

УДК 669.141.32.018

А.С. Иванов, М.В. БогдановаПермский национальный исследовательский
политехнический университет**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ
ЦЕМЕНТУЕМЫХ СТАЛЕЙ**

Проведено исследование структуры, фазового состава и свойств цементованных покрытий, полученных различными методами на сталях 20X, 12XН3А и 20XН3А (3 варианта: цементация в твердом карбюризаторе, газовая цементация и цементация в кипящем слое). С помощью послойного рентгеноструктурного анализа более детально были рассмотрены и уточнены некоторые аспекты формирования остаточного аустенита в градиентных слоях цементованных широко применяемых низкоуглеродистых сталей. Определены такие параметры остаточного аустенита, как распределение по глубине цементованного слоя, концентрация углерода, напряженное состояние. Получено экстремальное распределение остаточного аустенита в поверхностном слое после цементации и последующей стандартной термической обработки исследуемых сталей. Большое количество остаточного аустенита в структуре цементованных слоев после окончательной обработки (до 50 % остаточного аустенита в максимуме) не приводит к резкому падению микротвердости по глубине слоя. Микротвердость распределяется по глубине слоя равномерно, без скачков при всех вариантах науглероживания. Показано некоторое несоответствие определения количества остаточного аустенита в цементованном слое широко применяемых низкоуглеродистых сталей по структуре шкалы балльности справочника и результатов послойного рентгеноструктурного анализа цементованных слоев.

Ключевые слова: цементация, цементованный слой, остаточный аустенит, низкоуглеродистые мартенситные стали, химико-термическая обработка, поверхностное упрочнение, послойный рентгеноструктурный анализ, структура.

A.S. Ivanov, M.V. Bogdanova

Perm National Research Polytechnic University

**INVESTIGATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF
CARBURIZED LAYERS IN LOW-CARBON CARBURIZING STEELS**

There have been investigated structure, phase composition and properties of carburized layers in steels 20Kh, 20KhN3A and 20KhN3A obtained by different variants of carburizing (3 variants: solid carburizing, gas and carburizing fluidized bed). Some aspects of retained austenite formation in gradient layers of widely applied carburizing steels are analyzed and specified in greater detail with the help of layer-by-layer X-ray analysis. There have been defined such parameters of retained austenite as distribution in carburized layer depth, concentration of carbon, stress condition. Extreme distribution of retained austenite in surface layer after carburizing and following standard heat treatment of the steels has been shown. Great quantity of retained austenite in carburized layers after final heat treatment (about 50 % of retained austenite in extreme point) does not lead to sudden decrease of microhardness

in layer depth. Microhardness is distributed in layer depth intimately, without jumps after all variants of carburizing. There have been shown some difference between the definition of quantity of retained austenite by standard carburized layer structure scale and by layer-to-layer X-ray Diffraction analysis.

Keywords: carburizing, retained austenite, carburizing layer, low-carbon carburizing steels, thermochemical treatment, layer-by-layer X-ray analysis, case-hardening, structure.

Цементация является наиболее древним и повсеместно применяемым методом поверхностного упрочнения стальных изделий для повышения их износостойкости. Проблемам поверхностного науглероживания сталей посвящена обширная литература. Однако в практике работы предприятий в ряде случаев возникает необходимость корректировать процесс цементации и последующей термической обработки для получения оптимальной структуры слоя и основы стали.

В настоящее время расширяется применение объемной и поверхностной термообработки в кипящем слое [1], что значительно сокращает продолжительность термической обработки изделий и упрощает технологический процесс, снижая производственно-эксплуатационные и трудовые затраты на 25–40 %. В связи с этим требуется сравнительная характеристика методов науглероживания в конкретных условиях предприятия.

Кроме того, по нашему мнению, исходя из опыта работ по цементации низкоуглеродистых мартенситных сталей [2, 3], требуется рассмотрение и уточнение некоторых аспектов формирования остаточного и ревертированного аустенита в градиентных слоях цементованных широко применяемых низкоуглеродистых сталей.

Материал и методика исследования. Исследование проводили на образцах сталей 20Х, 12ХН3А, 20ХН3А в производственных условиях промышленных предприятий г. Перми. Исходное состояние образцов – горячекатаный прутки диаметром 10–12 мм с твердостью 17–21 HRC.

Для сравнения различных методов науглероживания исследовали три варианта цементации:

- 1) газовая цементация,
- 2) цементация в кипящем слое,
- 3) цементация в твердом карбюризаторе.

