

$$\sigma_y = k_{\sigma y} \left(\frac{DI_y}{I_{0y}} \right). \quad (25)$$

У формулах (18)– (25) коефіцієнти $k_{ex}, k_{ey}, k_{e1}, k_{e2}, k_{sx}, k_{sy}, k_{s1}, k_{s2}$ визначаються на тарувальних експериментах.

Висновки

1. Теоретично обґрунтовано математичні основи експериментально-розрахункового оптичного методу визначення НДС, який базується на ефекті дифузного поверхневого розсіювання.
2. Одержано формули для розв'язання лінійних та двовірних задач.

Література

1. Пат. АС СССР, М5 кл G01 В 11/16. Способ определения деформаций поверхности / Рудяк Ю.А. – № 1716317 от 01.11.1991.
2. Пат. АС СССР, М5 кл G01 В 11/18. Способ определения напряженно-деформированного состояния объекта / Рудяк Ю.А., Пизар В.Г. – № 1668860 от 08.04.1991.
3. Малезик М.П. Метод фотопружності в двовірних динамічних задачах механіки анізотропних тіл : автореферат дис. на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук / М. П. Малезик. – Львів, 2008. – 36 с.

Надійшла 16.11.2012 р.

УДК 621.787.4-47:539.319

Т.Ф. АРХИПОВА

Винницький національний технічний університет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ ВНУТРЕННИХ КОЛЕЦ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ ПОСЛЕ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ПРОТЯГИВАНИЯ

В роботі наведено результати експериментальних досліджень процесу деформуючого протягування заготовок з метою зміцнення та надання сприятливої технологічної спадковості робочим поверхням шарикоподшипників. Процес деформуючого протягування слід виконувати із забезпеченням інтенсивності деформації на жолобі внутрішнього кільця в границях $e_i \leq 0,07$.

Ключові слова: пластичне деформування, технологічна спадковість, зміцнення, твердість.

The paper contains the results of experimental research of the process of work pieces deforming drawing in order to strengthen and provide favourable technological heredity of operating surfaces of ball bearings. The process of deforming drawing must be carried out providing deformation intensity on the spout of internal ring within the limits of $e_i \leq 0.07$.

Процесс деформирующего протягивания получает всё более широкое распространение. Холодное пластическое деформирование поверхностного слоя металла без снятия стружки повышает эксплуатационные свойства деталей, значительно снижает их себестоимость. В ряде случаев этот способ обработки является единственным экономически оправданным методом, позволяющим получить высокую чистоту и точность геометрической формы обработанной детали.

Постановка проблемы. Исследование напряженно-деформированного состояния при деформирующем протягивании необходимо для оценки энергосиловых параметров процесса. Представляет также интерес изучение технологического наследия в виде остаточных напряжений, упрочнения (мерой которого примем твердость), деформируемости заготовок в процессе протягивания, уровня накопленных деформаций, прочности изделий в процессе эксплуатации.

Анализ последних исследований. Следует отметить, что число работ, посвященных решению этих задач, продолжает оставаться незначительным. Особенно это касается работ, направленных на изучение прочности изделий в процессе эксплуатации. Так, при достижении определённого уровня пластических деформаций, после последующей термической обработки формируется структура с различным размером зерна. Нас будет интересовать тот уровень деформаций (обеспечивается натягом при протягивании), который после термообработки дает размер зерна, обеспечивающий прочность изделия в процессе эксплуатации.

Основные работы в области изучения напряженно-деформированного состояния выполнены в работах [1, 2]. Однако в этих работах введен ряд упрощающих предположений, главное из которых заключается в идентичности процесса деформирующего протягивания и раздачи трубного проката внутренним давлением, что не всегда обосновано. Особый интерес представляют результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния при деформирующем протягивании, проведенные в работе [2]. Наиболее полная работа, посвященная изучению механики

процесса деформирующего протягивания, выполнена О. А. Розенбергом [3], однако и в этом исследовании отсутствует информация о связи напряженно-деформированного состояния и размера зерна после холодной пластической деформации и последующей термообработки.

Целью настоящей работы является установление влияния параметров процесса деформирующего протягивания внутренних колец шарикоподшипников на эксплуатационную прочность изделий.

