

УДК 621.77:691.87

Мойсейчик Е.А.

СТРУКТУРНАЯ СЛОИСТОСТЬ АРМАТУРЫ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ СТАЛЕЙ

Введение. Действующие в Беларуси СНБ 5.03.01-02 предписывают применять для ненапрягаемых железобетонных конструкций арматуру классов S240 (A240) (гладкая, ГОСТ 5781) и S400(A400), S500(A500,B500) (периодического профиля, ГОСТ 10884, ТУ РБ 04778771.001, ТУ РБ 190266671.001, ТУ РБ 400074854.025, ТУ РБ 400074854.047 (гладкая)). Такая арматура поставляется белорусскими производителям железобетонных конструкций с металлургических предприятий стран СНГ. В производстве стержневой арматуры для железобетонных конструкций прослеживается устойчивая тенденция к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочности проката [1–6]. Для различных элементов конструкций часто используют арматуру S500. Основные поставщики арматуры на белорусский рынок (РУП «БМЗ» и др.) высоких прочностных характеристик арматурного проката из углеродистых и низколегированных сталей достигают за счет его термообработки [1]. Технология такого производства арматуры разработана в 70-х годах прошлого столетия и подробно описана в литературе [2–5]. В основе этого процесса лежит формирование требуемой структуры проката и свойств его составляющих, дислокационных субструктур в процессе температурно-временных воздействий в линии прокатных станов [2–5]. Наиболее часто термоупрочнение проводится по схеме прерванной закалки, то есть сочетает в себе ускоренное охлаждение после прокатки с последующим самоотпуском [3]. Эта схема позволяет исключить затраты энергоносителей на отдельные операции закалки и отпуска. В то же время при такой технологии не достигается однородность структуры по сечению изделия. Сравнительно низкая прокаливаемость стали и технологические особенности термоупрочнения создают условия для возникновения неоднородности структуры и свойств по сечению проката. Поверхностные слои, подвергнутые наиболее интенсивному охлаждению, должны обладать более высокой твердостью и прочностью, а центральные – наоборот, быть более пластичными. Это связано с различиями в условиях структурообразования приповерхностных и внутренних слоев: если в первых аустенит превра-

щается на стадии закалки при охлаждении, то процессы структурообразования во вторых протекают на стадии самоотпуска в условиях, приближенных к изотермическим. В результате по сечению термоупрочненных изделий создаются условия для формирования градиентных структурно-фазовых состояний с различным уровнем механических и служебных характеристик по слоям. Арматурный стержень в результате такой термообработки получает квазикомпозитное (слоистое) строение [5–10]. Детальные исследования структуры отдельных слоев таких арматурных стержней, их состава и механических свойств начали проводиться лишь в последние годы [7–10]. При этом установлено, что механические свойства арматуры существенно зависят от диаметра арматуры. С ростом диаметра стержней увеличивается длина площадки текучести и равномерная деформация, убывают локализованная деформация, предел текучести и временное сопротивление. Плотность дислокаций и прочностные характеристики выше у наружных слоев стержней, тогда как пластичность выше в центральной зоне. Прочностные и пластические свойства материала различных зон прутка определяются морфологией и дисперсностью строения стали в различных слоях. При образовании изделий из таких арматурных стержней строения необходимо учитывать особенности их строения.

Целью настоящей работы является исследование структуры термоупрочненных арматурных стержней производства РУП БМЗ с исходным слоистым (квазикомпозитным) строением.

