



УДК 631.31. 02:669. 14. 018

Поступила 19.02.2018

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ДЕТАЛЯХ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

А. А. АНДРУШЕВИЧ, Г. И. АНИСКОВИЧ, П. Л. КАНТОР, Д. В. КУЧУК, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2.
E-mail: andru49@mail.ru

Рассмотрены условия формирования нанокристаллического состояния структуры в углеродистых сталях. Приведены методики проведения исследований и экспериментальные данные о микроструктурном строении упрочненных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники из углеродистых конструкционных сталей пониженной прокаливаемости. Показано, что применение технологии импульсного закалочного охлаждения и низкого отпуска обеспечивают получение стальных изделий с фрагментированной нанокристаллической структурой мартенсита. Фрагментация зерен мартенсита в углеродистых конструкционных сталях при термической обработке деталей существенно повышает их механические характеристики.

Ключевые слова. Углеродистая сталь, пониженная прокаливаемость, закалка, отпуск, нанокристаллическая структура, мартенсит, водяное охлаждение.

Для цитирования. Андрушевич, А. А. Формирование нанокристаллического состояния в деталях из углеродистых конструкционных сталей / А. А. Андрушевич, Г. И. Анискович, П. Л. Кантор, Д. В. Кучук // *Литье и металлургия*. 2018. Т. 91. № 2. С. 113–118.

FORMATION OF NANOCRYSTAL STATE IN DETAILS OF CARBON STRUCTURAL STEELS

A. A. ANDRUSHEVICH, G. I. ANISKOVICH, P. L. KANTOR, D. V. KUCHUK, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave. E-mail: andru49@mail.ru

The conditions of formation of the nanocrystal state of the structure in carbon steels are considered in the article. The methods of research and experimental data on the microstructural structure of the strengthened parts of the working bodies of agricultural machinery made from carbon steels of the lowered hardenability are given. It is shown that pulsed quenching and low tempering provides of steel products with fragmented nanocrystal structure of the martensite. Fragmentation of martensite grains in carbon structural steels during heat treatment of parts significantly increases their mechanical characteristics.

Keywords. Carbon steel, lowered hardenability, hardening, tempering, nanocrystal structure, martensite, water cooling.

For citation. Andrushevich A. A., Aniskovich G. I., Kantor P. L., Kuchuk D. V. Formation of nanocrystal state in details of carbon structural steels. *Foundry production and metallurgy*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 113–118.

Введение

На современном этапе развития материаловедения требуемые конструктивные прочность, надежность, долговечность, износостойкость применяемых конструкционных материалов, в частности сталей, должны достигаться путем целенаправленного формирования в них субмикро- и нанокристаллического состояния структуры [1, 2].

Одним из наиболее перспективных и востребованных подходов в получении новых материалов с уникальным сочетанием их служебных свойств является создание изделий с наноструктурированным объемным строением. Такой подход в производстве стальных деталей недостаточно изучен и по существу находится на начальном этапе освоения. Для его реализации необходимо проведение комплексных исследований, которые должны быть направлены на обоснование и выбор исходной марки стали, разработку технологии термической обработки деталей с формированием объемной нанокристаллической структуры путем фрагментации продуктов фазового превращения и изучение их принципиально новых свойств, присущих наномасштабному уровню структуры.

Из теории сплавов и производственного опыта известны основные методы формирования наиболее благоприятной структуры и обеспечения прочности и надежности получаемых изделий: рациональным легированием, измельчением зерна, пластическим деформированием, улучшением металлургического качества стали и др. [3]. В связи с этим большое значение в использовании конструкционных материалов имеют углеродистые стали пониженной прокаливаемости (ПП), в которых присутствие легирующих элементов сведено к минимуму (в суммарном количестве не более 0,5%), а стоимость невысокая [4]. Замена дорогостоящих легированных сталей является актуальной задачей ресурсосбережения, которая может быть обоснованно решена при повышении прочностных свойств углеродистых конструкционных сталей до уровня легированных. Решение этой технологической задачи связано с созданием в стальном изделии высокой плотности дислокаций (до 10^{12} см^{-2}) и получением сверхмелкого зерна с дисперсностью конечной структуры вплоть до наноразмерного или наноструктурного уровня [2, 5, 6]. Это может достигаться при интенсивной термопластической деформации либо прецизионном интенсивном термическом воздействии, причем последнее направление особенно предпочтительно в нынешних условиях ресурсо- и энергосбережения.