Методика проведения эксперимента

Изучение деформированного состояния проведено на реальных кольцах подшипников при деформирующем протягивании методом измерения твердости. Напряженное состояние рассмотрено на составных образцах из различных материалов. Образцы изготовлены из двух половин в виде призм длиной 150 мм, шириной 80 мм и толщиной 40 мм. Отожжённые призмы шлифовали и полировали. На одну из граней наносили алмазной иглой прямоугольную сетку с шагом 0,2 мм с помощью специального приспособления, установленного на инструментальном микроскопе. После нанесения сетки призмы составляли полированными поверхностями внутрь и крепили друг к другу. Составные призмы обтачивали до получения цилиндрической поверхности диаметром 70 мм и запрессовывали с натягом во втулку длиной 100 мм и наружным диаметром 95 мм. В полученной заготовке обрабатывали отверстие необходимой точности и шероховатости под протягивание.

На рис. 1 представлен эскиз составного образца. Протягивание указанных образцов осуществляли на гидравлическом прессе инструментом, изготовленным из твердого сплава ВК15 с углом заборного конуса деформирующих элементов 5 и 10 градусов, диаметром 36 мм и инструментом со сферической рабочей поверхностью диаметром 28,5 мм. Эскизы рабочих элементов деформирующей протяжки представлены на рис. 2. Режимы протягивания приведены в таблице.

На установившейся стадии деформирования, когда усилие протягивания оставалось постоянным, процесс прекращали. Затем разрезали обойму и извлекали инструмент. Искажённую делительную сетку фотографировали, а другую половину образца шлифовали и полировали для последующего измерения твердости. Измерение твердости в узлах делительной сетки с шагом 0,1 мм в радиальном направлении и шагом 0,2 мм в осевом направлении производили на приборе ПМТ-3 под нагрузкой на индентор 200 Г. При выбранной нагрузке обеспечивается четкий отпечаток с размерами диагоналей, превосходящими размеры отдельных структурных составляющих, что позволяет считать результаты измерений среднестатистической твердостью в рассматриваемой точке исследуемого образца.

Таблица 1

Режимы протягивания образцов

№ п/п	Марка стали	Угол заборного конуса, град	Натяг, мм	Смазка
1	20X	Сфера	1.4	Сульфидфрезол
2		5	1.2	Сульфидфрезол
3		10	0.6	Сульфидфрезол
4		5	0.6	без смазки
5		5	0.6	Сульфидфрезол
6	45	5	0.6	Сульфидфрезол
7	ШХ15	5	0.6	Сульфидфрезол