Материал и методика исследования. Исследования структуры проводили на образцах диаметром 12, 25 мм из арматурного проката Ат500С, изготовленного по ТУ РБ 04778771.001-97 на РУП БМЗ. Пробы отбирались из стержней арматуры (таблица 1), из которых затем вырезали заготовки, темплеты и готовили шлифы. Подготовка проб производилась фрезой при малых оборотах и интенсивной подачей охлаждающей жидкости в зону реза. Исследования структуры выполняли на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert»

Мойсейчик Евгений Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры СМиТУ Белорусского национального технического университета. Беларусь, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, e-mail: emoiseitchik@mail.ru

Таблица 1. Характеристики арматурных стержней

№ п.п.	Арматура	Ø, мм	Химический состав, %										Механические свойства			
			C *)	Si *)	Mn *)	P **)	S **)	Cr *)	Ni *)	Cu *)	As *)	N ₂ **)	σ _T , Н/мм ²	σ _B , Н/мм ²	Δs, %	Угол изгиба
1	Ат500С	12	19	18	60	23	16	8	9	20	1	8	585,0	675,0	25,5	90
2	Ат500С	25	18	19	58	9	16	13	10	21	1	9	550,0	660,0	20,5	90

Примечания: 1. *) – увеличенное в 100 раз; **) – увеличенное в 1000 раз; 2. Позиции 1,2: прокат арматурный и термомеханически упрочненный по ТУ РБ 04778771.001-97, РУП БМЗ

при увеличениях ×100, ×200, ×500. Структура определялась по ГОСТ 8233-56, оценка балла видманшкетта – по ГОСТ 5640-86. Структурную неоднородность выявляли по измерениям микротвердости прибором «Microtest-II» с нагрузкой на призму 100 г в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76.

Результаты исследования и их обсуждение. Исходная макро-структура арматурных стержней в поперечном и продольном сечениях арматурных стержней показана на рис. 1. На шлифах из проката арматурного и термомеханически упрочненного по ТУ РБ 04778771.001-97 производства РУП БМЗ можно выделить до пяти различных по механическим свойствам слоев расположенных слоев (рис. 1). Результаты измерения микротвердости арматурных стержней в исходном состоянии представлены в графической форме (рис. 2, отсчет участков – от поверхности). Микроструктура приведена на рис. 3-6. Исследования макроструктуры поперечных и продольных сечений арматурных стержней показали, что в сечениях в процессе металлургической обработки сформирован слоистый структурный состав, состоящий из приповерхностного темнотравящегося слоя, светлой сердцевины и переходных зон между ними. Приповерхностный слой состоит из продуктов отпуска мартенсита, наружная кромка которого частично обезуглероживается [1], промежуточные слои – из отпущенного бейнита и феррита; срединный слой содержит вырожденный перлит и феррит с вкраплениями видманшеттового феррита при больших диаметрах стержней. Толщины приповерхностного и промежуточных слоев меньше изменяются с ростом диаметра стержня, чем осевого слоя. Измерения микротвердости в поперечных и продольных сечениях подтверждают наличие слоистого строения у исследованных арматурных стержней. Эта закономерность подтверждается и микроструктурой различных участков арматурных стержней (рис. 3-6). Разброс величин микротвердости (временного сопротивления) для различных слоев термомеханически упрочненного проката колеблется в пределах 130...275 (440...930) МПа (рис. 2).

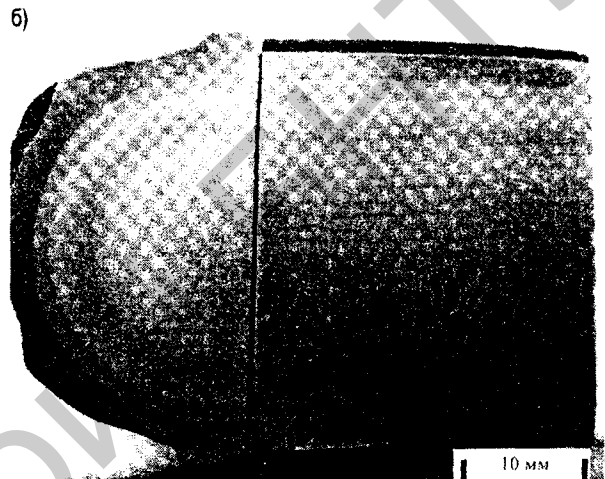
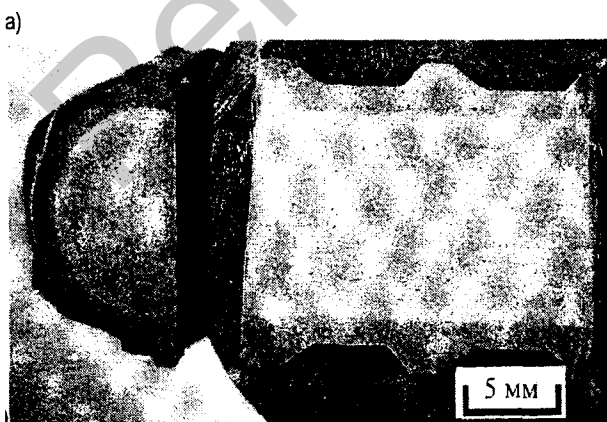


