

УДК 621.7.011.001

Огородников В. А.  
Архипова Т. Ф.**КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ**

Мировая тенденция роста требований потребителей к качеству изделий машиностроения, находит своё отражение в металлообработке и, в частности, в обработке металлов давлением. Последние годы прошлого столетия дали убедительные доказательства возможности обеспечения качества и надежности машин с привлечением высоких технологий, включающих такие признаки как наукоёмкость, системность, моделирование, компьютеризацию и ряда других параметров.

Реализация указанных технологий осуществляется с применением достижений как фундаментальных наук, так и прикладных.

Появлению новых методов обработки давлением металлов и материалов со сложной реологией предшествовало ряд проблем: потеря устойчивости пластического деформирования; разрушение металла в процессе его обработки; неумеренный (неконтролируемый) рост зерна после холодной пластической деформации и последующей термообработки; критическая пористость, возникающая в процессе формоизменения порошковых материалов; гофрообразование, связанное с формоизменением листовых материалов. В дальнейшем указанные аномалии будем называть «технологический отказ».

Перечисленные проблемы могут быть решены с помощью интенсивно развиваемой в последнее время феноменологической теории деформируемости, являющейся по существу, новым разделом прикладной теории пластичности. Обзор этих работ изложен в монографиях [1–4].

Применение теории деформируемости для решения технологических задач обработки металлов давлением позволяет дать ответ не только на вопрос – какова предельная степень деформации обрабатываемой заготовки? К этой важной задаче примыкают еще две практически важные и связанные с ней задачи: первая – оценка степени пластичности в тех случаях, когда после операции обработки давлением следует термообработка. Известно, что свойства материала после термообработки находятся в зависимости от степени использования запаса пластичности, полученного на предыдущих операциях. Превышение предельного значения степени использованного запаса пластичности приводит к резкому ухудшению механических свойств материала. Вторая задача состоит в оценке остаточной пластичности полученной детали. Решение этой задачи необходимо для выяснения возможности реализации последующей операции, связанной с пластическим деформированием, а также получением изделий с необходимыми физико-механическими характеристиками.

Кроме того, после обработки давлением заготовок, их часто подвергают отжигу для снятия внутренних напряжений и улучшения структуры металла. Размеры зерен в различных областях отожженных заготовок могут оказываться различными в зависимости от степени деформации. В областях, где пластическая деформация была близкой критической, происходит интенсивный рост зерен. Такой металл обладает низкими механическими характеристиками, что вызывает необходимость назначения режимов деформирования, при которых исключается диапазон деформаций, вызывающих рост зерна. Для оценки критической деформации необходимо располагать диаграммой рекристаллизации растянутого или сжатого металла. Для оценки деформируемости заготовок и обеспечения благоприятной технологической наследственности необходимо знать историю деформирования каждой материальной частицы заготовки, т. е. знать тензорные поля напряжений и деформаций как функцию координат и времени. При решении этой задачи для технологических процессов, сопровождающихся немонотонным деформированием (в таких процессах имеет место активная

и пассивная деформация, проявляется эффект Баушингера) возникают проблемы надежного расчета компонент девиатора напряжений. В этом случае нами привлекаются различные усложненные модели, как например, модель Г. Бакхауза, учитывающая эффект Баушингера [5].

Целью данной работы является разработка способов улучшения качества заготовок, подвергаемых холодному пластическому деформированию на основе прогнозирования технологической наследственности в процессах обработки давлением.

Прогнозирование качества рассмотрено для некоторых технологических задач обработки материалов давлением: 1) изделия типа стержней с шаровыми утолщениями; 2) кольца шарикоподшипников, подвергнутые холодному пластическому деформированию – операции деформирующего протягивания. В последующем для решения этих задач привлекаем диаграммы рекристаллизации.