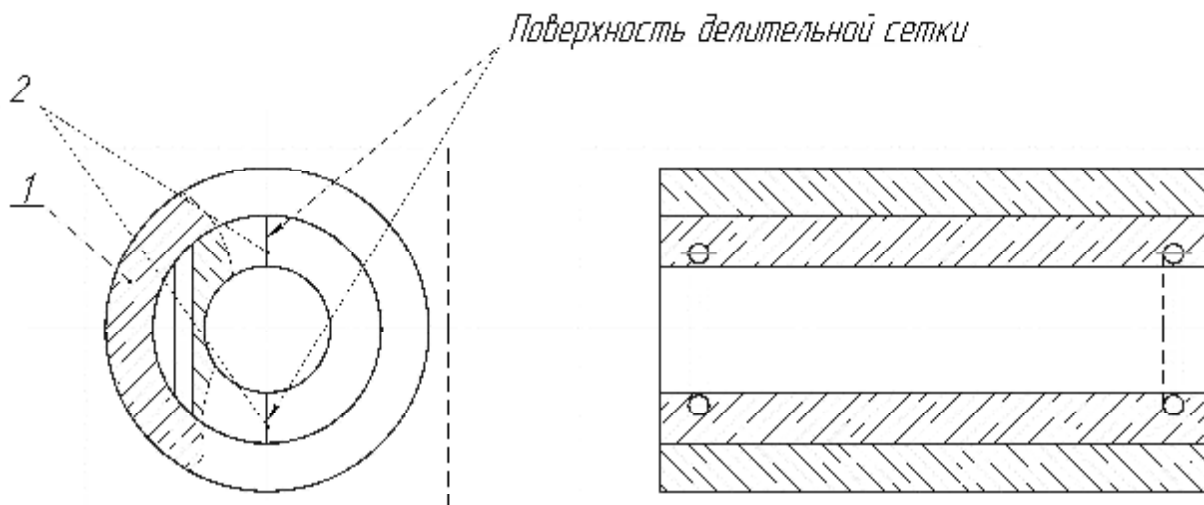


Рис. 1. Эскиз составного образца: 1 – обойма, 2 – проекция поверхности с делительной сеткой

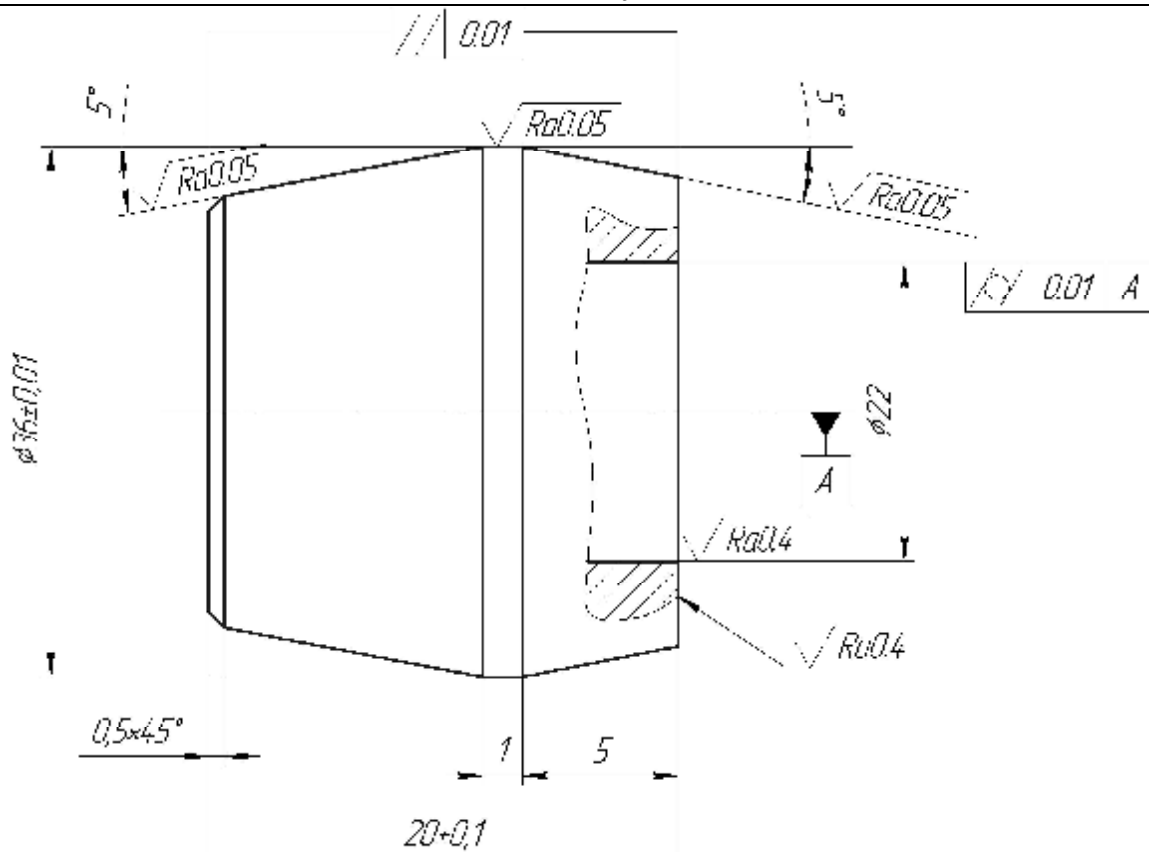


Рис. 2. Эскиз рабочих элементов деформирующей протяжки

Деформированное состояние изучали измерением твёрдости при протягивании внутренних колец шарикоподшипников 204/02 с различными натягами 0.6 – 1.2 – 1.4 мм для различных углов конуса твердосплавной протяжки. До деформирования торцы колец шлифовали и полировали и измеряли исходную твердость на твердомерах Виккерса и ПМТ-3. Кольца с натягами 0.6 – 1.2 – 1.4 мм протягивали на экспериментальном прессе твердосплавной протяжкой с одним кольцом (см. табл.).