Специфика термодинамического состояния наноструктурных материалов, связанная с близостью их термодинамического потенциала Гиббса к нулю и возникновением предпереходных квазиаморфных состояний, приводит, по мнению авторов [7], к известной аномалии поведения относительно параметров уравнения Холла–Петча при размерах нанозерен $d < 30$ нм. Достижение нанокристаллического состояния в сталях в результате мартенситного превращения обусловлено особыми термодинамическими факторами, которые возникают при определенных технологических режимах [5, 8]. Образование мартенсита наноразмерного уровня возможно при разности свободных энергий аустенита и мартенсита $\Delta G_{об} = 3000$ Дж/моль только при степени переохлаждения порядка 600–650 °С [3]. По своей природе наноструктурные состояния мартенсита являются сильно неравновесными и их формирование и последующее сохранение существенно зависит от кинетических условий воздействия на реальное изделие (сталь).

Действительно, такой мартенсит образуется при интенсивном охлаждении при переохлаждении до температур 80–20 °С и может иметь фрагментированную структуру с высокой плотностью дислокаций [2]. В работе [8] приводятся еще более меньшие ориентировочные размеры мартенситных кристаллов порядка 0,02–0,1 мкм (20–100 нм).

В работе [9] показано, что использование воды под регулируемым избыточным давлением позволяет интенсифицировать процесс теплообмена в области мартенситных превращений и управлять превращением переохлажденного аустенита в мартенсит в более узком временном интервале (до 3–5 с).

Формирование ультрадисперсных структур за счет фазового превращения в процессе термической обработки сталей требует прецизионного выбора специальных режимов охлаждения (оптимальные значения температуры охлаждающей среды и повышенная скорость охлаждения), которые традиционными методами закалки (например, погружением в воду) не достижимы.

Проведенными экспериментами по охлаждению стальных образцов потоком жидкости под давлением 0,1–0,5 МПа установлена возможность формирования в них развитой фрагментированной структуры мартенсита (разориентированных микрообластей – *фрагментов* игл мартенсита при мартенситном превращении) в результате интенсивного водяного охлаждения со скоростями закалки выше 10 000 град/с [4].

Целью настоящей работы являлось изучение закономерностей формирования нанокристаллического состояния в деталях из углеродистых конструкционных сталей пониженной прокаливаемости при использовании технологии импульсного закалочного охлаждения (ТИЗОЖ) и низкого отпуска.

Методики проведения исследований

Термическую обработку деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин (лемеха, доски, диски и др.) из углеродистой стали 60ПП выполняли на экспериментальной закалочной установке с различной интенсивностью охлаждения. Детали нагревали до температуры закалки 830 °С. Температуру нагрева контролировали микропроцессорным контроллером «ТЕРМОДАТ-14» с точностью измерения температуры $\pm 2^\circ$. Время аустенитизации составляло 10 мин. Охлаждение осуществляли потоком воды при различных значениях давления и расхода, температуре воды в пределах 5–35 °С. Время интенсивного охлаждения составляло 0,5–5 с в зависимости от толщины изделия. Низкий отпуск проводили при температуре 180 ± 5 °С.

Исследование микроструктуры проводили на образцах, вырезанных из деталей рабочих органов, после различных режимов термической обработки.

Микроструктуру упрочненного слоя и сердцевины изучали на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении 500. Микроструктуру упрочненных зон дополнительно исследовали на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) при увеличениях 5000, 20 000, 50 000, 80 000 и с использованием детектора Nordlys II EBSD (Oxford Instruments) обратно рассеянных электронов.

