

УДК 621.78.044.7

ТЕХНОЛОГИЯ БЕЗДЕФОРМАЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

В.Н. ПУСТОВОЙТ, Ю.В. ДОЛГАЧЕВ

(Донской государственный технический университет)

Рассмотрена возможность использования внешнего магнитного поля для одновременной реализации резервов упрочнения и устранения коробления тонкостенных деталей кольцевой формы за счет инициирующего влияния магнитного поля на мартенситное превращение в интервале сверхпластичности.

Ключевые слова: термическая обработка сталей, магнитное поле, тонкостенные детали, коробление, упрочнение, мартенсит напряжения, сверхпластичность.

Введение. Промышленное освоение метода термической обработки в магнитном поле как способа реализации резервов упрочнения машиностроительных материалов выполнено на ряде предприятий [1]. Для этого создано специализированное технологическое оборудование для получения постоянного магнитного поля, необходимая оснастка, выполнена оптимизация режимов термической обработки в магнитном поле (ТОМП) и предложена соответствующая контрольно-управляющая аппаратура, позволяющая с заданной степенью точности осуществлять эти режимы в цеховых условиях.

Термическую обработку в магнитном поле целесообразно использовать при единовременной поштучной обработке, например, с нагревом токами высокой частоты изделий типа тел вращения. Для мелких деталей возможна групповая обработка, но при соблюдении одинаковой ориентации каждого изделия по отношению к направлению поля [2].

При термической обработке деталей машин и инструмента, кроме обычной задачи обеспечения высокого комплекса механических и эксплуатационных свойств, возникает проблема, обусловленная короблением изделий в процессе термообработки и необходимостью проведения операций рихтовки, которые осуществляются, как правило, вручную и требуют существенных трудозатрат.

При решении проблем улучшения комплекса механических и эксплуатационных свойств и устранения дефектов (коробления) применительно к условиям термической обработки тонкостенных деталей кольцевой формы основное внимание уделяется созданию оборудования и оснастки для нагревания изделий, обеспечивающих их равномерный прогрев, создание условий для закалки и транспортировки в охлаждающую среду. Все это, несомненно, важно и тем не менее не решает полностью проблему устранения коробления, особенно тонкостенных деталей кольцевой формы.

В настоящей работе показана техническая возможность использования энергии постоянного магнитного поля для «внутренней» правки изделий в процессе операций термической обработки в температурном интервале проявления сверхпластичности превращения с применением специальной оснастки, что позволяет практически устранить деформации и коробление тонкостенных деталей кольцевой формы.

Методика исследования. Для проведения экспериментальных работ осуществлены подбор и компоновка оборудования для создания магнитного поля, оснастки для нагревания, охлаждения и регистрации температуры в процессе ТОМП, а также лабораторной установки для осуществления идеи бездеформационной ТОМП.

Исследование возможности практического использования технологии ТОМП проводилось на дисковых прорезных фрезах из стали Р6М5, испытывающих при термообработке значительное коробление.

При выборе характера и напряженности магнитного поля для проведения исследований руководствовались, прежде всего, интересами производства, а именно возможностью использования такого поля в промышленных установках для ТОМП. В связи с этим в работе показана возможность и область использования постоянного магнитного поля напряженностью до 2,4 МА/м (30000 Э), которое легко может быть реализовано в установках промышленного типа. Влияние стационарного магнитного поля на превращения при закалке очень быстро возрастает с увеличением напряженности магнитного поля [1-5]. Поэтому эффективнее всего проводить закалку при напряженности магнитного поля, существенно превышающей величину поля магнитного насыщения сплава. В связи с этим в основу определения параметров электромагнита и его конструктивного решения, исключающего большие потери на рассеивание магнитного потока, было положено возбуждение поля напряженностью порядка 1600 кА/м (20000 Э), которое необходимо, чтобы преодолеть размагничивающий фактор мелких ферромагнитных частиц (мартенсита).