Рис. 1. Макроструктура арматуры: а) – Ø12 мм, б) – Ø25 мм

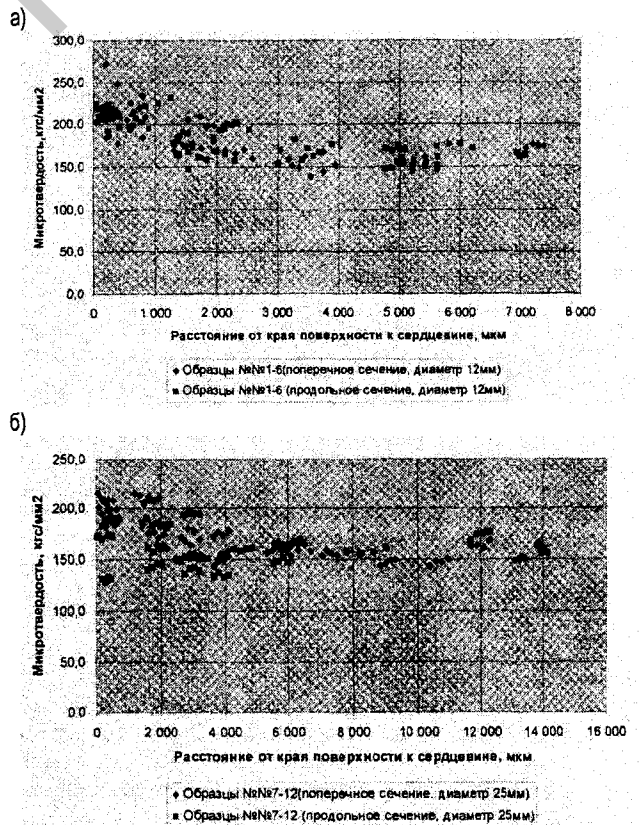


Рис. 2. Распределение микротвердости по поперечному сечению арматурных стержней Ø12,25 мм