Характеристику и балл мартенсита определяли по ГОСТ 8233-56, размеры фрагментов мартенсита – с использованием метода секущих (метод подсчета пересечений границ зерен по ГОСТ 5639-82).

Фазовый состав, количество остаточного аустенита определяли на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK монохроматизированном излучении, вторичную монохроматизацию осуществляли пиролитическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Количество остаточного аустенита и мартенсита рассчитывали с помощью программы автоматизированного рентгеновского исследования «WinDif» по отношению интенсивностей линий всех фаз, присутствующих в образце.

Твердость по Роквеллу определяли на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013-59. Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон 1195» в соответствии с ГОСТ 473.8-81.

Результаты исследований и их обсуждение

Углеродистая конструкционная сталь 60ПП в состоянии поставки после отжига и механической обработки имеет феррито-перлитную структуру, что не обеспечивает требуемых механических и эксплуатационных свойств изготавливаемых деталей.

Применяемые температурно-временные режимы закалки и последующего отпуска деталей для получения структуры мартенсита отпуска повышенной твердости (60–62 HRC) приводят к высокой хрупкости стальных изделий, снижая их срок службы [6]. При этом образуется типичная структура мартенсита углеродистой закаленной стали, которая имеет характерный мелкоигльчатый вид, свойственный пакетному (речному) типу при температурах переохлаждения до 240–180 °С. Размер реек – 5–6 мкм (рис. 1, а).

При большей степени переохлаждения до температур 150–80 °С образуется мелкоигльчатый мартенсит (максимальная длина игл 3–5 мкм), относящийся к пластинчатому (двойниковому) типу (рис. 1, б).

Использование импульсного водяного охлаждения при закалке стали 60ПП со сверхинтенсивным охлаждением при переохлаждении до температур порядка 80–20 °С позволяет сформировать в упрочняемой зоне изделия объемное нанокристаллическое состояние с фрагментацией отдельных зерен мартенсита, выявленное методом электронной микроскопии (рис. 2). На рис. 2, а, б показаны микроструктуры упрочненного слоя образца при увеличениях 5000, 20 000. Структура упрочненного слоя – весьма мелкоигльчатый мартенсит 2–3-го баллов с небольшим количеством остаточного аустенита. Максимальная длина мартенситных игл – 3 мкм, толщина игл – порядка 0,2–0,3 мкм. Твердость по Роквеллу упрочненного слоя составляет 56–57 HRC.