Протягивание осуществляли со смазкой при скорости движения инструмента $V_0 = 38,5$ мм/с.

После протягивания кольца разрезали по диаметральному сечению, полученную меридиональную плоскость (две половины) заливали в обойму кольца подшипника эпоксидной смолой. В дальнейшем изготавливали шлифы, которые готовили для измерения твердости. Технология подготовки измеряемой поверхности исследуемых образцов аналогична технологии подготовки шлифов для построения тарировочного графика.

Измерения твердости производили на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 200 Г. Такая величина нагрузки объясняется тем, что при исследовании пластической деформации измерением твердости оценивают макронеоднородность. Поэтому размер диагонали отпечатка при испытании структурно неоднородного металла должен существенно превосходить размеры отдельных структурных составляющих материала.

Следует заметить, что чувствительность твердости к изменению напряжений и деформаций у стали ШХ15 является довольно значительной (HV 1950...2630 МПа). Это позволяет по измеренной твердости и тарировочному графику HV – ϵ , определить интенсивность логарифмических деформаций ϵ , а также интенсивность напряжений (σ) в установившейся стадии пластического деформирования.

Твердость измеряли вдоль различных лучей параллельных оси, совпадающей с осью протягивания (z) и перпендикулярной ей осью r. Количество измерений твердости составляло для двух симметричных половин составило ~ 500 отпечатков.

Обсуждение результатов эксперимента

Распределение твердости в меридиональном сечении протянутых колец позволяет отыскать значение твердости во всей пластической области. По координатам точек r, z отыскивали значение твердости в любой точке осесимметричного тела вращения. В силу симметрии значение твердости, напряжения и деформации от угла ϕ не зависят.

Полученную информацию о твердости в пластической области удобнее представить в виде изосклер-линий равных твердостей, построенных в меридиональном сечении колец шарикоподшипников. Изолинии твердости строили в следующей последовательности.

Значения твердости наносили на вычерченный в масштабе эскиз деформированного образца. Затем строили графики распределения твердости HV вдоль различных лучей г. Отмечали на всех графиках градиент изменения твердости, предположим от 280 до 200 единиц. При построении изолиний HV = 200, HV = 220, HV = 240, HV = 260, HV = 280 на всех графиках HV = f(r), проводят горизонтальные линии HV = 200, HV = 220 и т.д. Точки пересечения указанных линий с графиком дают значения радиуса, соответствующего HV = const. Семейство полученных точек радиуса на эскизе образца образует искомые изолинии.

Подобная статистическая обработка данных эксперимента позволяет в дальнейшем определять твердость, а исходя из тарировочного графика HV – σ_i – ϵ_i соответствующую ей интенсивность напряжений и интенсивность деформаций в любой точке пластической области.

На рис. 3, 4 представлено распределение твердости HV, интенсивности напряжений σ_i , интенсивности деформаций ϵ_i вдоль образующей жёлоба кольца шарикоподшипника, протянутого соответственно по свободной и жесткой схеме. Распределение твердости в пластической области оказалось неравномерным. Максимальное значение твердости оказалось около 2600 МПа, минимальное – 2200 МПа.

В процессе деформирующего протягивания частицы металла подвергаются воздействию различных усилий и могут иметь сложную историю деформирования. В дальнейшем на последующих операциях кольца подвергают термической обработке. Микроструктура металла при этом изменяется, размеры зерен в различных областях кольца, подвергнутого термообработке, оказываются различными. В областях, в которых пластическая деформация были близка к критической, происходит интенсивный рост зерен. Такой металл обладает низкими механическими характеристиками, поэтому при назначении параметров технологического процесса пластического деформирования необходимо выбирать такие режимы деформирования, при которых исключается область деформаций, вызывающих рост зерен металла.