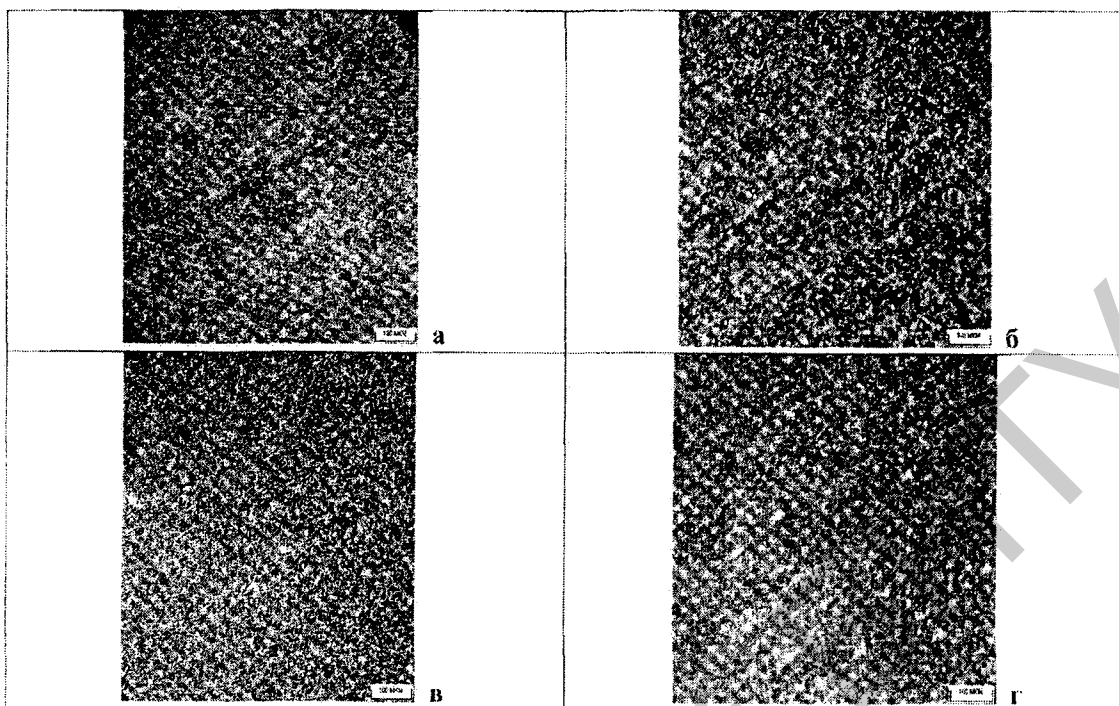


Рис. 3. Микроструктура образца (Ø12 мм) в поперечном сечении, $\times 100$: а – участок у края поверхности; б – участок № 1; в – участок № 2; г – участок № 3