Газовую цементацию сталей 20Х, 12ХН3А, 20ХН3А проводили в электрических печах «Пекат». В качестве газа-носителя в печь подается эндоатмосфера с добавкой природного газа. Температура цементации 930 °С, продолжительность выдержки 8 ч. Закалка с температуры цементационного нагрева, с подстуживанием примерно 1,5 мин. Охлаждающая среда – масло.

Цементацию в кипящем слое проводили в установке «Корунд 600». Температура процесса 910–930 °С, выдержка 4–5 ч. Затем проводится подстуживание 1,5 мин и охлаждение в масле.

Цементацию в твердом карбюризаторе (твердая цементация) проводили в металлическом ящике с толщиной стенки 150 мм. Состав карбюризатора: древесный березовый уголь – 70–77 %, соль BaCO_3 – 20–25 %, соль CaCO_3 – 3–5 %. В составе смеси 75 % использованного карбюризатора и 25 % нового. Ящик с образцами устанавливается в камерную печь при 800 °С. Время выравнивания температуры 2 ч, затем нагрев до 950 °С и выдержка 8 ч. Науглероженные образцы извлекали из ящика и охлаждали в масле или на воздухе.

Термическая обработка образцов после цементации включала высокий отпуск при температуре 620 °С 2 ч, закалку в масле от 810 °С с выдержкой 40 мин и низкий отпуск при температуре 180 °С, 2 ч. Для нагрева использовали лабораторные печи типа СНОЛ.

Микроструктуру исследовали на микроскопах НЕОРНОТ 32 и OLYMPUS GX51 с увеличением 100 и 500 крат. Для более детального изучения структуры с увеличением от 2000 до 10 000 крат применяли электронный сканирующий микроскоп HITACHI S-3400 N.

Твердость измеряли по методу Роквелла по шкале С алмазным конусом при нагрузке 150 кг на приборе ТК-2М в соответствии с ГОСТ 9013–59.

Измерение микротвердости проводили по ГОСТ 9450–76 на микротвердомерах ПМТ-3 при нагрузке 20 и 50 г и DuraScan 70 при нагрузке 25 и 50 г. За глубину цементованного слоя принимали расстояние от поверхности образца до точки, соответствующей твердости основы.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводили на дифрактометре ДРОН-3 в излучении Fe_α . По данным РСА определяли количество остаточного аустенита, ширину линий α - и γ -фазы, параметр кристаллической решетки остаточного аустенита, микронапряжения в аустените.

Количество остаточного аустенита определяли по соотношению интегральных интенсивностей линии (111) γ -фазы и (110) α -фазы по формуле

$$A_{\text{ост}} = 100 / (0,74 (I_{(110)\alpha} / I_{(111)\gamma}) + 1),$$

где $I_{(110)\alpha}$ – интенсивность линии α -фазы; $I_{(111)\gamma}$ – интенсивность линии γ -фазы.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. Исследование градиентных поверхностных покрытий включало изучение структуры слоя, определение твердости поверхности и основы цементованных образцов, распределение микротвердости по сечению слоя, параметры остаточного аустенита – распределение по глубине слоя, концентрация углерода напряженное состояние, размеры блоков, определяющие внутризеренную дислокационную субструктуру аустенита.

В исходном состоянии после цементации с охлаждением на воздухе основной структуры слоя стали 20Х является пластинчатая составляющая трооститного типа (рис. 1). Массивные карбиды, расположенные