Результаты эксперимента и их обсуждение. Для термической обработки в магнитном поле образцов и деталей кольцевой формы конструкция электромагнита с полюсными наконечниками малопригодна, так как не обеспечивает равномерного распределения магнитного потока по периметру детали. Кроме того, при реализации любой схемы намагничивания кольцевой детали в зазоре между полюсами не учитывается внешний размагничивающий фактор. По этой причине использовался коаксиальный магнит (рис.1, а), специально предназначенный для обработки кольцевых деталей с нагревом в печи или токами высокой частоты. Особенностью коаксиального электромагнита является то, что обрабатываемая деталь (кольцевой образец) является частью магнитопровода. В такой конструкции устраняется внешний размагничивающий фактор кольцевого образца, а магнитный поток распространяется в магнитном зазоре равномерно.

Для коаксиального варианта электромагнита можно считать, что величина магнитного потока в магнитопроводе и в зазоре одинаковы. Это позволяет рассчитать катушку электромагнита исходя из принятого значения напряженности магнитного поля.

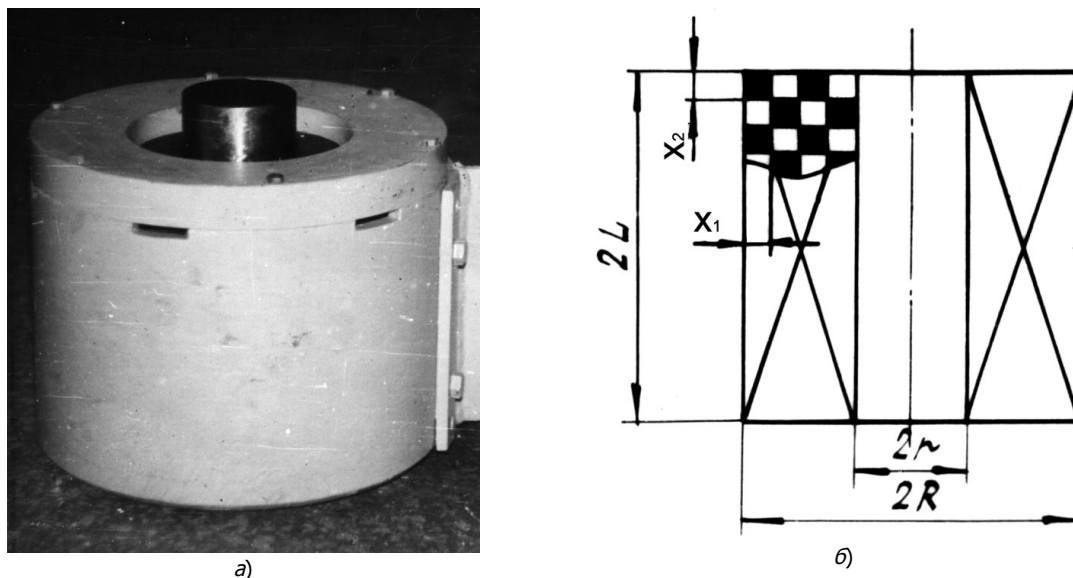


Рис.1. Вид коаксиального электромагнита (а) и схема к расчёту его катушки (б)

В соответствии с рекомендациями работы [6], определены параметры катушки (рис.1, б) $(R-r) \cdot 2L$, $\alpha = \frac{R}{r}$, $\beta = \frac{L}{r}$ и выбрано сечение провода. Расчётные параметры катушки приведены в табл.1, основные технические и эксплуатационные характеристики электромагнита – в табл.2.