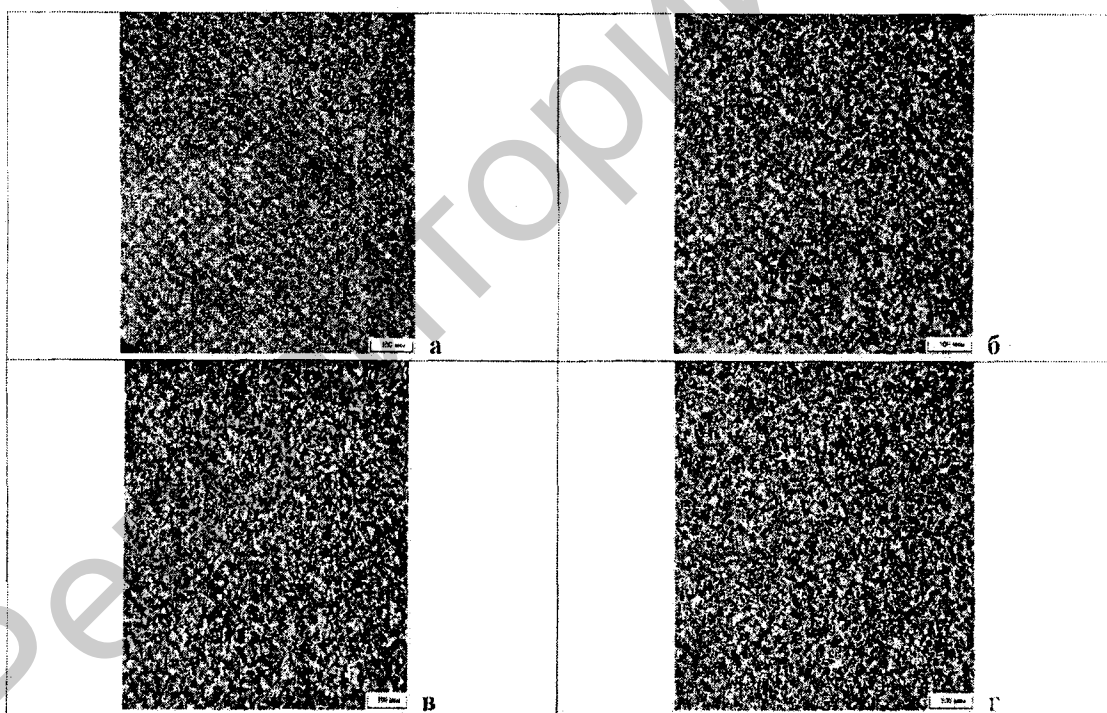


Рис. 4. Микроструктура образца (Ø12 мм) в продольном сечении, $\times 100$: а – участок у края поверхности; б – участок № 1, в – участок № 2, г – участок № 3

Обсуждение результатов. Исследования макроструктуры поперечных и продольных сечений арматурных стержней [7–10] показали, что в сечениях арматурных стержней российского и украинского производства в процессе металлургической обработки формируется слоистый структурный (градиентный, квазикомпозитный) состав. Приповерхностный слой состоит из продуктов отпуска мартенсита, промежуточные слои – из отпущенного бейнита и феррита; срединный слой содержит вырожденный перлит и феррит с вкраплениями видманштеттового феррита (для больших диаметров

стержней). Измерения микротвердости в поперечных и продольных сечениях подтверждают различие механических характеристик слоев исследованных арматурных стержней. Для выяснения причин таких структурных изменений в сечениях стержней могут быть полезными данные работы [11], в которой приведены результаты исследования структуры и микротвердости катаных шаров диаметром 120 мм, термоупрочненных по схеме прерванной закалки. Материал шаров – сталь М74 (0,69–80 % С; 0,18–0,40 % Si; 0,75–1,05 % Mn). Температура прокатки шаров составляла 985–1000 °С. После прокатки шары