Для оценки критической деформации предложено строить диаграмму рекристаллизации растянутого (или сжатого) металла в координатах “размер зерна – интенсивность логарифмической деформации”. Указанную диаграмму строили по испытанию металла в условиях простейших напряженных состояний, предполагая, что она не зависит от вида напряженного состояния и пути нагружения. В процессах обработки металлов давлением напряженное состояние и нагружение оказываются сложными. В связи с этим возникает вопрос о возможности определения деформаций в таких процессах по диаграмме рекристаллизации металла, подвергнутого деформированию в условиях линейного напряженного состояния.

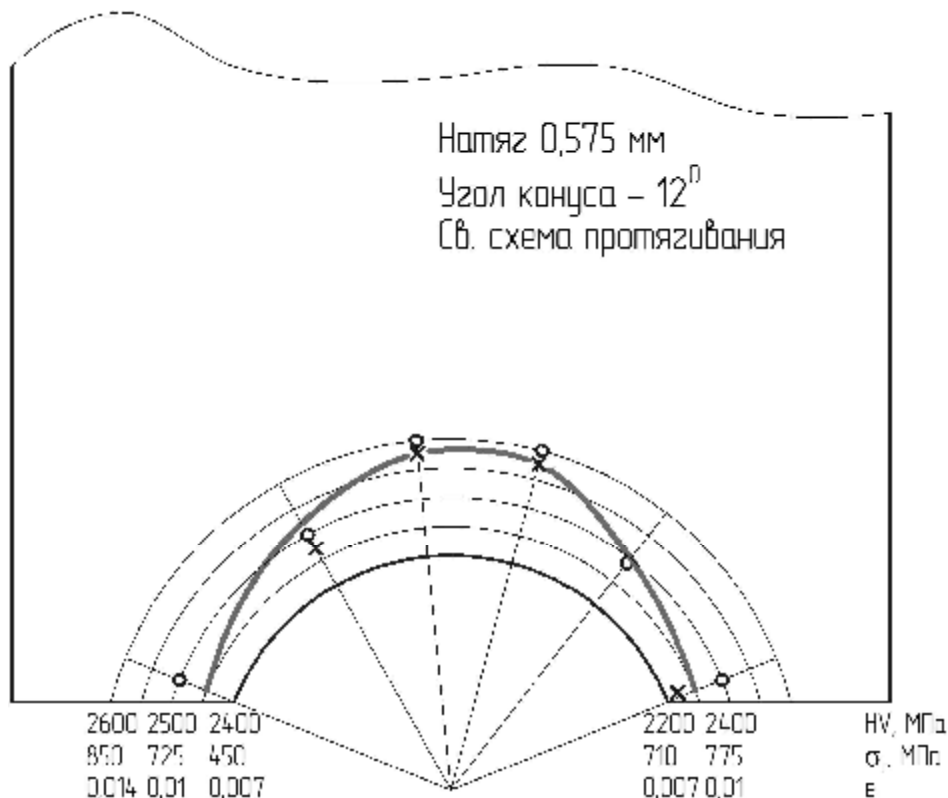


Рис. 3. Распределение твердости HV, интенсивности напряжений σ_i и интенсивности деформаций ϵ_i на жёлобе кольца подшипника: натяг 0,575 мм, угол конуса – 12°, свободная схема протягивания

