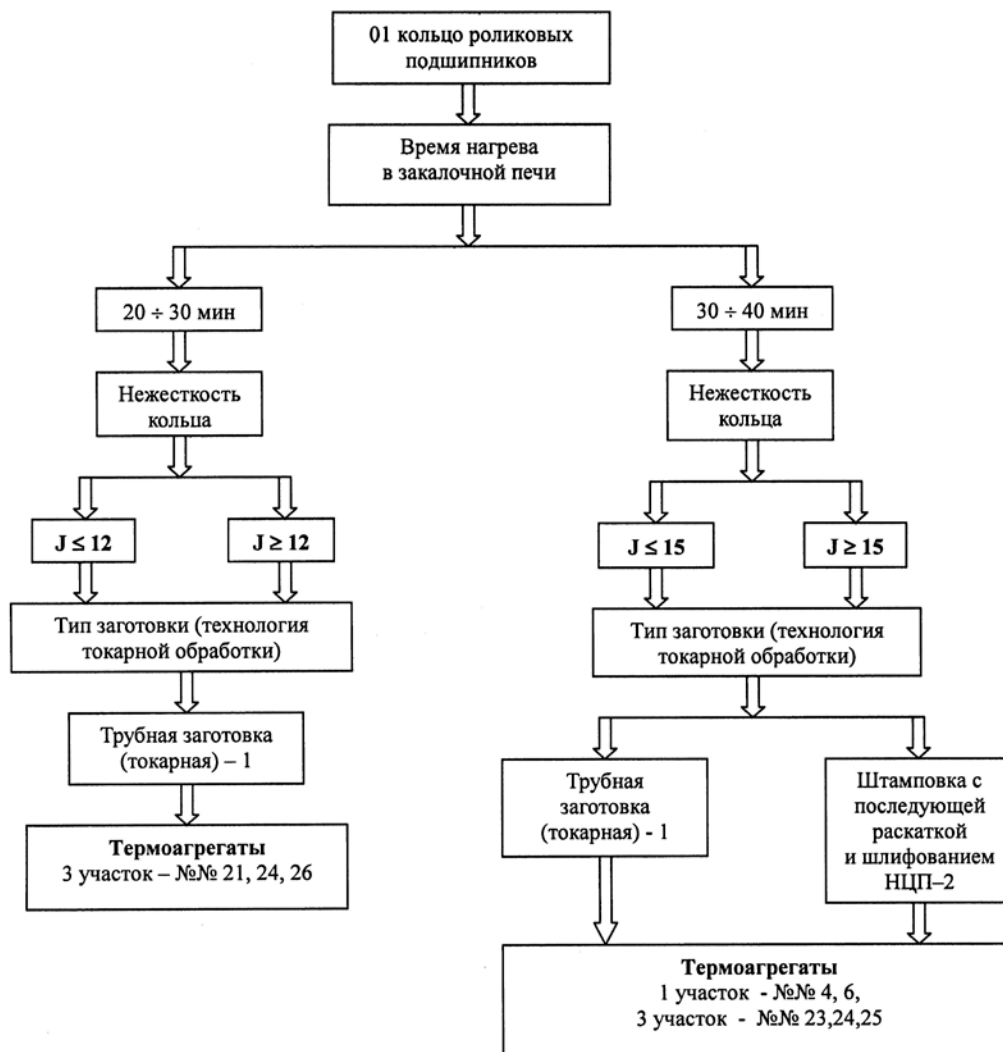


Рис. 1. Схема проведения термической обработки колец

Нежесткость кольца определяется по формуле:

$$J = \frac{d_{нар}}{\left(\frac{d_{нар} - d_{вн}}{2}\right)},$$

где $d_{нар}$ – наружный диаметр кольца;

$d_{вн}$ – внутренний диаметр кольца.

По полученным значениям нежесткости определялась допустимая овальность по таблице НТД «Допустимая овальность термически обработанных наружных колец по наружному диаметру. Охлаждение со свободным падением или качением».

Далее кольца партиями направлялись для загрузки в термоагрегаты. Объем выборки для агрегатов МБФА – 50 ÷ 60 шт., для СИЗа – 70 ÷ 80.