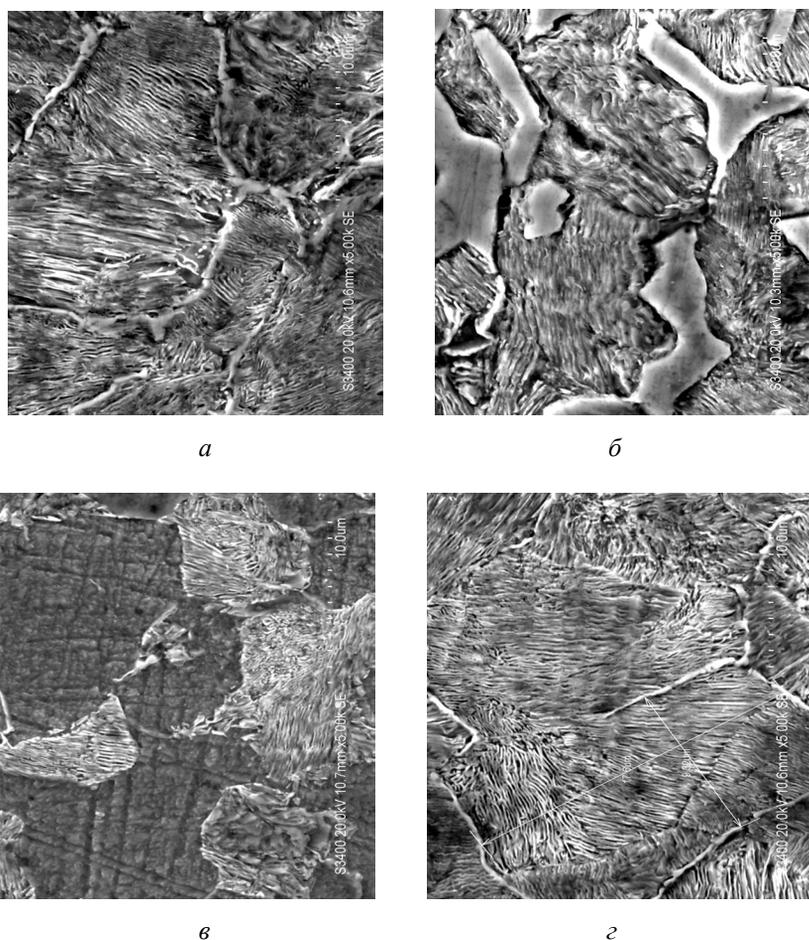


Рис. 1. Микроструктура цементованного слоя, сталь 20Х. $\times 5000$; расстояние от поверхности, мм: а – 0,04; б – 0,12; в – 0,27; г – 1,50

на поверхности, измельчаясь по глубине слоя, переходят во фрагментированную карбидную сетку по границам бывшего аустенитного зерна. В структуре основы на глубине более 1,5 мм четко выделяются трооститные участки с повышенным содержанием углерода и участки феррита с содержанием углерода в два раза меньшим.

Методика получения цементованного слоя в процессе стандартной термической обработки по технологии ОАО «Мотовилихинские заводы» включает цементацию с закалкой с цементационного нагрева (ЦЗ), высокий отпуск 620 °С, 2 ч (ВО), закалку от 810 °С (З-810), низкий отпуск – 180 °С, 2 ч (НО).

Структура цементованного слоя после окончательной термообработки представляет собой мартенситно-аустенитную смесь, упрочненную равномерно распределенными дисперсными карбидами, количество которых снижается по мере увеличения расстояния от поверхности (рис. 2). Струк-

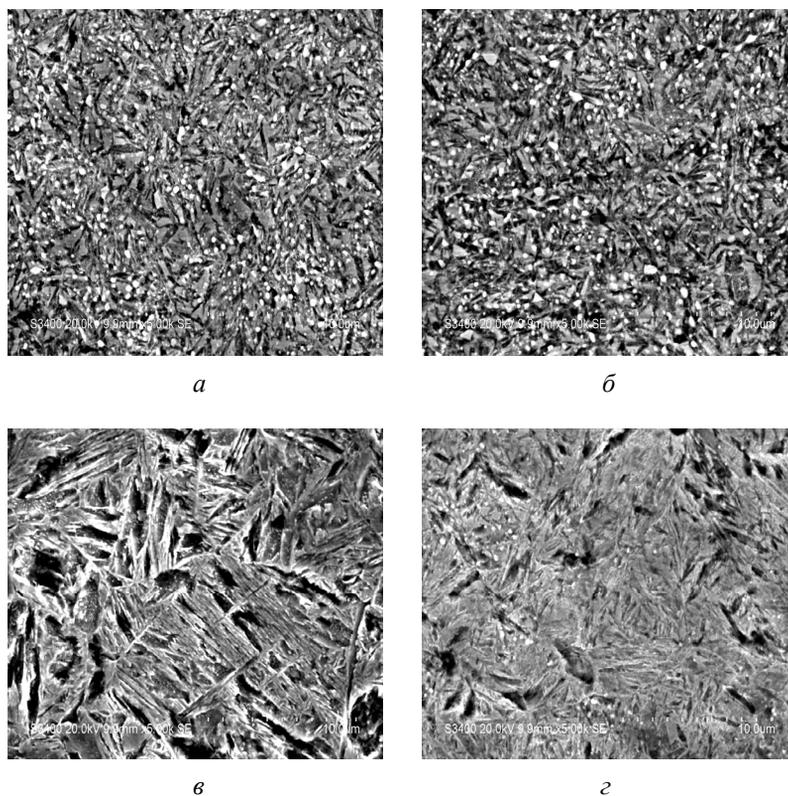


Рис. 2. Микроструктура цементованного слоя стали 20Х после термообработки по схеме ЦЗ – ВО – З-810 – НО. $\times 5000$, расстояние от поверхности, мм:
 $a - 0,06$; $б - 0,23$; $в - 0,63$; $г - 1,75$

тура основы стали представлена пакетами мартенситных пластин разной ориентировки, наследуемой от ориентировки исходного зерна аустенита.