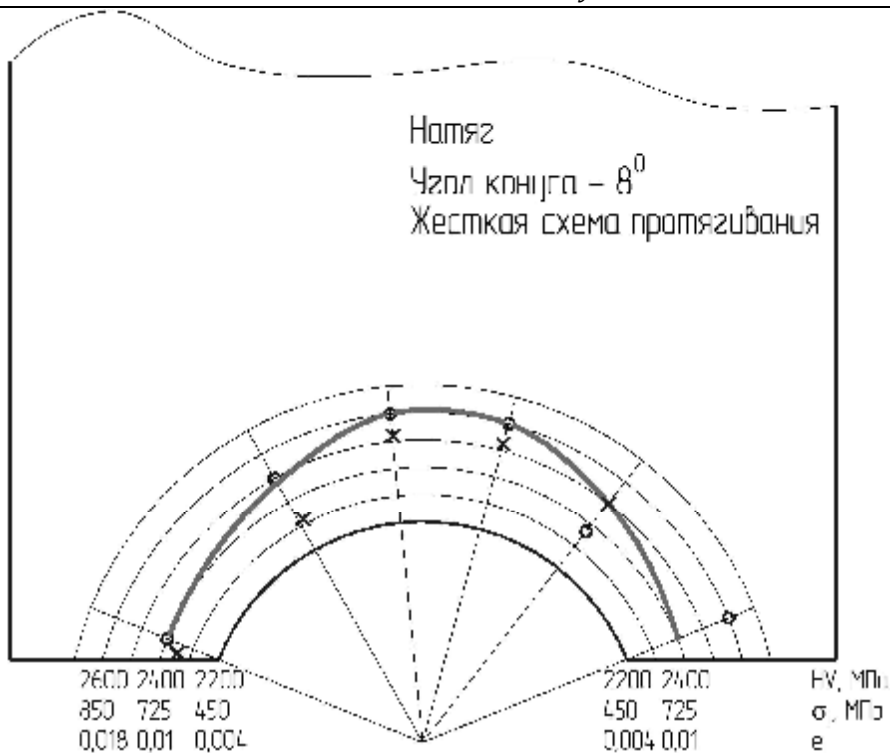


Рис. 4. Распределение твердости HV, интенсивности напряжений σ и интенсивности деформаций ϵ на жёлобе кольца подшипника: натяг 0,95 мм, угол конуса - 8°, жёсткая схема протягивания

Указанные исследования проведены И.Н. Темник в лаборатории Томского политехнического института. На рис. 5 показана диаграмма рекристаллизации стали, построенная при испытании образцов на сжатие со смазкой в условиях линейного напряженного состояния.

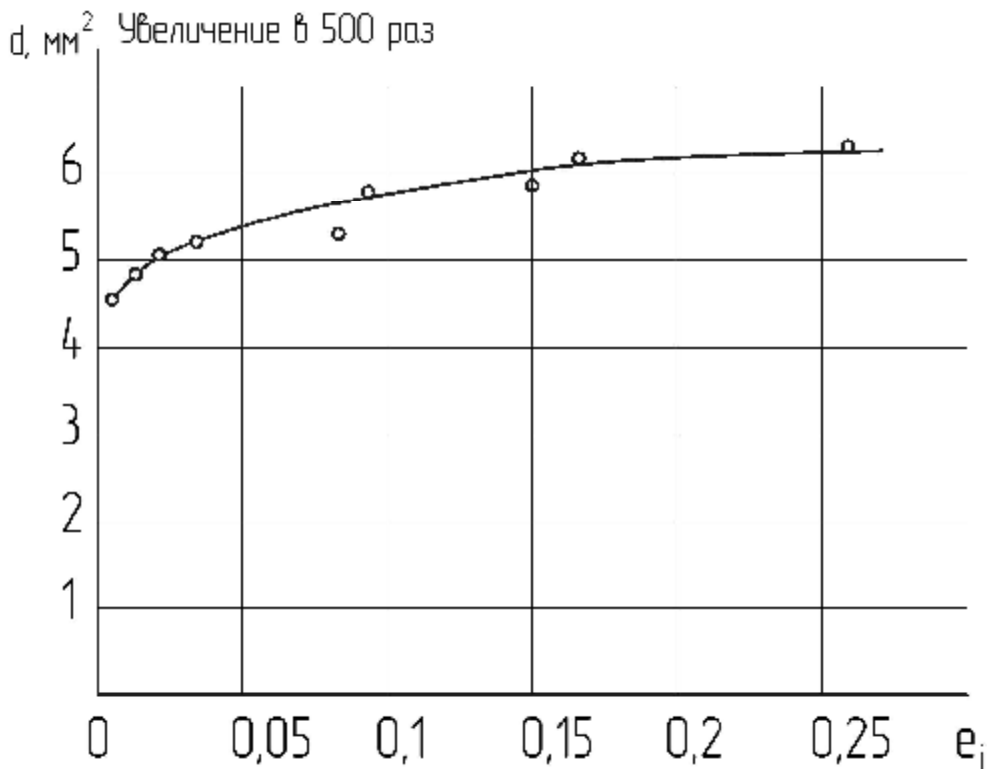


Рис. 5. Диаграмма рекристаллизации стали Ст 3

В работе [7] приведены данные результатов испытания образцов. Таким образом, в работе [7] показано, что диаграмма рекристаллизации является практически единой для линейного и плоского

напряженных состояний, что позволяет по интенсивности деформаций в процессе деформирующего протягивания определить размер зерна после термообработки.

