



УДК 669.295:620.172

ПОЛУЧЕНИЕ УНИКАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 45 ЗА СЧЕТ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Р.З. Валиев, Н.Г. Зарипов, М.В. Караваева, С.К. Нуриева

Уфимский государственный авиационный технический университет,
ул. Карла Маркса, 12, Уфа, 450000, Россия, e-mail: rzvaliev@mail.rb.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования микроструктуры и свойств углеродистой стали после интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) под высоким квазигидростатическим давлением. В качестве исходной обработки использовали закалку на мартенсит. В результате ИПДК сформировалась нанокристаллическая феррито-цементитная структура с размерами зерен менее 100 мкм, что позволило получить рекордно высокие характеристики прочности и твердости при сохранении некоторой пластичности.

Ключевые слова: углеродистая сталь, нанокристаллическая структура, интенсивная пластическая деформация, прочность.

Введение

К настоящему времени установлено, что существует ряд возможностей эффективно управлять прочностными характеристиками конструкционных сталей при сохранении достаточно высокого уровня пластичности. Одним из таких путей является создание в сталях нанокристаллической структуры (НК) с размером зерен менее 100 нм и сформированной методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [1].

В процессе ИПД углеродистых сталей с исходной феррито-перлитной структурой происходит измельчение ферритной матрицы, дробление и растворение цементитных частиц [2,3], что приводит к значительному упрочнению [4].

В последние несколько лет появились исследования, в которых в качестве исходной обработки перед ИПД использовали закалку стали на мартенсит [5]. Однако, большинство экспериментов по ИПД сталей с исходной мартенситной структурой проведены на малоуглеродистых сталях. С увеличением содержания углерода деформационная способность сталей, как известно, резко снижается, особенно в мартенситном состоянии.

Таким образом, целью данной работы является показать принципиальную возможность получения высокопрочного состояния среднеуглеродистой стали с исходным мартенситным состоянием в результате ИПД кручением под квазигидростатическом давлением (КГД) при повышенных температурах.

§1. Материал и методы исследования

Исследование проводили на стали 45 (Fe - 0,45% C - 0,27% Si - 0,65% Mn). Закалку стали провели в воде с предварительной аустенизацией при температуре $T=800$ °C. В качестве метода ИПД использовали кручение под высоким гидростатическим давлением (КГД). Деформации подвергали образцы диаметром 10 мм и толщиной 0,2 мм. Температура деформации составляла 350 °C, число оборотов $N=5$ при давлении $P=5$ ГПа. Исследование микроструктуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе «JEM-2100». Микротвердость определяли на микротвердомере «MICROMET 5101». Механические свойства определяли на микрообразцах с длиной рабочей части 2 мм.

§2. Результаты исследований

В исходном состоянии (закалка с $T=800$ °C) сталь 45 имеет структуру пакетного мартенсита. Микротвердость образцов в мартенситном состоянии составляет $HV = 8680$ МПа.

Нагрев стали перед деформацией в течение 5 минут (образец-свидетель) приводит к развитию процесса отпуска, результатом чего является существенное снижение микротвердости - почти в два раза по сравнению с закаленным состоянием до $HV=4000 \dots 5000$ МПа.

После кручения под давлением образцы не имели трещин, что свидетельствует о приемлемом уровне технологической пластичности стали в закаленном состоянии.

Микротвердость образцов после КГД неоднородна по диаметру образца: 8750 МПа в центральной зоне, до 10630 МПа на периферийных участках. Эти значения на 20% превышают значения микротвердости в закаленном состоянии стали и более чем в два раза выше микротвердости образца-свидетеля, нагретого при этой же температуре.

Электронно-микроскопическое исследование структуры после КГД показало, что в стали 45 формируется достаточно однородная нанокристаллическая структура (рис. 1). Электронограмма, снятая с участка, приведенного на рис. 1 (диаметр диафрагмы 0,64 мкм), представляет множество рефлексов, расположенных по окружности. Это является свидетельством большого числа мелких зерен с высокоугловыми разориентировками. Средний размер зерен феррита около 100 нм.