В таблице приведены значения твердости поверхности и основы образцов после полной термообработки.

Таблица

Твердость HRC цементованного слоя и основы сталей 20X и 20XН3А

Цементация	Сталь 20X		Сталь 20XН3А	
	поверхность	основа	поверхность	основа
Газовая	58	37	65	41
В кипящем слое	60	39	60	37
Твердая	60	38	58	36

Распределение микротвердости по глубине слоя сталей 20X и 20XН3А после цементации с полной последующей термообработкой (ЦЗ – ВО – 3-810 – НО) приведено на рис. 3.

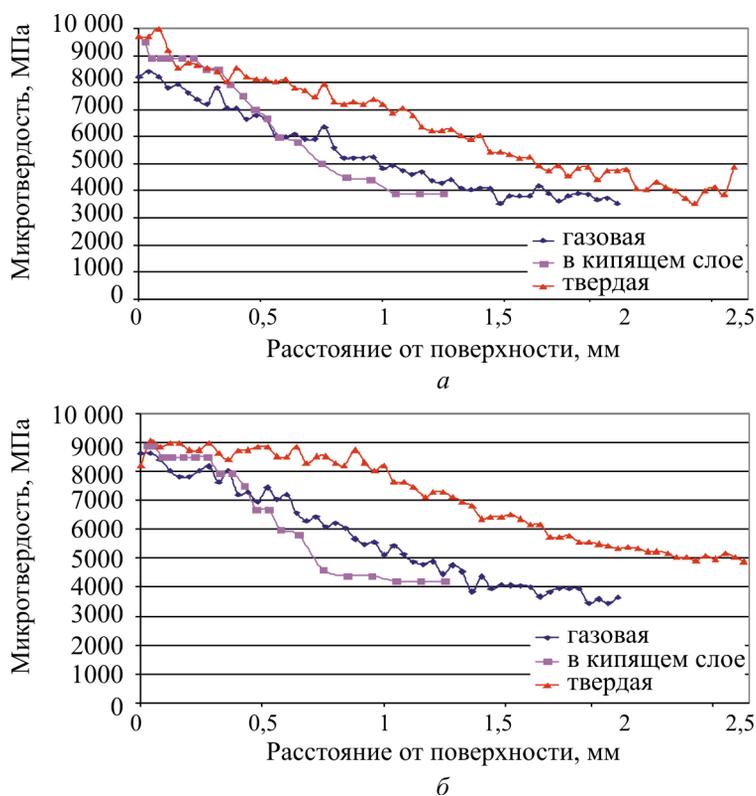


Рис. 3. Распределение микротвердости в цементованном слое после цементации и последующей термообработки: а – сталь 20X; б – сталь 20XН3А

Микротвердость распределяется по глубине слоя равномерно, без скачков при всех вариантах науглероживания. Более высокие значения твердости после твердой цементации объясняются более интенсивным науглероживанием в процессе длительной выдержки при нагреве в твердом карбюризаторе.

В практике поверхностного упрочнения сталей цементацией считается желательным присутствие в градиентном слое минимального количества аустенита. Содержание остаточного аустенита определяется по структуре слоя в баллах по шкале балльности для оценки количества остаточного аустенита в цементованном слое (рис. 4) [4].