Исследование технологической наследственности проводили на стали ШХ15, подвергнутой предварительному отжигу и в состоянии поставки (неотожжённые образцы). Диаграммы рекристаллизации, таким образом, строили для двух партий образцов – отожженных и неотожженных.

Диаграмму рекристаллизации строили в координатах «размер зерна – интенсивность логарифмической деформации». Построение диаграммы рекристаллизации осуществляли в условиях осесимметричной осадки с тщательной смазкой торцов пастой, состоящей из смеси коллоидного графита и глицерина. Следовательно, в указанных условиях деформирования реализуется линейное напряженное состояние. Образцы осаживали ступенями до различных осадок. На каждой ступени деформирования определяли интенсивность напряжений σ_i и интенсивность логарифмических деформаций e_i :

$$s = \frac{4P}{pd_o^2 \frac{h_0}{h_i}}; \quad e_i = \ln \frac{h_0}{h_i},$$

где P – деформирующее усилие;

d_o, h_o, d_i, h_i – диаметр и высота образцов до и после деформирования соответственно.

После деформирования образцов их подвергали термообработке по режимам аналогичным технологическому процессу закалки внутренних колец шарикоподшипников. В металлографической лаборатории кафедры ТПЗ изготавливали по стандартной технологии шлифы для выявления микроструктуры шлифов, где после травления отчетливо просматриваются границы зерен. Размеры зерен измеряли в 6...8 различных направлениях диаметральных лучей (метод, аналогичный методу секущих). Среднее арифметическое значение этих измерений принимали за размер зерна на данной ступени деформирования. Размеры зерен сопоставили с величиной интенсивности логарифмических деформаций, вычисленной для данной ступени деформирования. На рис. 6, 7 показаны полученные диаграммы рекристаллизации соответственно для отожженных и неотожженных образцов. Из рис. 6, 7 следует, что с ростом степени деформации размер зерна возрастает.

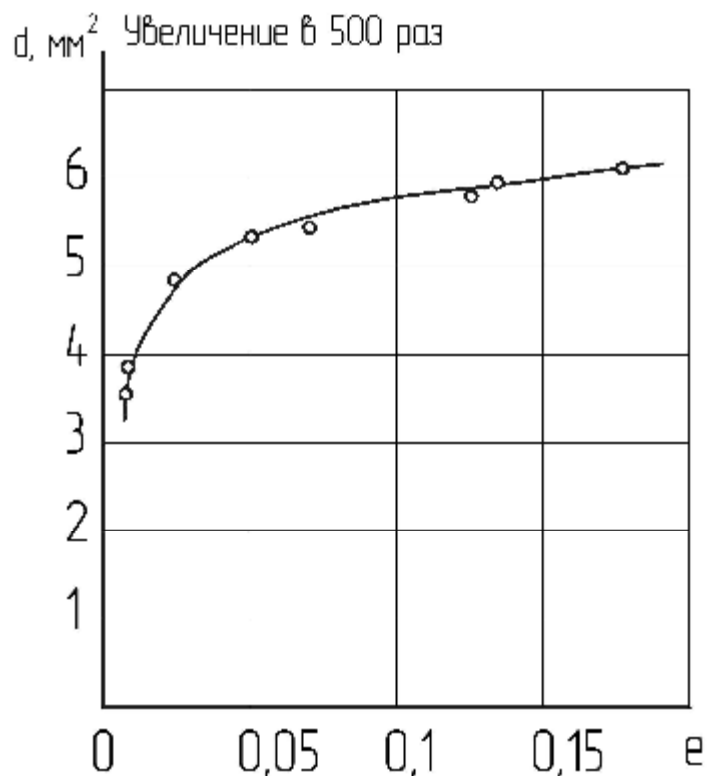


Рис. 6. Диаграмма рекристаллизации стали ШХ-15

Полученные диаграммы позволяют по величине степени деформации e_i , найденной из тарировочного графика «твердость – интенсивность деформации» определять размеры зерен металла внутренних колец шарикоподшипников.