Таблица 1

Расчётные параметры катушки

Параметр	Численное значение
Внешний радиус R , мм	162
Внутренний радиус r , мм	40
Длина $2L$, мм	230
Коэффициент α	4,02
Коэффициент β	3,12
Допускаемая плотность тока I , А/мм ²	$3 \cdot 10^6$
Удельное сопротивление ρ , Ом·см	$1,75 \cdot 10^{-6}$
Число витков N	1000
Коэффициент заполнения λ	0,83
Коэффициент поля F	3,05
Коэффициент Фабри G	0,17
Вес Q , Н	1250

Таблица 2

Характеристики коаксиального электромагнита

Характеристика	Численное значение
Марка провода	ПСД
Сечение провода, мм ²	Шина 5,9×2,4
Сопротивление катушки, Ом	1
Рабочий ток, А	30
Номинальное число ампервитков, А·вит	30000
Напряженность магнитного поля в радиальном зазоре 2÷5 мм, кА/м	Не менее 1600
Потребляемая мощность при номинальном токе, Вт	1800

По приведенным ниже формулам определены количество витков N , коэффициент заполнения медью λ , сопротивление катушки R' , коэффициент поля $F(\alpha, \beta)$, коэффициент Фабри $G(\alpha, \beta)$.

$$N = \frac{R-r}{x_1} \cdot \frac{2L}{x_2}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{f_m}{f_{n.з.}}, \quad (2)$$

где f_m – сечение провода; $f_{n.з.}$ – сечения витка с учётом изоляции и межвитковых промежутков.

$$R = \frac{Q \cdot N \cdot D}{f_m}, \quad (3)$$

где Q – вес катушки; D – средний диаметр катушки.

$$F(\alpha, \beta) = 0,4\pi\beta \cdot \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 - \sqrt{1 + \beta^2}}, \quad (4)$$

$$G(\alpha, \beta) = 0,2 \sqrt{\frac{2\pi\beta}{\alpha^2 - 1}} \cdot \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 - \sqrt{1 + \beta^2}}, \quad (5)$$

$$H_0 = \frac{F(\alpha, \beta)}{2r\beta(\alpha - 1)} \cdot N \cdot J, \quad (6)$$

где I – сила тока в обмотке.

$$H_0 = G(\alpha, \beta) \sqrt{\frac{\lambda}{\rho \cdot r}} \cdot \sqrt{W}, \quad (7)$$

где ρ – удельное сопротивление; W – мощность.

Напряженность магнитного поля была измерена прибором ИМИ-3 в радиальном зазоре 2 и 5 мм. При этом в качестве замыкающего звена магнитопровода устанавливался диск из стали 45 соответствующего диаметра. Результаты измерения напряженности приведены в табл.3.

Таблица 3

Напряженность магнитного поля и мощность электромагнита

J , А	$N \cdot J$, кА·вит	Параметр H_0 , кА/м в зазоре l_0		W , кВт
		2 мм	5 мм	
10	10	800	720	0,45
20	20	1400	1250	1,1
30	30	1800	1600	1,8
40	40	1950	1740	2,6

В качестве источника питания коаксиального электромагнита применялся выпрямитель, состоящий из двух блоков – силового и управления, – собранных на самостоятельных шасси. Питание выпрямителя осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В. Конструктивно силовой блок и блок управления выпрямителя собраны в одном корпусе, на лицевой панели которого (рис.2) размещены органы управления и приборы для контроля режима работы.

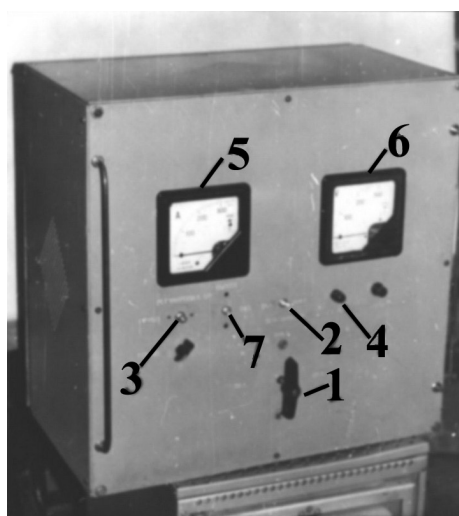


Рис.2. Общий вид выпрямителя: 1 – рукоятка пакетного переключателя; 2 – тумблер подачи напряжения на электромагнит; 3 – потенциометры регулирования тока в цепи; 4 – предохранитель; 5 – амперметр контроля постоянного тока; 6 – вольтметр контроля постоянного напряжения; 7 – тумблер включения вентилятора для охлаждения диодов