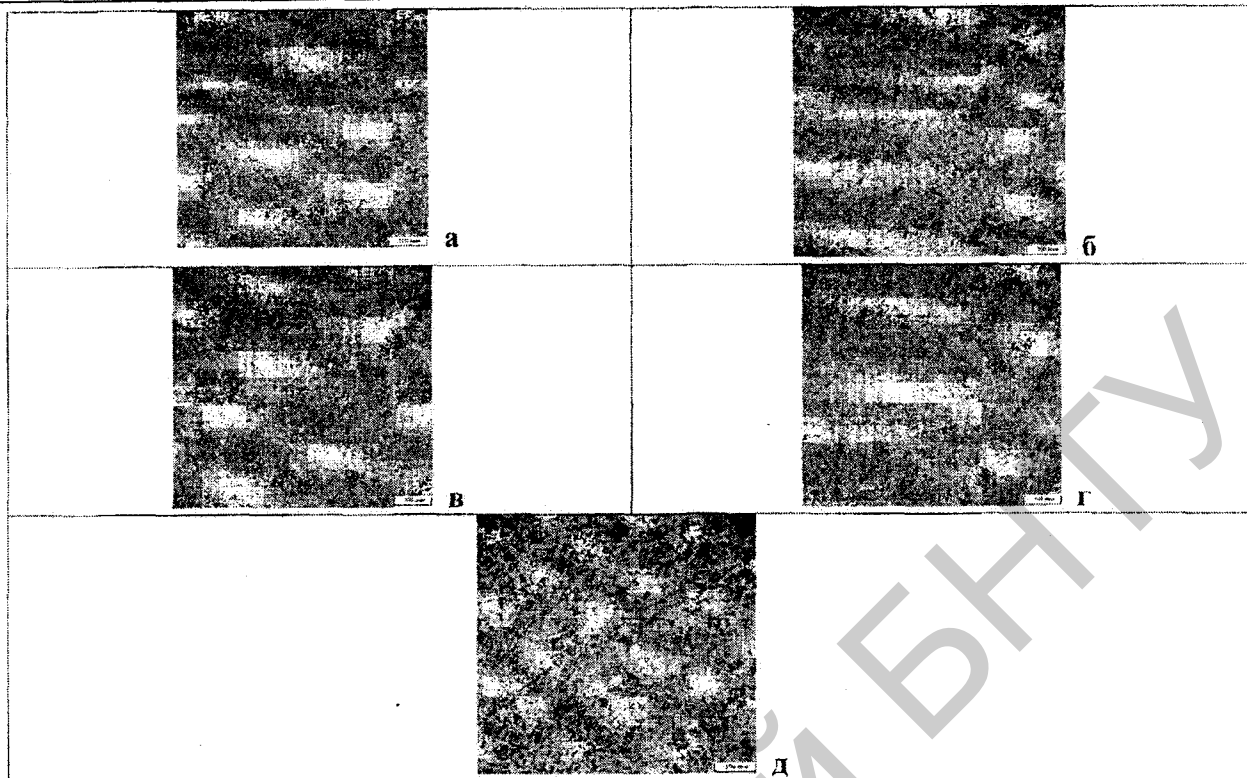


Рис. 5. Микроструктура образца (Ø25 мм) в поперечном сечении, $\times 100$: а – участок у края поверхности, б – участок № 1, в – участок № 2, г – участок № 3, д – участок № 4