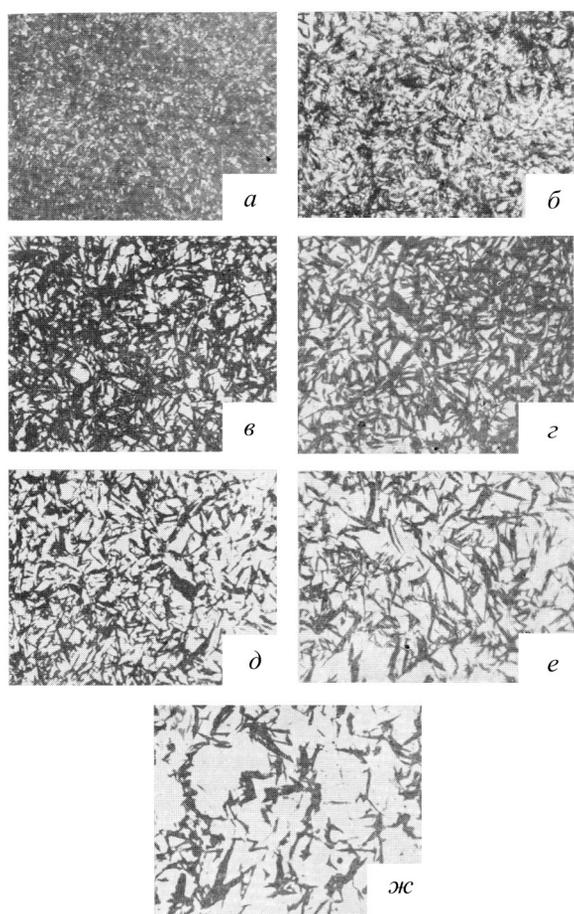


Рис. 4. Шкала балльности для оценки количества остаточного аустенита в цементованном слое [4]. $\times 400$: а – балл 1А, $A_{\text{ост}} = 15\%$; б – балл 2А, $A_{\text{ост}} = 20 \dots 25\%$; в – балл 3А, $A_{\text{ост}} = 30 \dots 35\%$; г – балл 4А, $A_{\text{ост}} = 40 \dots 45\%$; д – балл 5А, $A_{\text{ост}} = 50 \dots 55\%$; е – балл 6А, $A_{\text{ост}} = 60 \dots 65\%$

На рис. 5 представлена микроструктура цементованных слоев исследуемых сталей в сопоставимом со шкалой балльности масштабе. Аналогично выглядит структура слоя после всех этапов следующей после цементации термической обработки. Визуально различий в структуре поверхностного слоя исследуемых сталей не обнаружено.

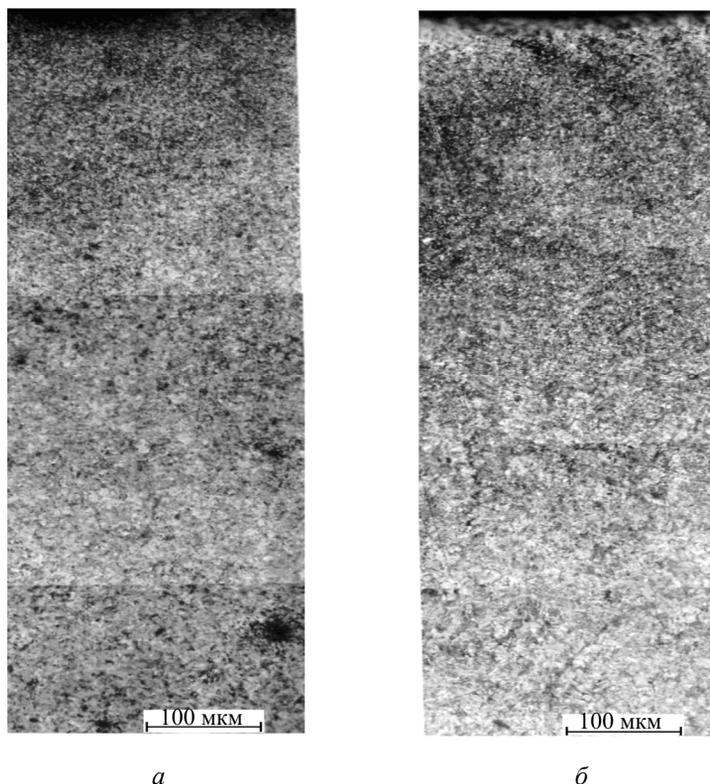


Рис. 5. Микроструктура цементованного слоя сталей 20Х (а) и 20ХН3А (б) после термообработки по схеме ЦЗ – ВО – 3-810 – НО. $\times 500$

Сравнение со справочными данными (рис. 4) показывает, что исследуемая структура цементованных слоев (рис. 5) соответствует баллу 1А (15 % остаточного аустенита). Однако нам представляется, что в определение количества и распределения остаточного аустенита по глубине слоя следует внести некоторые уточнения.

Для изучения параметров остаточного аустенита в данной работе был проведен послойный рентгеноструктурный анализ цементованных слоев на рентгеновской установке ДРОН-3 в излучении Fe_{α} . Наличие и количество остаточного аустенита определяли по соотношению ин-

тенсивности рентгеновских максимумов (111) аустенита и (110) мартенсита. Размеры блоков и микронапряжения в аустените рассчитывали по ширине рентгеновских линий (111) и (311) аустенита методом аппроксимации.

Рентгеноструктурный анализ показал, что количество остаточного аустенита в исследуемых цементованных сталях после закалки с цементационного нагрева и после полной термообработки значительно больше, чем предполагается в структуре слоя 1А.