Выпрямитель настроен для создания магнитного поля в зазоре между обрабатываемым инструментом и сменным кольцом магнитопровода порядка 1600 кА/м. Однако в случае необходимости изменения режима работы по напряженности поля предусмотрено регулирование тока в обмотке электромагнита, осуществляемое потенциометрами, шпиндели которых находятся под лицевой панелью корпуса.



Рис.3. Установка коаксиального электромагнита на траверсе прессы для закалки с заневоливанием

При термической обработке в магнитном поле тонкостенных кольцевых деталей возможно коробление их периферийной части во время закалочного охлаждения, обусловленное наличием между нижней поверхностью обрабатываемой детали и поверхностью оправки магнитного потока рассеяния. Последний приводит к созданию электромагнитной силы, осевая составляющая которой оказывает воздействие на периферийную часть кольцевой детали, вызывая ее коробление. Поэтому для закалки в магнитном поле тонкостенных деталей требуется её заневоливание в прессе (рис.3). Этот вариант обработки был реализован на заводе «Аксайкардандеталь». Для того чтобы исключить коробление детали и обойтись без использования прессы, был создан коаксиальный электромагнит, выполненный из двух частей, образующих при смыкании камеру, в месте разъема которой размещен полюсный наконечник (рис.4, а). В результате магнитный поток симметрично проходит через деталь (рис.4, б), что исключает её коробление из-за действия магнитного поля и кроме того, деталь оказывается заневоленной непосредственно в магнитном поле.

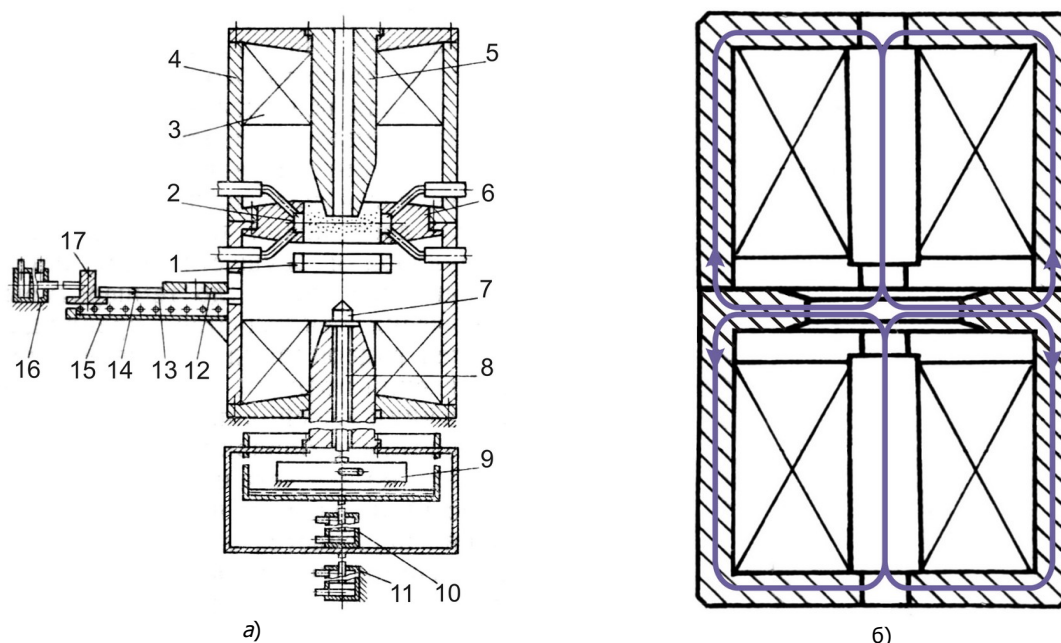


Рис.4. Установка для ТОМП тонкостенных деталей кольцевой формы при индукционном нагреве (а) и схема магнитного потока, проходящего через деталь (б)