Выводы:

1. Способ обработки отверстия внутреннего кольца шарикоподшипника деформирующим протягиванием обеспечивает благоприятное технологическое наследие (упрочнение, твердость, остаточные напряжения сжатия).

2. При определенных уровнях натягов холодное пластическое деформирование обеспечивает благоприятный рост зерна после термической обработки. При этом процесс деформирующего протягивания следует осуществлять, обеспечивая интенсивность деформации на жёлобе кольца в пределах $\epsilon_i \leq 0,07$.

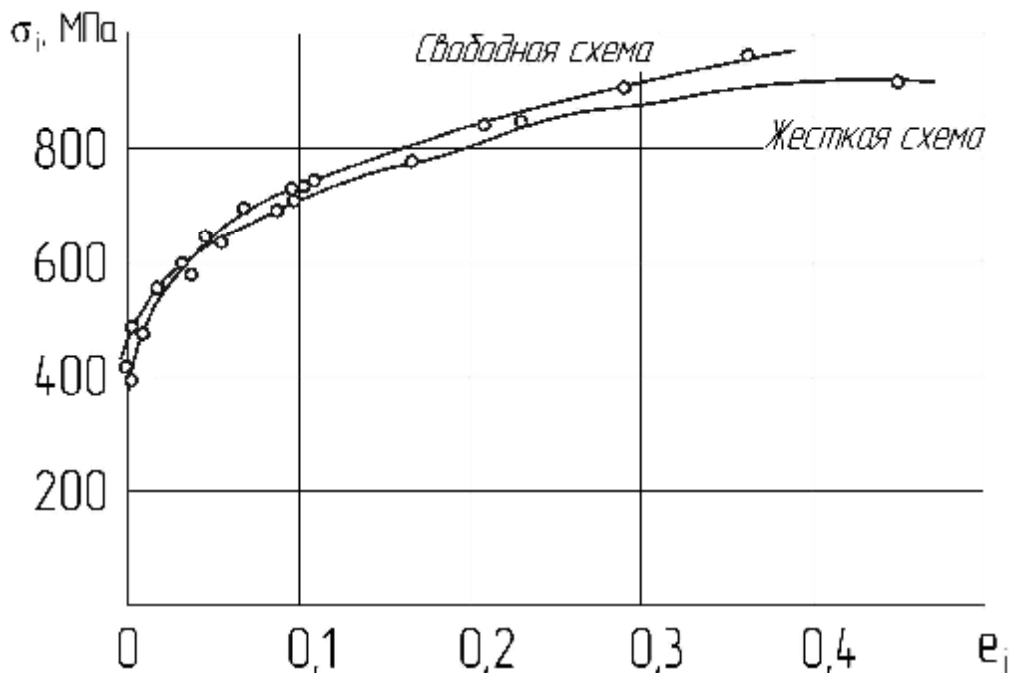


Рис. 7. Диаграмма рекристаллизации стали ШХ-15 (неотожжённые образцы)

Литература

1. Проскуряков Ю. Г. Объёмное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков, В. Н. Романов, А. Н. Исаев. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
2. Зайцев Д. Е. Напряженное состояние при деформирующем протягивании / Д. Е. Зайцев, В. Д. Дель, Г. Д. Дель // Вестник машиностроения. – 1973. – № 6. – С. 63–65.
3. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О. А. Розенберг. – К. : Наукова думка, 1981. – 288 с.
4. Огородников В. А. Повышение качества поверхности внутренних колец шарикоподшипников / В. А. Огородников, В. Д. Дупляк, В. М. Гаврилов // Технология и организация производства. – Киев, 1976. – № 8. – С. 23–28.
5. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 175 с.
6. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. – М. : Металлургия, 1967. – 402 с.
7. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.

Надійшла 16.11.2012 р.
Рецензент: д.т.н. В.А. Огородников