После термической обработки кольца контролировались по НЦП, диаметру дорожки качения, диаметру борта.

Обработка результатов исследований проводилась с помощью пакета прикладных программ STATISTICA 6.0 в следующей последовательности: кластерный анализ, дисперсионный анализ, корреляционный анализ, регрессионный анализ. Для расчетов была составлена матрица переменных (табл. 1).

Применение в исследованиях кластерного анализа позволило классифицировать и систематизировать большой объем информации для дальнейшей обработки статистических данных.

Иерархическая структура объединения переменных в кластеры по принципу создания древовидной диаграммы даёт основание предполагать некоторую связь между следующими переменными, объединенными в кластеры:

- тип заготовки, кислотное число;
- кинематическая вязкость масла, исходная микроструктура;

Эти два кластера, в дальнейшем, объединялись в следующий кластер, содержащий исходную микроструктуру, кинематическую вязкость масла, тип заготовки, кислотное число, нежесткость кольца. Отдельное место занимают номинальный диаметр кольца и температура масла, объединенные в самостоятельный кластер.

Применение процедуры кластеризации позволило объединить изучаемые параметры следующим образом:

- первый кластер включает номинальный диаметр кольца и температуру масла;
- второй кластер включает кинематическую вязкость масла, исходную микроструктуру;
- третий кластер включает тип заготовки, кислотное число, нежесткость кольца.

Применение процедуры дисперсионного анализа в исследованиях позволяло изучать каждый фактор, представленный в таблице 1, управляя значениями других факторов, и обнаружить эффекты взаимодействия между факторами, и позволяя проверять более сложные гипотезы.

Корреляционный анализ обеспечил выявление факторов, влияющих на температурные деформации при соответствующем объеме выборки. Так, степень значимости фактора определялась коэффициентом корреляции > 0,33 для агрегата МБФА и > 0,22 для агрегата СИЗа. Пример корреляционной матрицы для конуса кольца для агрегата СИЗа показан в таблице 2.

Таблица 1

Матрица переменных

№	Параметр после т/о	Переменная								
		var 1	var 2	var 3	var 4	var 5	var 6	var 7	var 8	var 9
1	Н. предел по НЦП	Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
2	В. предел по НЦП	Y2	X9	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
3	Конус по НЦП	Y3	X10	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
4	Овал по НЦП	Y4	X11	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
5	Рост (усадка) по НЦП	Y5	X12	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Обозначение переменных										
	Параметр							Ед. изм.	Обознач.	
1	Нижний предел по НЦП до т/о							мкм	X1	
2	Верхний предел по НЦП до т/о							мкм	X9	
3	Конус по НЦП до т/о							мкм	X10	
4	Овал по НЦП до т/о							мкм	X11	
5	Макс. диаметр кольца до т/о							мм	X12	
6	Ном. диаметр кольца							мм	X2	
7	Тип заготовки (техпроцесса): 1 – труба, 2 – штамповка							-	X3	
8	Температура закалочного масла							°С	X4	
9	Нежесткость кольца							-	X5	
10	Кинематическая вязкость масла							мм ² /сек	X6	
11	Кислотное число закалочного масла							-	X7	
12	Показания неразрушающего контроля (исх. структура)							μА	X8	
13	Частота вращения вентилятора (для агрегатов СИЗа)*							мин ⁻¹	X13	

*Регулировка скорости охлаждения на агрегатах МБФА не осуществлялась. Давление масла в форсунках закалочного бака является постоянным, настраивается при пуске агрегата в эксплуатацию, последующих ремонтных работах и контролируется специалистами.

Таблица 2

Корреляционная матрица

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
Y1	0.23	0.40	-0.29	0.25	-0.40	0.28	0.11	0.40	0.40

Матрица ротации факторов (овал по НЦП (для агрегата МБФА))

	Вариант		Факторы		
	var	Y			
1	var 1	Y4	0,20915	0,78526	-0,08494
2	var 2	X11	0,20247	0,88774	-0,24135
3	var 3	X2	0,99054	0,31730	0,13987
4	var 4	X3	-0,27804	-0,39518	0,99297
5	var 5	X4	0,65691	-0,31899	0,79576
6	var 6	X5	-0,97262	0,20423	0,50903
7	var 7	X6	-0,63919	0,84055	-0,14691
8	var 8	X7	0,19610	0,97586	0,98179
9	var 9	X8	0,96058	0,40062	0,07003

Из таблицы следует, что на конус, получаемый при т/о на термоагрегате СИЗа, оказывают влияние значения всех факторов, кроме X7 (кислотное число закалочной среды).