Установка для ТОМП тонкостенных кольцевых деталей содержит индуктор 1, полюсный наконечник 6 со спреером 2, разъемный электромагнит с обмотками 3, магнитопровод которого состоит из двух П-образных частей 4, сердечники 5, оправку 7 с механизмом вращения, бак для слива закалочной жидкости, загрузочный и транспортирующий механизмы. Загрузочный механизм состоит из раздвижных планок 1, соединенных пружиной 14, направляющих 15, гидроцилиндра 16, предназначенного для перемещения детали с позиции загрузки на подготовительную, и крышки 17 нижней части магнитопровода.

Транспортирующий механизм выполнен в виде двух последовательно соединенных гидроцилиндров 10 и 11, предназначенных для перемещения детали 12 с подготовительной позиции на позицию нагрева и с позиции нагрева на позицию закалочного охлаждения в магнитном поле. Корпус гидроцилиндра 11 жестко связан с фундаментом, а его шток — с гидроцилиндром 10 и рамой. Последняя, в свою очередь, соединена с нижним сердечником, а шток гидроцилиндра 10 — с баком для слива закалочной жидкости. Механизм вращения представляет собой закрепленную водяную турбинку 9 с валом 8 из немагнитного материала, на котором расположена оправка 7.

После установки детали 12 на раздвижные, соединенные пружиной 14 планки 13 загрузочного механизма включается гидроцилиндр 16, и начинается цикл обработки. Движение штока гидроцилиндра 16 приводит к перемещению детали с позиции загрузки на подготовительную позицию, в зазор между сердечниками электромагнита. По окончании движения штока гидроцилиндра 16, в результате которого деталь оказывается расположенной на одной оси с вращающимся валом 5 водяной турбины 9, включается гидроцилиндр 10, перемещающий вал 5 с оправкой 7 в направлении позиции нагрева, к индуктору. В результате этого деталь оказывается размещенной на посадочной поверхности оправки. После достижения детали позиции нагрева включается питание индуктора и осуществляется нагрев периферийной части обрабатываемой детали до температуры закалки. Затем нагрев автоматически отключается, прекращается вращение детали, включается гидроцилиндр 11, перемещающий нижний сердечник в направлении позиции охлаждения, к спрееру. В процессе движения сердечник своей конической поверхностью раздвигает планки 13 и, достигнув оправки 8, перемещает последнюю вместе с установленной на ней деталью и другими соединенными с ней элементами с позиции нагрева на позицию охлаждения. Здесь включается магнитное поле, а затем и спреерное охлаждение. По окончании цикла ТОМП производится выключение спреера, питания электромагнита, возвращение с помощью гидроцилиндров 10 и 11 обработанной детали на подготовительную позицию, а с помощью гидроцилиндра 16 — в исходное положение.

Разработанная установка позволяет проводить не только двухпозиционную (нагрев детали на одной позиции — в индукторе, охлаждение в поле на другой — в спреере), но и однопозиционную обработку (магнитную или обычную закалку с магнитным или обычным электро- или самоотпуском). В этом случае индукторно-спреерное устройство помещается в зазор коаксиального электромагнита и все процессы термической обработки осуществляются на одной позиции. Целесообразность использования на практике однопозиционной термической обработки обусловлена воздействием магнитного поля на фазовые превращения при закалке и отпуске, а также возможностью целенаправленного изменения с помощью магнитного поля глубины проникновения индукционного тока.