Внутри зерен наблюдается высокая плотность дислокаций. На темнопольном изображении рис. 2 от выделенного на рис. 1, а сектора кольца рефлексов видны частицы цементита Fe_3C размером около 20 нм.

Результаты механических испытаний закаленных и подвергнутых последующей КГД образцов приведены на рис. 3.

Как видно, образцы с мартенситной структурой показывают ожидаемо высокие прочностные свойства и низкую пластичность. Выдержка в течение 5 мин при температуре деформации 350 °C приводит к снижению прочности почти в 1,5 раза и многократному повышению пластичности рис. 3.

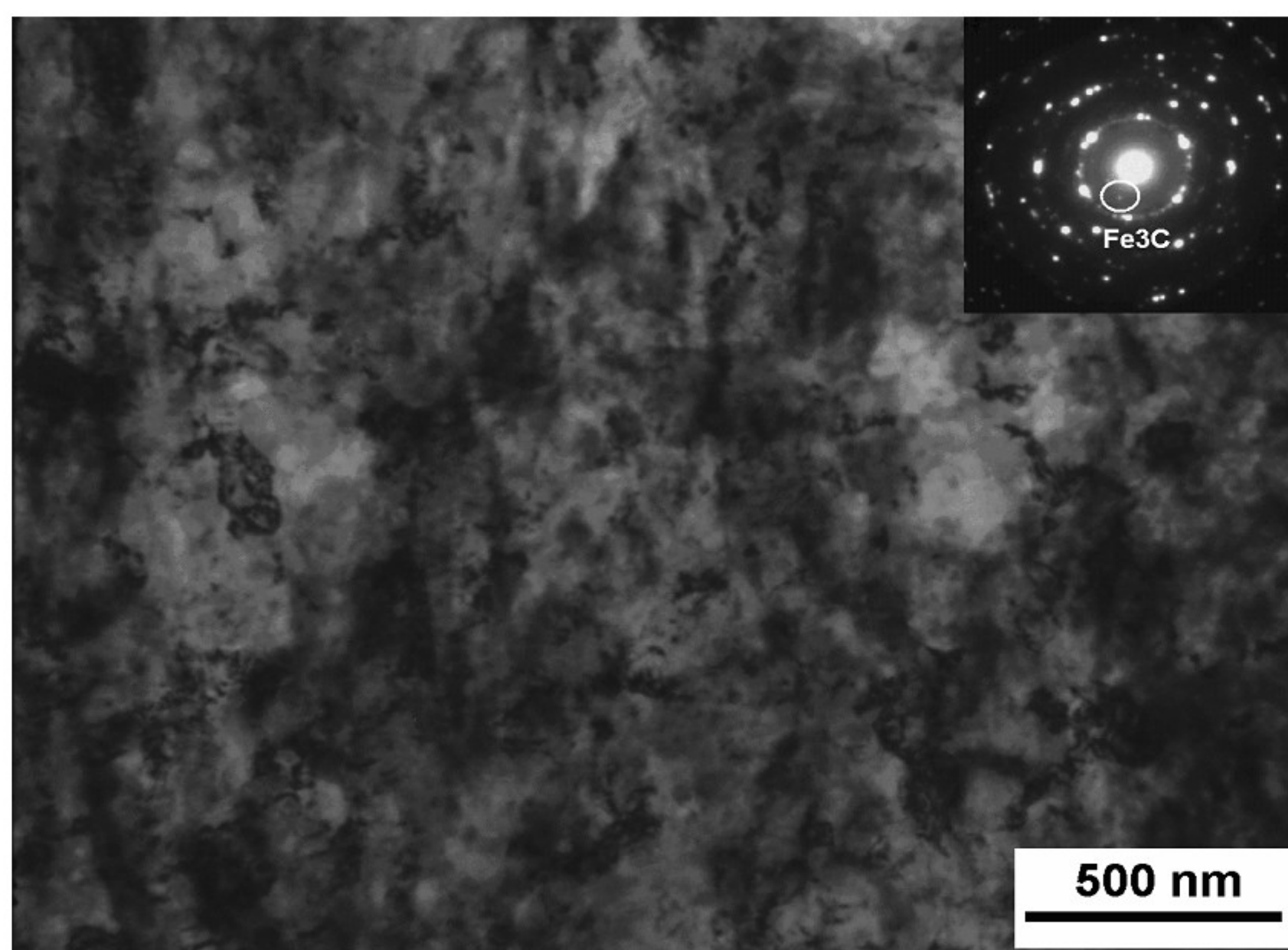


Рис. 1. Структура стали 45 после КГД при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ $N=5$ оборотов $P=5$ ГПа, ПЭМ, светлопольное изображение и электронограмма с изображенного участка.