С учетом влияния на исследуемые показатели довольно большого числа переменных, характеризующих процесс термической обработки и качество заготовки, в работе в качестве инструмента исследований принят метод главных компонент с последующим механизмом процедуры факторного анализа.

После проведения процедуры главных компонент с массивом исходных данных, включающих 9 независимых переменных, получены 3 главных компоненты, на 90% описывающие состояние системы, объекта исследований.

Для возможно более правильной интерпретации главных компонент и получения в последующем математических моделей изучаемого процесса в терминах обобщенных факторов была проведена процедура факторного анализа, сущность которой – выделение из множества измеряемых характеристик объекта новых факторов, более адекватно отражающих свойства объекта исследований, и возможность их интерпретаций.

Используя предусмотренные факторным анализом приемы по обработке обширных массивов входных переменных, после вращения полученного факторного пространства, составлена матрица 3-х основных факторов (табл. 3 – подчеркнуты весомые признаки), по результатам которой выполнена следующая интерпретация основных факторов:

1-й фактор – включает в себя влияние номинального диаметра кольца и структуры заготовки до термической обработки, т.е. интерпретируется как фактор исходного геометрического и структурного состояния колец;

2-й фактор – определяется овалом кольца по наружной цилиндрической поверхности кольца подшипника (НЦП) до термической обработки и характеристиками закалочного масла (кинематическая вязкость и кислотное число), т.е. интерпретируется как фактор закалочной среды (условий закалки) и несовершенства геометрии колец;

3-й фактор – определяется температурой закалочного масла, т.е. является фактором технологических режимов закалки.

Далее, исходя из полученной после вращения факторного пространства матрицы основных факторов, можно построить уравнение модели технологического процесса в терминах обобщенных факторов.

Например, овал НЦП 01 кольца после термической обработки на агрегате МБФА описывается следующим уравнением в нормированных значениях главных факторов:

$$Y4 = 0,209 (X2, X5, X9) + 0,785 (X11, X6, X7) - 0,085 (X3, X7).$$

Уравнение 1-й степени связи выходного показателя (овал НЦП) с факторами состояния:

$$Y4 = 0,209 f_1 + 0,785 f_2 - 0,085 f_3.$$

Полученную зависимость можно интерпретировать следующим образом: для уменьшения овала НЦП при термической обработке факторная модель предписывает в первую очередь определить возможность снижения всех факторов f_1 и f_2 и увеличения всех факторов f_3 , т.е. исходя из физики процесса термообработки необходимо:

во-первых, уменьшение размерности таких показателей, как номинальный диаметр кольца, закалка колец со структурой предварительной термической обработки (отжиг) близкой к 1-му баллу, уменьшение нежесткости колец, кинематической вязкости и кислотного числа, овал по НЦП до термообработки;

во-вторых, увеличение размерности таких параметров, как тип заготовки, кислотное число закалочного масла.

Здесь необходимо сделать несколько замечаний:

- номинальный диаметр и нежесткость колец определяются их конструкцией и являются величинами, заданными для данного типа;

- одновременно увеличивать или уменьшать кислотное число закалочного масла невозможно, так как при его увеличении прокаливаемость кольца ухудшается (что приводит к браку колец п/ш), а вместе с тем уменьшается овал кольца. Согласно НТД кислотное число должно стремиться к 0, поэтому данный параметр следует отнести к факторам f_2 . Для стабильности процесса кинематическая вязкость масла также должна лежать в пределах, установленных НТД (ТУ 38.101135-88);

- тип заготовки в выбранной системе обозначений представляется как: 1 – трубная заготовка, 2 – штампованная заготовка, т.е. уравнение модели предписывает, что предпочтительней является штамповка, а, следовательно, для колец подшипника, к которым предъявляются более высокие требования качества, необходимо делать выбор в пользу кузнечной обработки заготовок. Остальные модели приведены в таблице 4.