Реализация такой схемы термической обработки дисковых фрез позволила устранить коробление, обеспечить благоприятное соотношение механических свойств, повысить сопротивление усталости, уменьшить трудоемкость изготовления благодаря резкому сокращению затрат на операции правки. Возможности термической обработки в магнитном поле обусловлены тем, что микрообъемы аустенита с ближним спиновым порядком, воспринимая энергию внешнего магнитного поля через магнитострикционные напряжения, в условиях сверхпластичного аустенита, изменяют поля упругих сил в микрообъемах атомной решетки матрицы и этим способствуют сниже-

нию энергетического барьера для образования зародышевого центра критического размера выше температуры M_n [5]. Структурные напряжения являются результатом фазового наклёпа при мартенситном превращении из-за разницы удельных объёмов ΔV мартенсита и аустенита, причём $\Delta V = V_M - V_A > 0$. Релаксация этих напряжений при закалке в магнитном поле осуществляется как по бездиффузионному механизму за счёт сдвиговой деформации сверхпластичного аустенита, так и по диффузионному механизму в результате реализации первых стадий распада мартенсита на напряжения, кристаллы которого образуются выше M_n и испытывают распад «in statu nascendi». Кроме этого релаксации способствуют ориентированность структуры мартенсита после закалки в поле [7] и повышение дисперсности кристаллов.

Установка для закалки в магнитном поле изделий дисковой формы прошла промышленную апробацию в ЗАО «РЗ СИТО». Установка применялась для термической обработки дисковых фрез из стали Р6М5 диаметром до 280 мм и представляла собой двойной коаксиальный электромагнит для возбуждения постоянного магнитного поля напряженностью 1600 кА/м. Воздействие магнитным полем в температурном интервале сверхпластичности стали в процессе образования мартенсита напряжения и охлаждения позволяло производить бездеформационную закалку изделий за счёт «внутренней» правки [8] изделия и снижения уровня структурных напряжений по причине распада мартенсита в период закалочного охлаждения.

В результате было установлено, что указанное мероприятие экономически целесообразно, так как применение магнитной закалки исключает необходимость закалки под прессом, повышает эксплуатационную стойкость фрез в 1,6-1,8 раза и сокращает расход фрезы на 1000 обработанных деталей с 0,12 до 0,081 штук.

Выводы. Созданы технологические основы метода бездеформационной упрочняющей термической обработки в магнитном поле деталей кольцевой формы. Возможность такой обработки возникает благодаря тому, что в температурном интервале $M_n - M_{dl}$ когда аустенит становится сверхпластичным, под действием магнитного поля происходит образование мартенсита напряжения в нанобъемах аустенита с ферромагнитным упорядочением. При этом возникает структурная картина, обеспечивающая релаксацию напряжений превращения за счёт повышения дисперсности кристаллов мартенсита, направленности их вдоль вектора магнитного потока и распада твёрдого раствора «in statu nascendi», кроме того, происходит макромасштабное «заневоливание» детали под действием магнитного поля. Использование установки для термической обработки в магнитном поле позволяет улучшить структурное состояние тонкостенных деталей кольцевой формы в связи с интенсификацией развития мартенситного превращения, исключить появление коробления на всех этапах термической обработки и тем самым устранить необходимость использования прессы или проведения последующей операции рихтовки.

Библиографический список

1. Пустовойт В.Н. Физические и технологические основы термической обработки в магнитном поле: автореф. ... д-ра техн. наук / В.Н. Пустовойт. – Минск: ФТИ АН БССР, 1980. – 40 с.
2. Бернштейн М.Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М.Л. Бернштейн, В.Н. Пустовойт. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
3. Пустовойт В.Н. Термодинамика, механизм и кинетика фазовых переходов в стали в условиях действия внешнего магнитного поля / В.Н. Пустовойт // Вестн. Донс. гос. техн. ун-та. – 2005. – Т.5. – №3. – С.427-447.
4. Пустовойт В.Н. Исследование механизма образования зародышей мартенсита при закалке в магнитном поле / В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачёв // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №3. – С.4-7.
5. Пустовойт В.Н. Особенности протекания мартенситного превращения в стали при закалке в постоянном магнитном поле / В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачёв // Вестн. Донс. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т.7. – №4. – С.459-465.