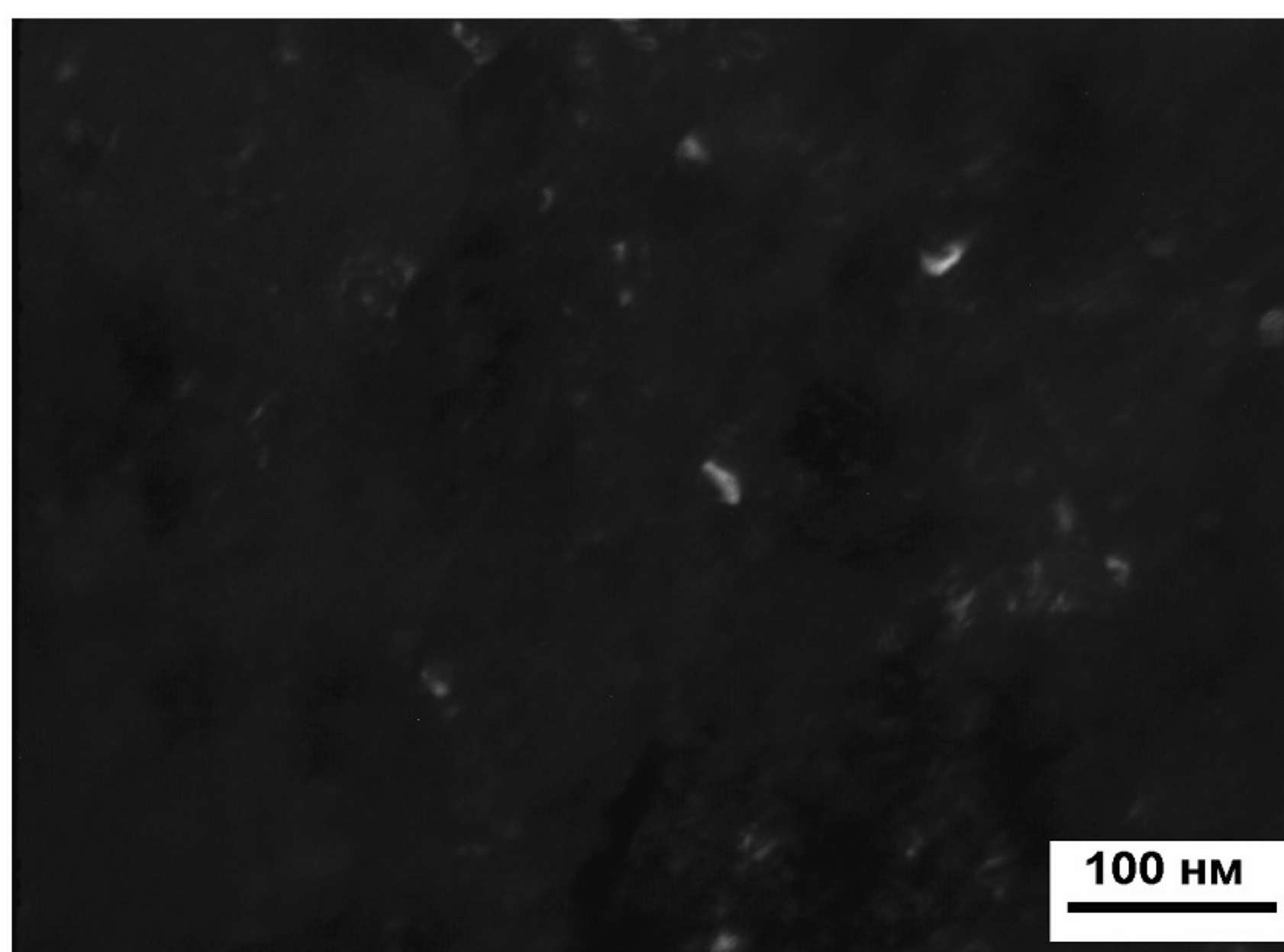


Рис. 2. Структура стали 45 после КГД при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ $N=5$ оборотов $P=5$ ГПа, ПЭМ, темнопольное изображение в рефлексе цементита.