В процессе холодной пластической деформации ресурс пластичности заготовки приближается к критическому. Во избежание разрушения металла при дальнейшем формоизменении часто прибегают к операции отжига как для снятия внутренних напряжений, снижения упрочнения, а также для улучшения структуры металла. При этом размеры зерен в различных областях отожженной детали могут оказаться различными в зависимости от величины интенсивности деформации. Наглядное представление об этом процессе дает диаграмма рекристаллизации, которую будем представлять в координатах: размер зерна  $d$ , мкм – интенсивность деформаций при различных температурах отжига. В классическом представлении диаграмма рекристаллизации имеет вид, показанный на рис. 1.

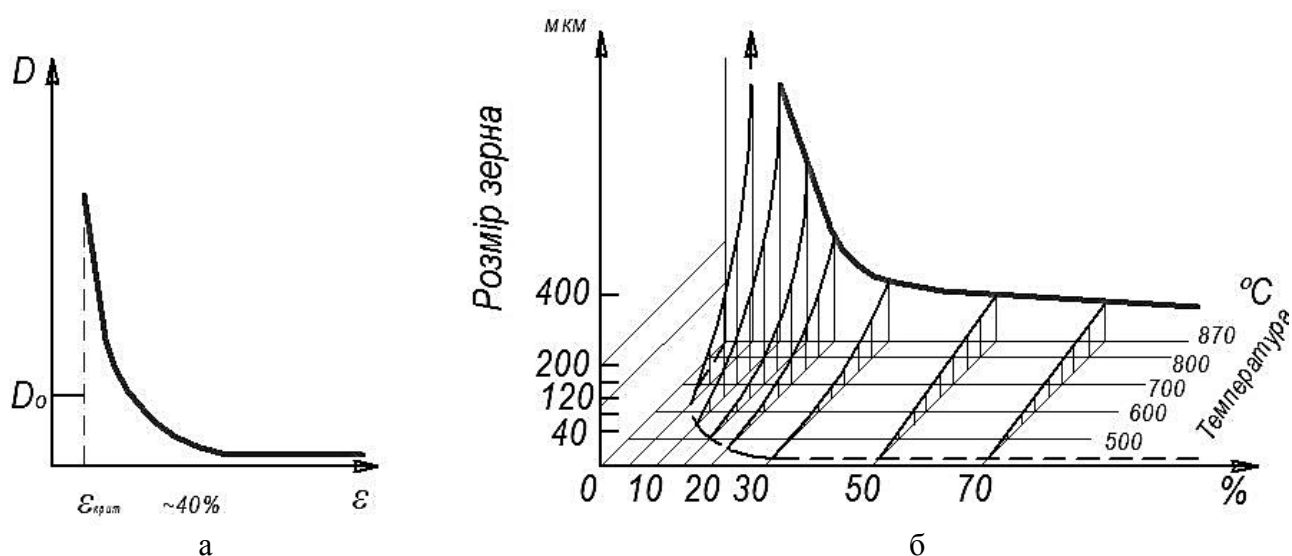


Рис. 1. Зависимость размера зерна  $d$  рекристаллизованного металла от деформации (а) и диаграмма рекристаллизации технически чистого железа (б);  $d_0$  – размер исходного зерна

На рис. 2 представлена диаграмма рекристаллизации стали Ст3, построенная в работе [1] испытанием на осевое растяжение и совместное кручение и растяжение. По вертикальной оси отложен параметр  $d$  – средний условный диаметр зерна стали. По горизонтальной оси отложена интенсивность логарифмической деформации:

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_1 - e_3)^2}. \quad (1)$$

При этом, в условиях кручения и растяжения:

$$e_u = \sqrt{e_z^2 + \frac{\gamma^2}{3}}, \quad (2)$$

где  $e_z = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right)$  – продольная деформация.

Здесь  $l_0$  и  $l_i$  – соответственно рабочая длина до и после деформирования;

$\gamma = (\varphi r)/l$  – относительный сдвиг, где  $r$  – расстояние от рассматриваемой точки сечения до оси образца;

$\varphi$  – абсолютный угол закручивания в радианах.