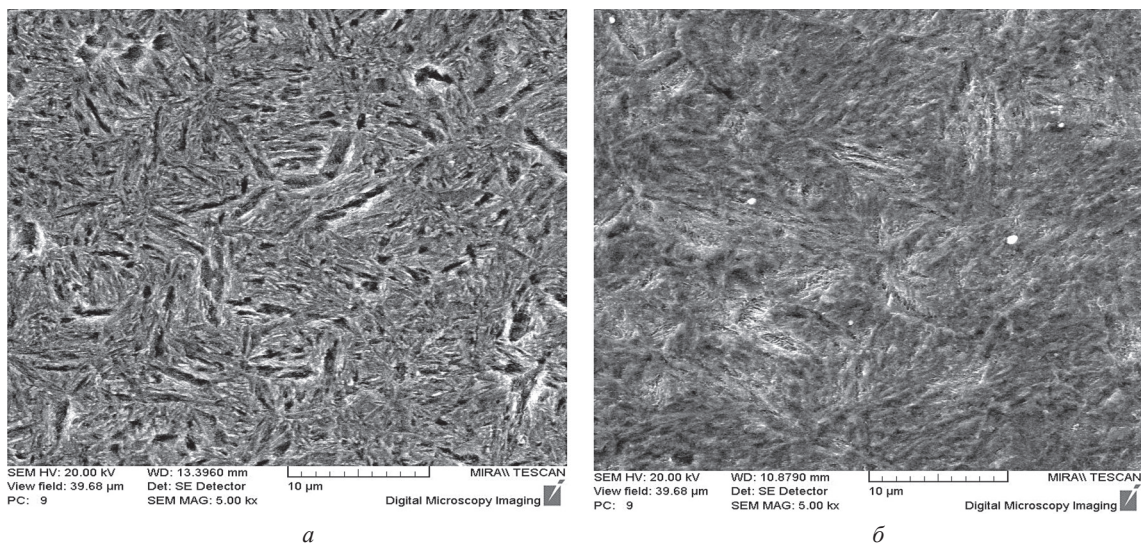


Рис. 1. Микроструктура упрочненного слоя стали 60ПП (x5000) после закалки в воде с последующим низким отпуском: а – переохлаждение до 240–180 °С; б – переохлаждение до 150–80 °С

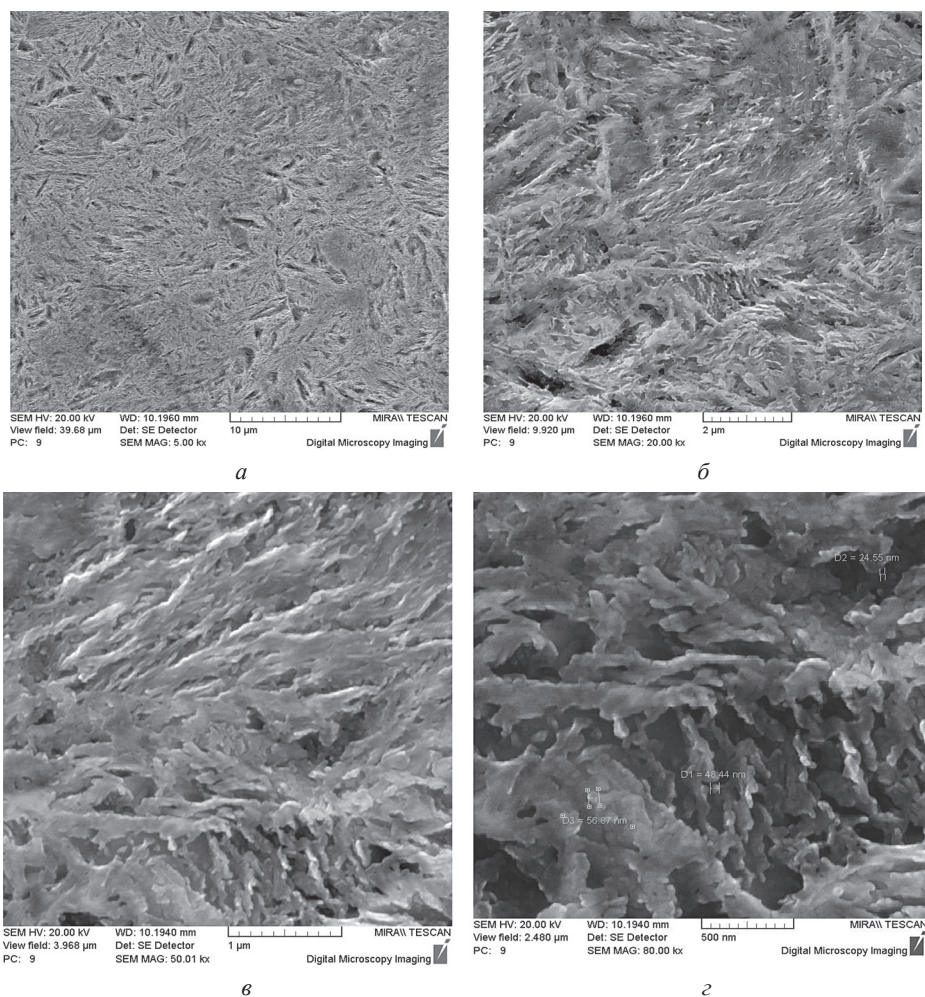


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8 мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска: а – х5000; б – х20 000; в – х50 000; з – х80 000