6. Монтгомери Д.В. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов / Д.В. Монтгомери. – М.: Мир, 1971. – 159 с.

7. Неустойчивость кристаллической решетки перед мартенситным превращением и влияние внешнего магнитного поля в этих условиях / В.Н. Пустовойт [и др.] // Вестн. Донс. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 9. – №2. – С.238-248.

8. Сверхпластичность стали в температурном интервале $M_d - M_n$ как стимул для «внутренней» магнитной правки / В.Н. Пустовойт [и др.] // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. науки – 2006. – №6. – С.42-46.

Материал поступил в редакцию 01.04.2011.

References

1. Pustovojt V.N. Fizicheskie i texnologicheskie osnovy` termicheskoy obrabotki v magnitnom pole: avtoref. ... d-ra texn. nauk / V.N. Pustovojt. – Minsk: FTI AN BSSR, 1980. – 40 s. – In Russian.

2. Bernshtejn M.L. Termicheskaya obrabotka stal`ny`x izdelij v magnitnom pole / M.L. Bernshtejn, V.N. Pustovojt. – М.: Mashinostroyeniye, 1987. – 256 s. – In Russian.

3. Pustovojt V.N. Termodinamika, mexanizm i kinetika fazovy`x perexodov v stali v usloviyax dejstviya vneshnego magnitnogo polya / V.N. Pustovojt // Vestn. Dons. gos. texn. un-ta. – 2005. – T.5. – #3. – S.427-447. – In Russian.

4. Pustovojt V.N. Issledovanie mexanizma obrazovaniya zarody`shej martensita pri zakalke v magnitnom pole / V.N. Pustovojt, Yu.V. Dolgachyov // Uprochnyayushhie texnologii i pokry`tiya. – 2007. – #3. – S.4-7. – In Russian.

5. Pustovojt V.N. Osobennosti protekaniya martensitnogo prevrashheniya v stali pri zakalke v postoyannom magnitnom pole / V.N. Pustovojt, Yu.V. Dolgachyov // Vestn. Dons. gos. texn. un-ta. – 2007. – T.7. – #4. – S.459-465. – In Russian.

6. Montgomeri D.V. Poluchenie sil`ny`x magnitny`x polej s pomoshh`yu solenoidov / D.V. Montgomeri. – М.: Мир, 1971. – 159 s. – In Russian.

7. Neustojchivost` kristallicheskoj reshyotki pered martensitny`m prevrashheniem i vliyanie vneshnego magnitnogo polya v e`tix usloviyax / V.N. Pustovojt [i dr.] // Vestn. Dons. gos. texn. un-ta. – 2009. – T. 9. – #2. – S.238-248. – In Russian.

8. Sverxplastichnost` stali v temperaturnom intervale $M_d - M_n$ kak stimul dlya «vnutrennej» magnitnoj pravki / V.N. Pustovojt [i dr.] // Izv. vuzov. Sev.-Kavkaz. region. Texn. nauki. – 2006. – #6. – S.42-46. – In Russian.

UNSTRAIN TEMPERING TECHNOLOGY IN MAGNET SPACE OF THIN-WALLED RING ITEMS

V.N. PUSTOVOIT, Y.V. DOLGACHEV

(Don State Technical University)

The availability of the external magnetic field for the simultaneous embodiment of hardening reserves and strain elimination of thin-walled ring items at the expense of the magnetic field initiating effect on the martensitic transformation within the range of superplasticity is considered.

Keywords: steel thermal treatment, magnetic field, thin-walled items, hardening strain, hardening, stress-assisted martensite, superplasticity.