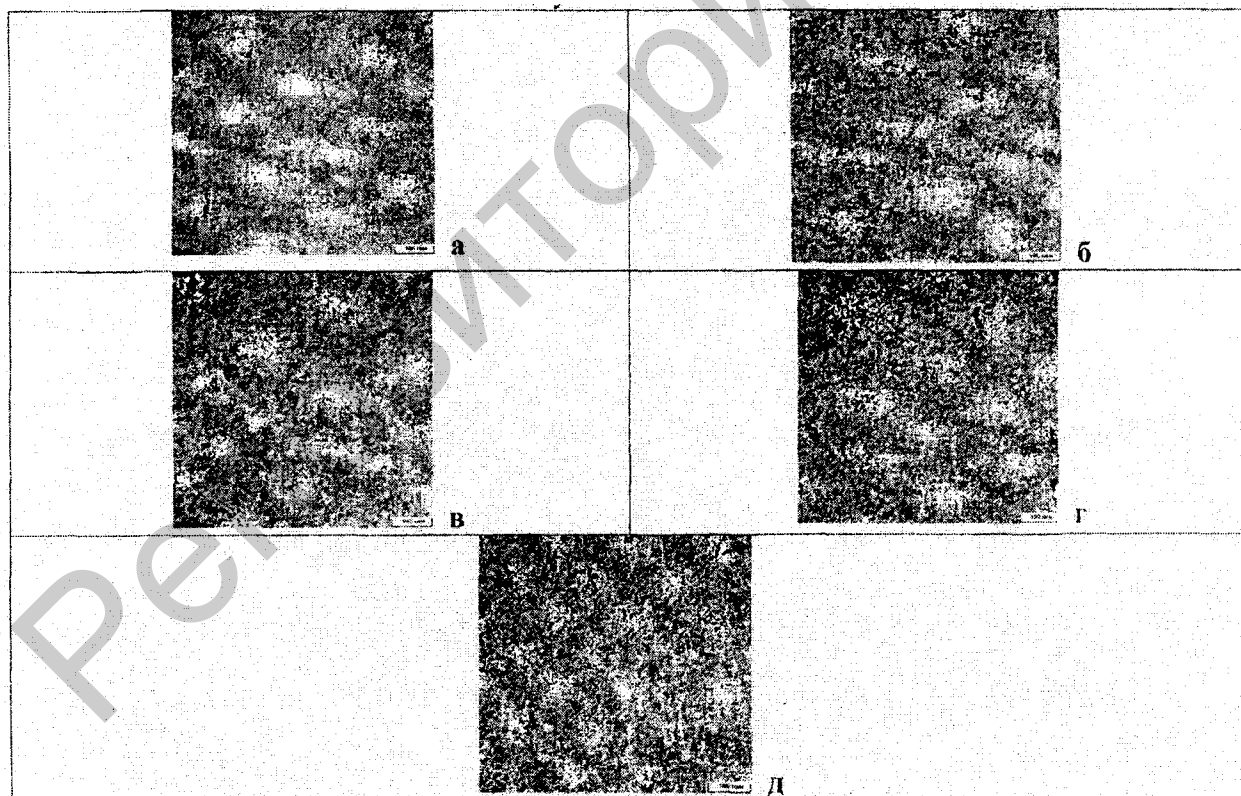


Рис. 6. Микроструктура образца (Ø25 мм) в продольном сечении, $\times 100$: а – участок у края поверхности, б – участок № 1, в – участок № 2, г – участок № 3, д – участок № 4

подстуживали до 880–910 °С и закаливали в воде, затем они самоотпускались на воздухе со средней скоростью ≈ 60 °С/ч. Установлено [10], что продолжительность закалки существенно влияет на распределение твердости в приповерхностных слоях шаров на глубину до

12–15 мм; в более глубоких слоях такое различие незначительное (рис. 7). Таким образом, при термоупрочнении шаров формируются градиентные структуры поверхности к центру), подобные на слоистые структуры в термоупрочненной арматуре.

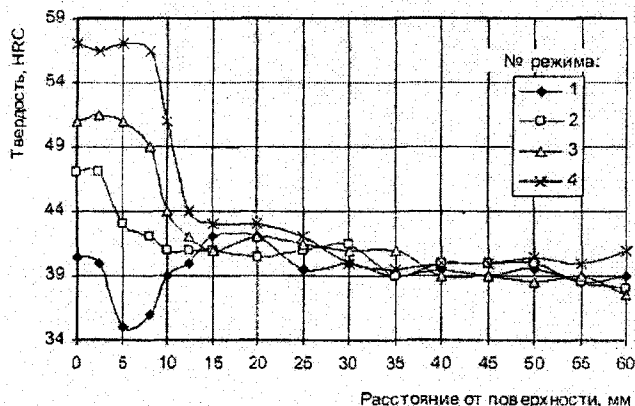


Рис. 7. Распределение твердости по сечению исследованных шаров [11] для режимов закалки: 1 – 45 сек., 2 – 70 сек., 3 – 85 сек., 4 – 105 сек.

В наружном слое шаров, обработанных по режиму № 1, на глубину до 3 мм залегает троостит отпуска с твердостью 440–448 HV. На глубине 4–8 мм наряду с ним фиксируется верхний бейнит с твердостью 350–420 HV. На глубине 10 мм структура состоит из верхнего бейнита и эвтектоида. В более глубоко залегающих слоях фиксируется полностью эвтектоидная структура (троосто-сорбит), микротвердость которой варьируется от 430–440 HV (на глубине 15 мм) до 400–415 HV – в центре шара. Подобные распределения микроструктуры по сечению зафиксированы и в шарах, обработанных по режимам № 2–4. Отличие состоит в том, что увеличение времени закалки при снижении средней температуры приводит к существенным изменениям в микроструктуре приповерхностных слоев шаров. Так, при термоупрочнении по режиму № 4 твердость приповерхностных слоев, имеющих структуру мартенсита отпуска, возрастает до 650–660 HV. На глубине 8–10 мм структура изменяется: по границам зерен залегает трооститная сетка; остальной объем занят крупнопольчатой структурой с твердостью 680–700 HV. На глубине 15 мм и далее к центру залегает троостосорбит закалки с отдельными участками мартенсита. Формирование структуры в слоях на глубине 5–15 мм проходит в три стадии: при закалке, при нагреве слоев в процессе выравнивания температуры по сечению и при самоотпуске. За время закалки аустенит частично успевает превратиться в мартенсит, частично сохраняется в структуре, а соотношение фаз при этом определяется температурой слоя. На то, что часть аустенита сохраняется непревращенной к моменту прерывания закалки, указывает присутствие в этих слоях большого количества верхнего бейнита. Наибольшее количество непревращенного аустенита, соответствует термоупрочнению по режиму № 1. Присутствие в структуре металла на глубине 4–8 мм от 30 до 70 % верхнего бейнита обуславливает аномальное падение твердости в соответствующих слоях шара. С уменьшением средней температуры слоя доля непревращенного аустенита в наружных слоях шаров снижается в связи с более полным развитием мартенситного превращения при закалке. При термоупрочнении по режиму № 4 весь непревращенный аустенит в слоях 8–12 мм претерпевает мартенситное превращение на стадии самоотпуска. При этом в центральных слоях изделий существуют ликвационно обогащенные углеродом и марганцем зоны, в которых аустенит обладает повышенной устойчивостью к распаду.