Фрагментация мартенсита выявлена только при увеличениях 50 000 и 80 000 (рис. 2 в, з). При больших увеличениях видно, что мартенситные иглы частично фрагментированы. Размер фрагментов находится в диапазоне 20–180 нм, средний размер составляет 40–70 нм. На отдельных фрагментах проявляются очертания субмикрозерен. Края мартенситных пластин и фрагментов несколько размыты, что говорит об их частично аморфно-кристаллическом состоянии.

Статистические данные по средней длине фрагментов мартенситных пластин стали 60ПП в результате закалки плоских деталей толщиной 6–12 мм с применением ТИЗОЖ показали, что размер 80% фрагментов находится в диапазоне 0,02–0,08 мкм (табл. 1). После низкого отпуска при 180 °С размеры фрагментов изменяются незначительно, а 60% составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02–0,06 мкм.

Таблица 1. Разбиение на классы по длине фрагментов в мартенситных пластинах детали из стали 60ПП после закалки и низкого отпуска

Класс	Количество, шт.	Интервал, мкм	Доля по количеству, %	Доля по массе, %
1	0	0–0,02	0	0
2	2	0,02–0,04	3,08	1,14
3	29	0,04–0,06	44,62	30,08
4	26	0,06–0,08	40,0	45,04
5	7	0,08–0,10	10,77	20,88
6	1	0,1–0,12	1,54	2,85

Рентгеноструктурные исследования и расчет параметров тонкой структуры образца толщиной 6 мм в упрочненном слое только после закалки выявили, что плотность дислокаций увеличивается в 1,6 раза от $0,780 \cdot 10^{10}$ до $0,128 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ относительно упрочненного слоя образца после закалки и низкого отпу-

ска. Распределение относительной среднеквадратической микродеформации – ОСМД – $\langle E^2(L_n) \rangle^{1/2}$ – степенное, характеризующееся скоплением дислокаций. Расчет количества остаточного аустенита в образце по рентгенограмме в программе PdfWin показал, что он составляет 6–10%.

Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов стали 60ПП после термического упрочнения по разработанному режиму охлаждения приведены в табл. 2. При изучении механических свойств углеродистой стали в закаленном состоянии и после низкого отпуска установлено, что наноструктурные изменения приводят к значительному увеличению предела прочности на изгиб (в 1,35–1,45 раза). Значения предела прочности на изгиб стали 60ПП при традиционных режимах закалки и отпуска составляют не более 2500–3000 МПа.

Т а б л и ц а 2. Результаты испытаний упрочненной стали 60ПП на трехточечный изгиб

Номер образца	Геометрические размеры сечения образцов		Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности на изгиб, МПа
	толщина, мм	ширина, мм		
04/850/ без отпуска	11,9	7,6	50	3022,5
05/800/ без отпуска	11,9	7,9	50	2796,4
1т/800/+ низкий отпуск	9,8	8,1	50	3803,3
2т/850/+ низкий отпуск	9,5	8,6	50	4433,6

Выводы

1. В углеродистых сталях пониженной прокаливаемости после импульсного закалочного охлаждения с высокой скоростью закалки и низкого отпуска формируется фрагментированная нанокристаллическая структура мартенсита, что позволяет достигнуть оптимального соотношения прочностных и эксплуатационных характеристик деталей.

2. В результате выбранных режимов термической обработки для углеродистой стали 60ПП с применением ТИЗОЖ мелкоигльчатый мартенсит с наибольшей длиной игл 1–3 мкм дробится на отдельные, разориентированные под определенными углами фасетки размерами 20–80 нм внутри пластинок мартенсита. Предел прочности на изгиб возрастает на 35–45% при сохранении заданного уровня твердости, что существенно превосходит аналогичные показатели при обычных режимах закалки и отпуска.