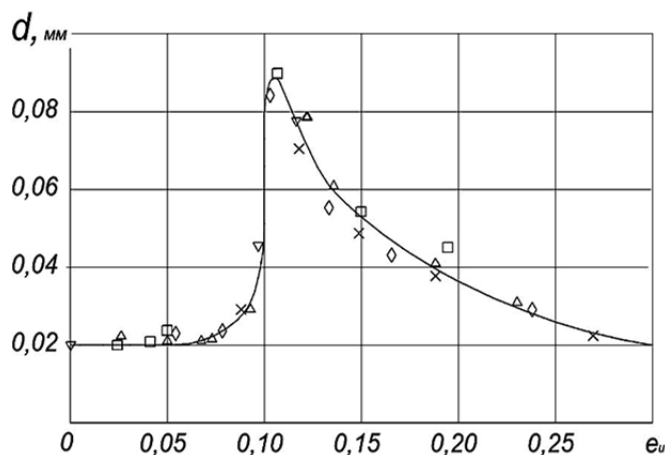


Рис. 2. Диаграмма рекристаллизации стали Ст3

Условия построения диаграммы рекристаллизации: образцы из стали Ст3 диаметром 20 мм отжигали при температуре 840 °С в течение 3 часов с последующим охлаждением. Затем их пластически деформировали до различных степеней деформации и подвергали рекристаллизационному отжигу при температуре  $t = 700$  °С. Шлифы изготавливали механической обработкой с последующим электрополированием. Слой металла при шлифовании был не менее 2...3 мм.

С помощью этой диаграммы определяли размеры зерен по величине интенсивности деформаций при штамповке стали 45 сферических утолщений шаровых пальцев автомобиля в опасной области заготовок.

*1) Изделия типа стержней с шаровыми утолщениями.*

Изделия типа «стержней с шаровыми утолщениями» распространены в различных отраслях промышленности. Применение для их изготовления технологии холодной объемной штамповки позволяет поднять коэффициент использования металла до 93...98 %, снизить трудоемкость и получить значительный экономический эффект. Кроме того, при механической обработке сферических утолщений, в месте перехода сферической поверхности в цилиндрическую сплошность продольных волокон может быть перерезана резцом. Структура в виде полосчатости (текстура), образованная в результате прокатки, нарушается и после термической обработки возникает опасность разрушения готовой детали при её эксплуатации. Однако замена механической обработки на холодную объемную штамповку требует изучения механики формоизменения, в частности, распределения деформаций вдоль радиуса перехода от сферической и цилиндрической поверхности.

В работе [6] изучено напряженно-деформированное состояние при холодной высадке сферических утолщений из стали 45. Деформированное состояние определяли по искажению естественной делительной сетки в виде волокнистой макроструктуры, а также с помощью метода измерения твердости. На рис. 3 показаны изосклеры твердости и изолинии интенсивности деформаций в меридиональном сечении заготовок при холодной высадке шаровых пальцев из стали 45. Используя эти результаты, на рис. 4 показано распределение значения интенсивностей деформаций в соответствии с размером зерна после термической обработки. Диаграмма рекристаллизации показана на рис. 2. Как следует из полученных результатов,

максимальный размер зерна стали, который может привести к поломкам шарового пальца в процессе его эксплуатации, равен 0,04–0,08 мм. Это соответствует интенсивности деформаций вдоль радиуса  $0,08 \leq e_{\text{н}} \leq 0,1$ .