КГД при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит значительному повышению предела прочности: на 60% по отношению к образцу – свидетелю и на 15% по отношению к закаленному состоянию. При этом пластические свойства стали в три раза ниже свойств образца после закалки и обычного нагрева, но в два раза выше, чем у закаленного состояния.

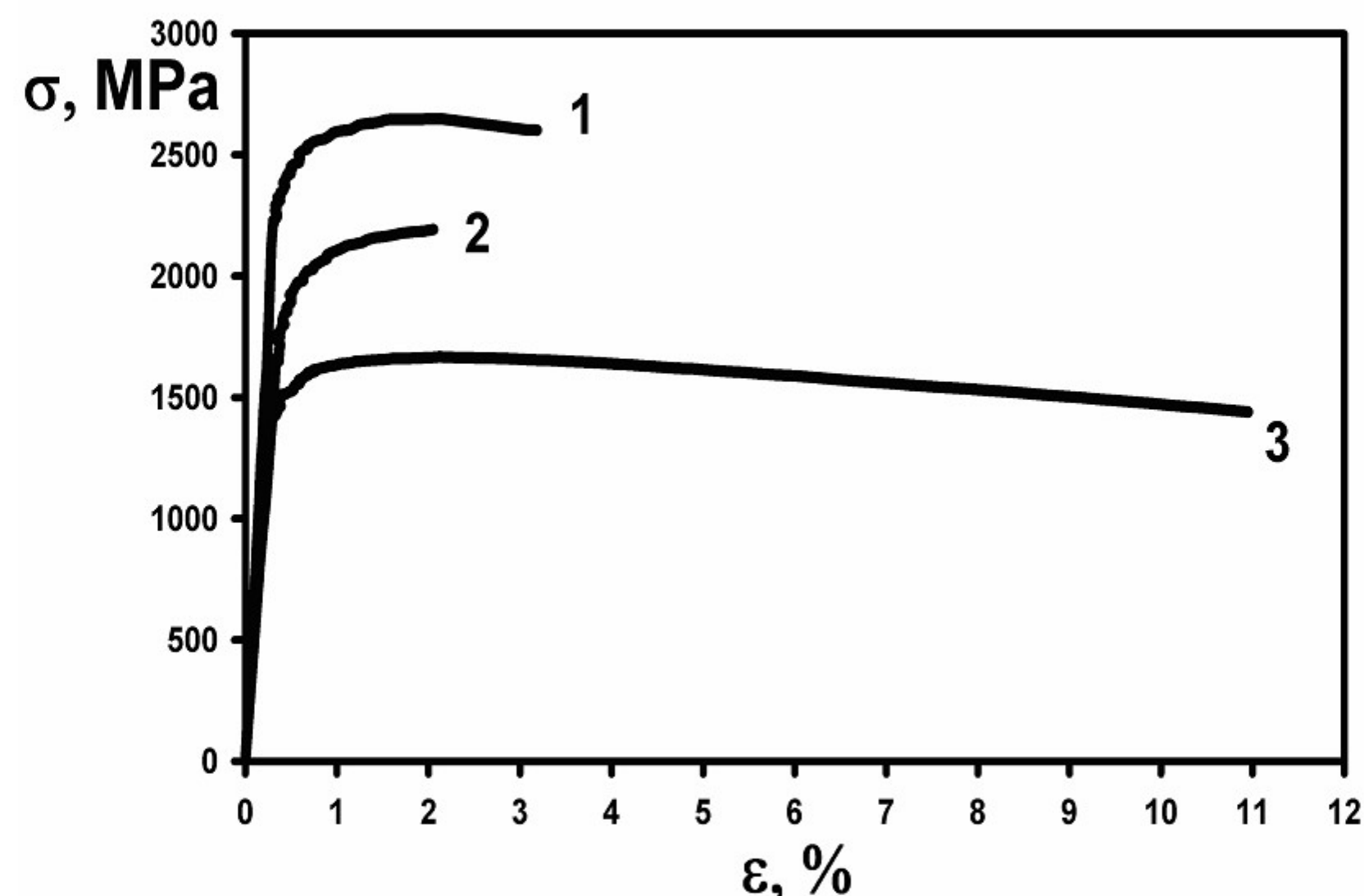


Рис. 3. Инженерные кривые растяжения образцов:

- 1 - закалка $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ +КГД при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - после закалки $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3 - образец-свидетель (закалка $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ + нагрев при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 мин.)

Полученные в данной работе результаты показали, что в ходе КГД при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ протекают процессы, характерные для отпуска стали: выделение карбидов из пересыщенного твердого раствора и возврат. Динамический характер этих процессов сказывается на дисперсности продуктов распада мартенсита: образующиеся карбиды не успевают вырасти до остановки деформации и имеют нанодисперсные размеры около 15 нм. Обедненная углеродом по сравнению с исходным мартенситом матрица испытывает деформационное упрочнение при увеличении плотности дефектов и зернограничное упрочнение в результате значительного измельчения размера зерна до 100 нм. Соотношение этих процессов определяет уровень получаемых после деформации свойств: при $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в результате частичной замены твердорастворного упрочнения другими видами упрочнения, наряду с повышением прочности наблюдается и некоторое повышение пластичности стали.

Выводы

1. Комбинированная обработка «закалка + ИПД кручением под давлением» стали 45 приводит к формированию наноструктуры со средним размером зерна феррита около 100 нм и частицами цементита около 15 нм.

2. После обработки стали 45 с исходной мартенситной структурой, используя КГД при повышенных температурах, достигается рекордно высокий уровень прочности (предел прочности 2649 МПа) и микротвердости (HV более 10000 МПа) при некотором повышении пластичности (относительное удлинение свыше 3%), по сравнению с закаленным состоянием.