3. Формирование развитой фрагментированной наноструктуры мартенсита в углеродистых конструкционных сталях при термической обработке стальных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин позволяет существенно повысить их механические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И. В., Рыбин В. В., Хлусова Е. И., Нестеров Е. В., Орлов В. В., Калинин Г. Ю. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Вопросы машиностроения. 2008. № 2 (54). С. 7–19.
2. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей // МИТОМ. 2009. № 6 (643). С. 3–7.
3. **Материаловедение:** учеб. для вузов / Б. А. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 648 с.
4. **Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин** / И. Н. Шило и др. Минск: БГАТУ, 2010. 320 с.
5. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения // Физическая мезомеханика. 2009. № 124. С. 7–26.
6. Быков Ю. А. Структура и свойства конструкционных наноматериалов // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 7. С. 2–22.
7. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Наноструктурные состояния в твердых телах // Физика металлов и металловедение. 2010. Т. 110. № 5. С. 486–496.
8. Кашенко М. П., Чащина В. Г. Динамическая теория γ – α -мартенситного превращения в сплавах железа – решение проблемы критического размера зерна. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский ин-т компьютерных исследований, 2010. 132 с.
9. Кобаско Н. И. Закалка стали в жидких средах под давлением. Киев: «Наукова думка», 1980, 206 с.

REFERENCES

1. Gorynin I. V., Rybin V. V., Hlusova E. I., Nesterov E. V., Orlov V. V., Kalinin G. Ju. Jekonomnolegированные стали s nanomodificirovannoj strukturoj dlja jeksploatacii v jekstremal'nyh uslovijah [Economically alloyed steels with nanomodified structure for operation under extreme conditions]. *Voprosy mashinostroenija = Mechanical Engineering*, 2008, no. 2 (54), pp. 7–19.

2. **Rybin V. V., Malyshevskij V. A., Hlusova E. I.** Tehnologii sozdaniya konstrukcionnyh nanostrukturirovannyh stalej [Technologies for creating structural nanostructured steels]. *MITOM = MITOM*, 2009, no. 6 (643), pp. 3–7.
3. **Arzamasov B. A., Makarova V. I., Muhin G. G. etc.** *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow, MG TU im. N. Je. Bauma-na Publ., 2008, 648 p.
4. **Shilo I. N. etc.** *Povyshenie rabotosposobnosti detalej rabochih organov sel'skhozjajstvennyh mashin* [Increase of working capacity of details of working bodies of agricultural machines]. Minsk, BGATU Publ., 2010, 320 p.
5. **Panin V. E., Egorushkin V. E.** Fizicheskaja mezomehanika i neravnovesnaja termodinamika kak metodologicheskaja osnova nanomaterialovedenija [Physical mesomechanics and nonequilibrium thermodynamics as a methodological basis of nanomaterial science]. *Fizicheskaja mezomehanika = Physical mesomechanics*, 2009, no. 124, pp. 7–26.
6. **Bykov Ju. A.** Struktura i svojstva konstrukcionnyh nanomaterialov [Structure and properties of structural nanomaterials]. *Prilozhenie. Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal = Application. Directory. Engineering Journal*, 2010, no. 7, pp. 2–22.
7. **Panin V. E., Egorushkin V. E.** Nanostrukturnye sostojanija v tverdyh telah [Nanostructural states in solids]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy*, 2010, no. 5, Vol. 110, pp. 486–496.
8. **Kashhenko M. P., Chashhina V. G.** *Dinamicheskaja teorija γ - α martensitnogo prevrashhenija v splavah zheleza – reshenie problemy kriticheskogo razmera zerna* [The dynamic theory of the γ - α martensitic transformation in iron alloys is a solution to the critical grain size problem]. Moscow, Izhevsk, NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika» Publ., 2010, 132 p.
9. **Kobasko N. I.** *Zakalka stali v zhidkih sredah pod davleniem* [Hardening of steel in liquid media under pressure]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, 206 p.