Содержание остаточного аустенита в поверхностном слое сталей 20X, 12ХН3А и 20ХН3А изменяется экстремально. Максимальное количество аустенита на глубине слоя 0,2–0,4 мм достигает 40–60 % (рис. 6, 7). Для иллюстрации этого положения на рис. 8, 9 представлены рентгенограммы, снятые на разных уровнях поверхностного слоя, показывающие изменение соотношения интенсивности рентгеновских линий (111) аустенита и (110) мартенсита по мере удаления от поверхности.

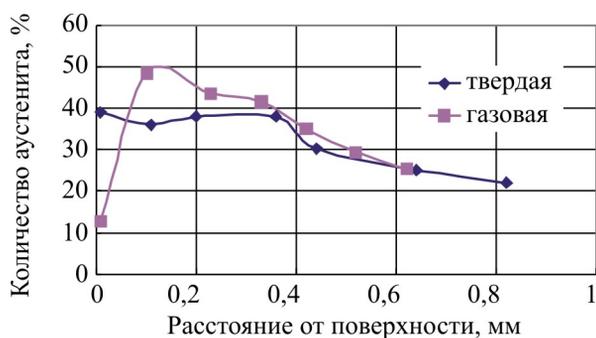


Рис. 6. Распределение остаточного аустенита в цементованном слое стали 20X

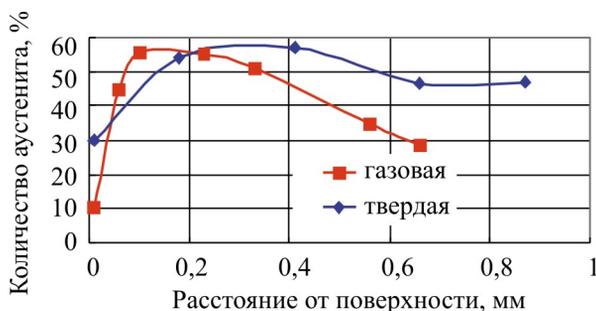