Исследование выполнено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Госконтракт № 14.740.12.0865 по обобщенной теме «Исследование новых конструкционных и функциональных материалов и технологий их обработки») на оборудовании Центра коллективного пользования «Диагностика структуры свойств наноматериалов» НИУ «БелГУ».

Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объёмные наноструктурные металлические материалы / Р.З. Валиев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В., Никитенко О.А. Исследование состояния карбидной фазы после наноструктурирования и последующего волочения низкоуглеродистой стали // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2009. – 3. – с. 45-48.
3. Yu. Ivanisenko, W. Iojkowski, R.Z. Valiev, H.-J. Fecht. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion // Acta Materialia. – 2003. – 51. – P.5555-5570.
4. J. Wang, C. Xu, Y. Wang et al. Microstructure and properties of a low carbon steel after equal channel angular pressing. Nanomaterials by Severe Plastic Deformation / Ed. M.J. Zehetbauer, R.Z. Valiev. Weinheim: J. Wiley VCH, 2003. – P.829-834.
5. N. Tsuji, R. Ueji, Y. Minamino, Y. Satio. A new and simple process to obtain nanostructured bulk low-carbon steel with superior mechanical property // Scripta Materialia. – 2002. – 46. – P.305-310.

OBTAINING OF EXCELLENT MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL 45 UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION

R.Z. Valiev, N.G. Zaripov, M.V. Karavaeva, S.K. Nurieva

Ufa State Aviation Technical University,
Karla-Marksa St., 12, Ufa, 450000, Russia, e-mail: rzvaliev@mail.rb.ru

Abstract. Results of microstructure and mechanical properties investigations of stainless steel after severe plastic deformation high pressure torsion (HPT) are presented. Quenching was used as initial heat treatment of material before HPT. Nanocrystalline ferrite-cementite microstructure with grain size less than 100 μm was formed. Such structure exhibited very high strength with hardness and enhanced plasticity.

Keywords: stainless steel, nanocrystalline structure, severe plastic deformation, strength.