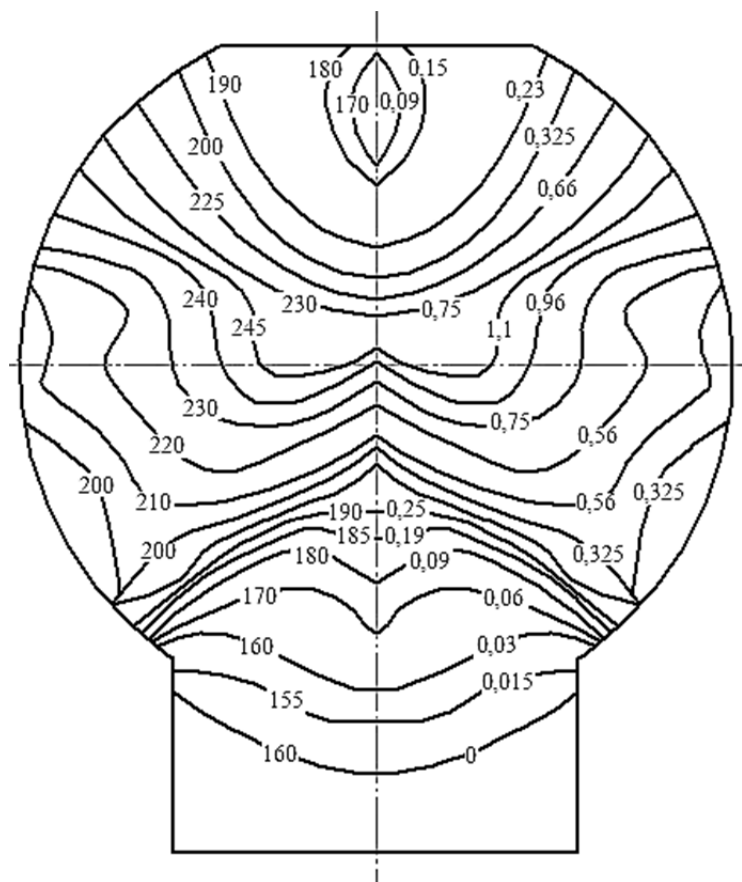


Рис. 3. Изолинии твердости  $HV = \text{const}$  (слева от оси симметрии) и интенсивности деформации  $e_{\text{н}}$  (справа от оси симметрии) в меридиональном сечении сферической заготовки

2) *Кольца шарикоподшипников, подвергнутых холодному пластическому деформированию – операции деформирующего протягивания.*

Деформированное состояние при протягивании изучали в работе [7] измерением твердости 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 (табл. 1).

Таблица 1

Режимы протягивания образцов

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

Протягивание осуществляли со смазкой при скорости движения инструмента  $V_o = 38,5$  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.