Рис. 7. Распределение остаточного аустенита в цементованном слое стали 20ХН3А

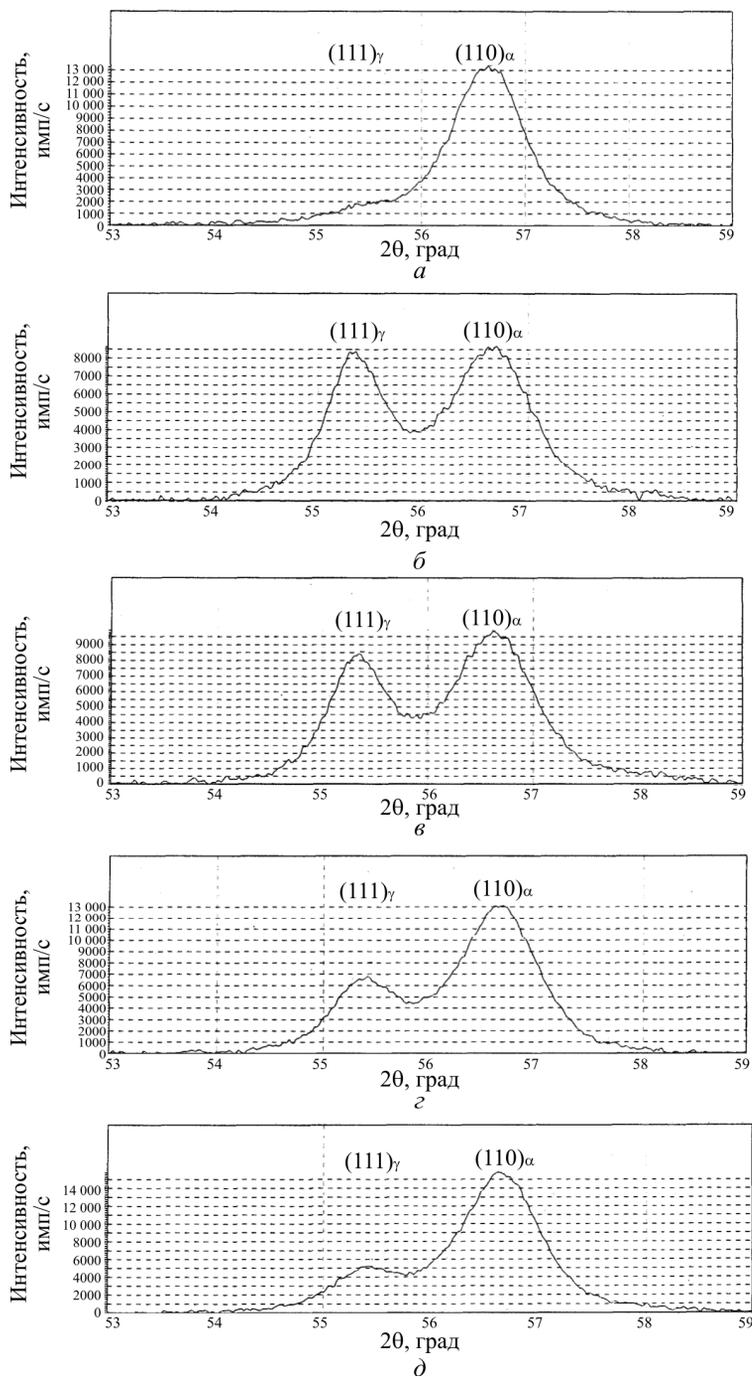


Рис. 8. Дифрактограммы цементованного слоя стали 20X после газовой цементации и окончательной термической обработки, расстояние от поверхности: *a* – 0,00 мм; *б* – 0,10 мм; *в* – 0,33 мм; *г* – 0,63 мм; *д* – 0,82 мм (имп/с – импульсов в секунду)

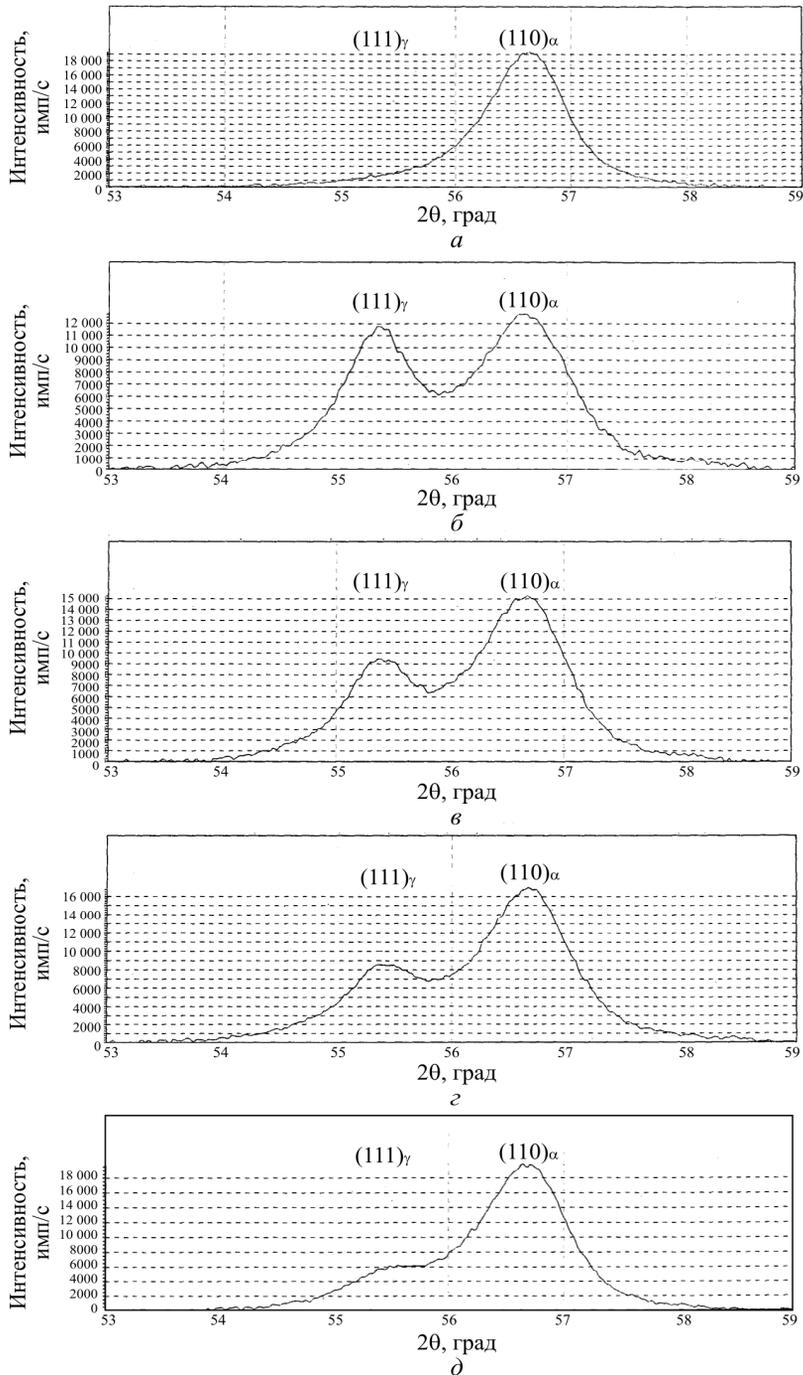


Рис. 9. Дифрактограммы цементованного слоя стали 20ХН3А после газовой цементации и окончательной термической обработки, расстояние от поверхности: а – 0,00 мм; б – 0,29 мм; в – 0,44 мм; г – 0,58 мм; д – 0,78 мм