Результаты факторного анализа

№	Агрегат	Параметр	Группы факторов						
			1		2		3		
1	СИЗа	Конус по НЦП	Y3	0,611	X2, X5, X8	0,441	X6, X7	-0,201	X10, X3
	МБФА		Y3	0,183	X2, X5, X8	0,914	X10, X6	-0,0001	X3, X7
2	СИЗа	Овал по НЦП	Y4	0,104	X2, X5, X8	-0,339	X6, X7	0,704	X3
	МБФА		Y4	0,209	X2, X5, X8	0,785	X11, X6, X7	-0,085	X3, X7
3	СИЗа	Рост (усадка) по НЦП	Y5	0,107	X12, X5, X8	-0,143	X6, X7	0,922	X4
	МБФА		Y5	0,683	X12, X2, X7, X8	0,165	X5, X6	0,061	X3

После проведения процедуры факторного анализа методом наименьших квадратов были подобраны регрессионные соотношения, связывающие основные тепловые (температурные) деформации (овал, конус, рост/усадка) с параметрами процесса.

Степень адекватности (весомости) модели оценивали по скорректированному по числу степеней свободы коэффициенту детерминации $R - sq$ ($0,5 \div 0,8$). Чем больше его значение, тем выше степень адекватности уравнения регрессии.

Получены следующие соотношения:

конус кольца, мкм:

на агрегате МБФА

$$Y = -2,36X_7 + 0,07X_7^2 - 16,99X_3 - 5,67X_3^2 - 0,12X_4 - 0,0006X_4^2 - 6,99X_6 - 0,13X_6^2 + 2,51X_7X_3 - 0,013X_7X_4 - 0,14X_3X_4 - 0,09X_7X_6 - 0,63X_3X_6 - 0,006X_4X_6,$$

на агрегате СИЗа

$$Y = -3,34X_1 - 0,002X_1^2 - 4,85X_2 - 0,03X_2^2 - 77,92X_3 - 25,97X_3^2 - 2,39X_4 - 0,012X_4^2 + 10,48X_5 + 0,36X_5^2 - 0,12X_6 - 0,0009X_6^2 - 5,46X_8 - 2,46X_9 - 0,05X_9^2 - 0,09X_1X_2 - 1,51X_1X_3 - 1,2X_2X_3 - 0,12X_1X_4 - 0,02X_2X_4 - 0,87X_3X_4 + 1,01X_1X_5 + 0,19X_2X_5 - 1,35X_3X_5 + 0,05X_4X_5 + 0,05X_1X_6 - 0,01X_2X_6 - 0,28X_3X_6 - 0,01X_4X_6 + 0,07X_5X_6 + 0,38X_1X_8 + 0,16X_2X_8 + 10,08X_3X_8 + 0,4X_4X_8 - 4,77X_5X_8 + 0,019X_6X_8 - 0,03X_1X_9 - 0,01X_2X_9 - 0,47X_3X_9 - 0,07X_5X_9 - 0,002X_6X_9 + 0,06X_8X_9,$$

рост/усадка кольца после термической обработки, мкм:

на агрегате МБФА

$$Y = 0,08X_3 + 0,0004X_3^2 - 0,53X_4 - 0,18X_4^2 - 24,51X_5 - 0,45X_5^2 - 0,006X_3X_4 + 0,002X_3X_5 - 0,02X_4X_5,$$

на агрегате СИЗа

$$Y = 3,4X_3 - 0,13X_3^2,$$

овал кольца по наружной цилиндрической поверхности кольца подшипника (НЦП), мкм:

на агрегате МБФА

$$Y = 6,18X_1 + 0,01X_1^2 + 212,83X_3 + 70,94X_3^2 + 29,83X_8 - 0,02X_8^2 + 2,53X_1X_3 - 0,23X_1X_8 - 12,82X_3X_8,$$

на агрегате СИЗа

$$Y = 2,49X_1 + 0,008X_1^2 + 5,0X_2 - 0,03X_2^2 - 41,46X_3 - 13,82X_3^2 + 10,56X_5 + 0,37X_5^2 - 129,01X_7 - 1243,65X_7^2 + 11,28X_8 - 0,3X_8^2 - 2,49X_9 - 0,006X_9^2 - 0,08X_1X_2 + 2,82X_1X_3 - 0,71X_2X_3 - 1,2X_1X_5 + 0,2X_2X_5 - 0,08X_3X_5 + 4,0X_1X_7 - 1,35X_2X_7 + 193,3X_3X_7 - 10,54X_5X_7 - 0,12X_1X_8 + 0,18X_2X_8 + 1,59X_3X_8 - 2,24X_5X_8 + 11,28X_7X_8 + 0,03X_1X_9 - 0,01X_2X_9 - 0,27X_3X_9 + 0,07X_5X_9 - 0,56X_7X_9 + 0,07X_8X_9,$$

где X_1 – нижний предел по НЦП до т/о, мкм; X_2 – номинальный диаметр кольца, мм; X_3 – тип заготовки (техпроцесса); X_4 – температура закалочного масла, °C; X_5 – нежесткость кольца; X_6 – кинематическая вязкость масла, мм²/сек; X_7 – кислотное число закалочного масла; X_8 – исходная структура заготовки (по

показаниям неразрушающего контроля), μА; X_9 – верхний предел по НЦП до т/о.

Таким образом, в ходе проведенных исследований были получены уравнения регрессии, позволяющие установить связи между изменениями геометрических параметров колец подшипника после термической обработки и влияющими на их изменение входными факторами для оптимизации технологического процесса производства подшипников.

Так, например, для стабилизации процесса образования тепловых деформаций особое внимание следует обратить на качество закалочной среды (кинематическая вязкость масла, наличие примесей и т. д.), исходную структуру заготовки. При выборе заготовки кольца подшипника, особенно если к нему предъявляются высокие требования, выбор следует делать в пользу заготовки, прошедшей кузнечную обработку (штамповку). Качество масла в закалочном баке необходимо жестко контролировать и поддерживать его состояние в пределах требований, установленных ТУ 38.101135-88, или иных регламентирующих документов.

Полученные модели позволяют прогнозировать изменение геометрии колец при термической обработке в зависимости от конструктивных параметров кольца (толщина стенки, наличие канавок под уплотнение, нежесткость и т. п.). Поэтому их можно использовать при назначении припусков на механическую обработку в зависимости от типоразмера кольца.

Выводы. Исследование и моделирование процессов образования температурных (тепловых) деформаций при производстве подшипников актуально при разработке и оптимизации технологических процессов термической обработки.

Возможность прогнозирования изменения геометрии колец при наличии большого количества факторов, влияющих на процесс образования температурных (тепловых) деформаций, заслуживает особого внимания в инженерной практике.

Литература

- Субботина, Ю. М. Технологические особенности агрегатов непрерывного горячего цинкования стальной полосы / Ю. М. Субботина, Л. В. Родионова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. – 2016. – Т.16. – № 1. – С. 112–119.
- Бормосов, Н. А. Экспериментальные исследования тепловых деформаций при термической обработке колец подшипников / Н. А. Бормосов // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин приборов и оборудования: материалы XII междунар. научн.-техн. конф. – Вологда : ВоГУ, 2017. – С. 44–48.

N.A. Bormosov, Y.R. Osipov, D.V. Martynenko
Vologda State University

**MODELING OF HEAT-INDUCED DEFORMATIONS FORMATION PROCESS IN PRODUCTION OF
BEARINGS FOR METALLURGICAL EQUIPMENT**

The article presents the results of the analysis of the factors affecting the change in bearing rings size; a cluster, dispersion, correlation and regression analysis of the research results is performed in order to identify the most significant factors. Based on the results of the experimental data processing, mathematical models which make it possible to predict a change in the geometry of the rings during heat treatment depending on the design parameters of the ring (wall thickness, the presence of grooves for sealing, non-rigidity, etc.) have been obtained.

Bearing production, heat treatment, heat-induced deformations, mathematical model, exploitation properties of the components.