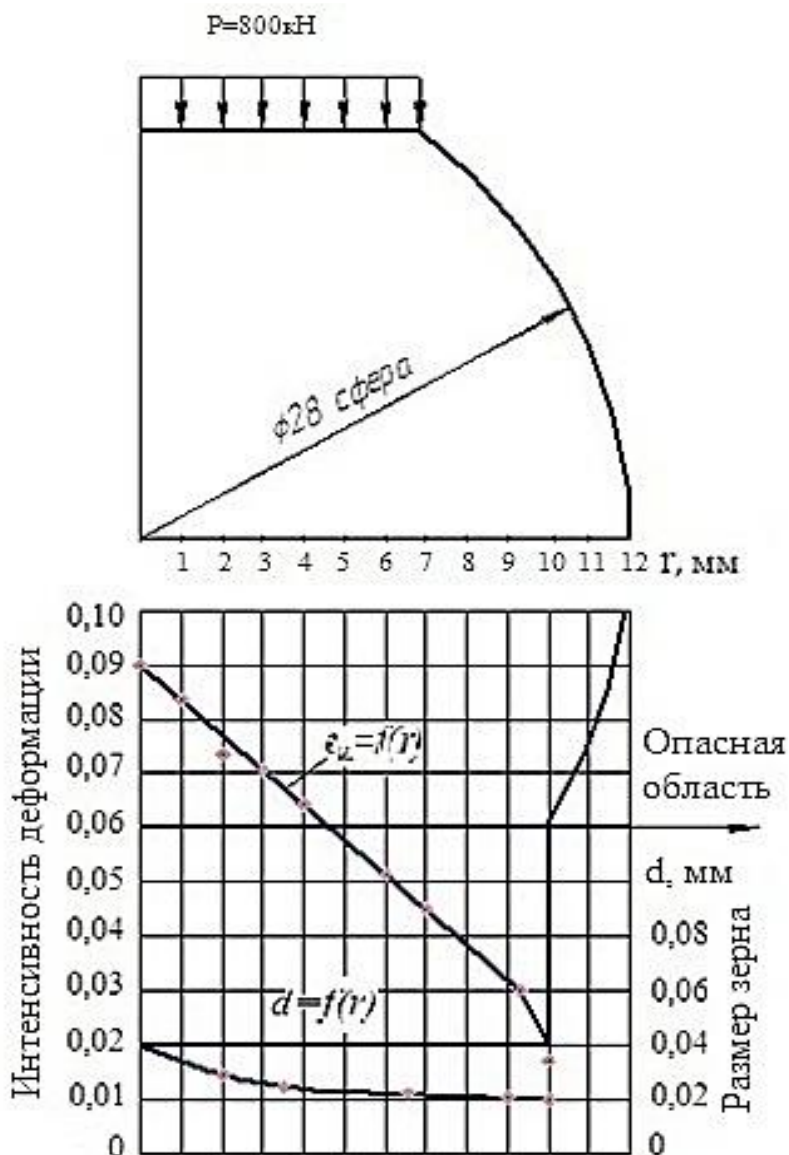


Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций и размер зерна вдоль радиуса опасной области заготовок при холодной высадке шаровых пальцев из стали 45

Измерения твердости производили на микротвердомере ПМТ-3 под нагрузкой 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  $HV - e_u$  определить интенсивность логарифмических деформаций  $e_u$ , а также интенсивность напряжений ( $\sigma_i$ ) 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  $\sim 500$  отпечатков.

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  $\varphi$  не зависят.

Полученную информацию о твердости в пластической области удобнее представить в виде изосклер, построенных в меридиональном сечении колец шарикоподшипников. Изолинии твердости строили в такой последовательности: значения твердости наносили на вычерченный в масштабе эскиз деформированного образца; затем строили графики распределения твердости HV вдоль различных лучей  $r$ . Отмечали на всех графиках градиент изменения твердости. 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 –  $\sigma_u - e_u$  соответствующую ей интенсивность напряжений и интенсивность деформаций в любой точке пластической области.

## ВЫВОДЫ

С помощью диаграмм рекристаллизации можно определять безопасный уровень степени деформации, при которой размер зерна после термической обработки обеспечивает прочность изделия. Так, для шаровых пальцев, этот уровень находится в пределах  $0,08 \leq e_u \leq 0,1$ . Для операций деформирующего протягивания 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  $e_u \leq 0,07$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дель Г. Д. *Технологическая механика* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Колмогоров В. Л. *Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов* / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
3. Огородников В. А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 175 с.
4. Михалевич В. М. *Тензорные модели накопления повреждений : монография* / В. М. Михалевич. – Винница : Универсум – Винница, 1998. – 195 с.
5. Огородников В. А. *Анизотропное пластическое упрочнение цилиндрических заготовок* / В. А. Огородников, А. М. Миколайчук, И. А. Деревенько // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2012. – № 5. – С. 14–17. – (Серія «Технічні науки»).
6. Огородников В. А. *Деформации и напряжения при холодной высадке заготовок в сферических матрицах* / В. А. Огородников, И. К. Букин-Баширова, И. О. Сивак // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1977. – № 4. – С. 11–14.
7. Архипова Т. Ф. *Технологическая наследственность внутренних колец шарикоподшипников после деформирующего протягивания* / Т. Ф. Архипова // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2012. – № 6. – С. 267–273. – (Серія «Технічні науки»).

Огородников В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ;

Архипова Т. Ф. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail: tfarhipova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05.03.2013 г.