Упрочнение цементованного слоя после обработки по указанной схеме объясняется высокой дисперсностью его мартенситно-аустенитной структуры. Остаточный аустенит в цементованных слоях сравнительно малолегированных сталей 20, 20Х, 12ХН3А, 20ХН3А и др. располагается в виде тонких прослоек между пластинами мартенситного каркаса после всех видов науглероживания и последующей термообработки. Большой удельный объем мартенсита, образовавшегося при закалке, приводит ко всестороннему сжатию и стабилизации остаточного аустенита. Напряжения в аустените цементованного слоя стали 20ХН3А изменяются в пределах 300–500 МПа, снижаясь за счет более равномерного распределения в области с наиболее высоким содержанием аустенита (рис. 10).

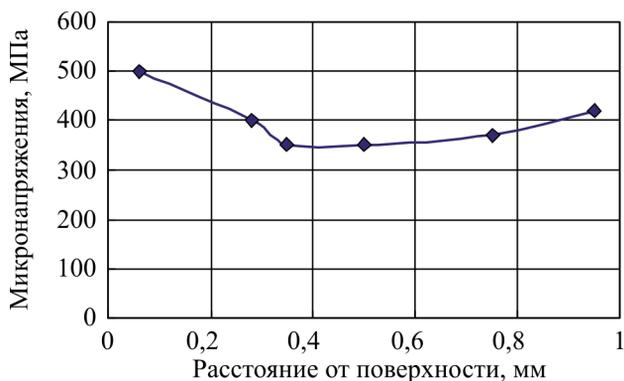


Рис. 10. Микронапряжения в цементованном слое стали 20ХН3А

Высокие значения твердости по глубине слоя объясняются тем, что нагрузку воспринимает мартенсит и смягчающее влияние аустенита не проявляется.

Следует отметить, что присутствие остаточного аустенита в цементованных слоях бывает необходимо. Присутствие остаточного и ревертированного аустенита повышает ударную вязкость и трещиностойкость стали [5–7]. Включения аустенита способствуют релаксации пиковых напряжений и снижают опасность хрупкого разрушения. Так, в справочнике [8] указано, что содержание остаточного аустенита в поверхностных слоях зубчатых колес в случае цементации должно быть равным 30–50 %, а после нитроцементации – 40–60 %.

Сделаем следующие выводы:

1. Исследованы структура и свойства цементованных покрытий на сталях 20Х, 12ХНЗА, 20ХНЗА, полученных в результате цементации с закалкой с цементационного нагрева в разных средах и после полной термообработки цементованных изделий.

2. Показано некоторое несоответствие определения количества остаточного аустенита в цементованном слое по структуре шкалы балльности справочника [4] и результатов послойного рентгеноструктурного анализа цементованных слоев.

Список литературы

1. Заваров А.С., Баскаков А.П., Грачев С.В. Термическая обработка в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1981. – 84 с.

2. Иванов А.С., Коковьякина С.А., Козлова Е.Н. Особенности формирования структуры науглероженного слоя в процессе цементации низкоуглеродистой мартенситной стали 12Х2Г2НМФТ // ФММ. – 2009. – Т. 107, № 5. – С. 1–8.

3. Иванов А.С., Коковьякина С.А., Перцев А.С. Структура и свойства науглероженных покрытий с ревертированным аустенитом на низкоуглеродистых мартенситных сталях // МиТОМ. – 2010. – № 11. – С. 51–56.

4. Кальнер В.Д. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.

5. Счастливец В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в легированных сталях. – Екатеринбург, 2014. – 236 с.

6. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.

7. Механические свойства мартенситостареющей стали Н18К9М5Т с остаточным ревертированным аустенитом / В.П. Вылежнев, А.А. Сухих, В.Г. Брагин, С.А. Коковьякина // ФММ. – 1993. – Т. 76, вып. 4. – С. 157–165.

8. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник: в 3 т. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – Т. 3. – 919 с.

Получено 10.11.2014

Иванов Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: aleksandr.iv224@yandex.ru

Богданова Мария Витальевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: bmw.1991@list.ru

Ivanov Aleksandr (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Department for Metal Science and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: aleksandr.iv224@yandex.ru

Bogdanova Mariya (Perm, Russian Federation) – Bachelor, Master's Student, Department for Metal Science and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: bmw.1991@list.ru