Тип структурного градиента оказывает влияние на микронапряжения в кристаллической решетке в разных точках по сечению шара. Об этом свидетельствуют результаты рентгенографических исследований образцов, вырезанных на разной глубине шара. На рис. 8 показана зависимость изменения напряжений 2-го рода от температуры самоотпуска и глубины залегания слоя, из которой следует, что снижение температуры самоотпуска приводит к монотонному росту микронапряжений в наружных слоях, в которых при закалке образуется мартенсит (2–3 мм). В слоях на глубине 6–8 мм такое снижение стабилизирует уровень микронапряжений, несмотря на параллельный рост их твердости.

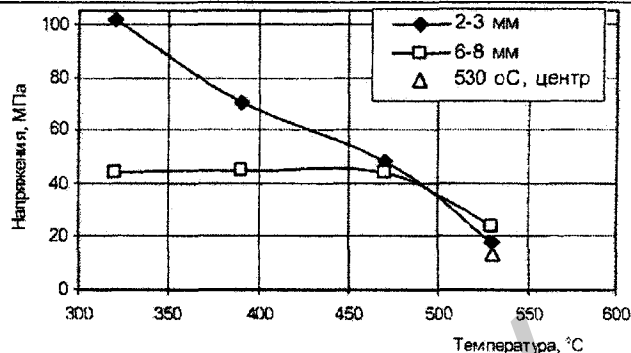


Рис. 8. Влияние температуры самоотпуска на величину микронапряжений в шарах на разной глубине от поверхности [11]

Проанализированные данные статьи [11] показывают, что подбором параметров технологии термоупрочнения можно изменять размеры, структуру и механические характеристики слоев стального проката как шарообразной так и цилиндрической формы.

Заключение

1. Измерения микротвердости в поперечных и продольных сечениях подтверждают наличие слоистого строения у исследованных арматурных стержней производства РУП БМЗ. Эта закономерность прослеживается и по данным измерений микроструктуры различных участков арматурных стержней. На шлифах из проката арматурного и термомеханически упрочненного по ТУ РБ 04778771.001-97 можно выделить до пяти различных по механическим свойствам слоев.
2. Размеры, структуру и механические характеристики слоев арматурных стержней можно изменять при соответствующем подборе параметров технологии термоупрочнения.
3. При расчете и проектировании изделий с использованием растягиваемых ижимаемых квазикомпозитных арматурных стержней, у которых более прочные слои располагаются в приповерхностной зоне, следует учитывать повышенную чувствительность таких стержней к надрезам различной природы, изменения механических характеристик слоев при технологических и эксплуатационных температурных воздействиях, изменения прочности и пластичности слоев в результате воздействия коррозионных сред.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сборник научных трудов специалистов Белорусского металлургического завода, 2001–2008г.г.: В 3 т. / Редкол.: В.И. Грицаенко, Д.М. Кукуй, Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин. – Минск: Технапология, 2009.
2. Стародубов, К.Ф. Термическое упрочнение проката / К.Ф. Стародубов, И.Г. Узлов, В.Я. Савенков. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
3. Узлов, И.Г. Термическая обработка проката / И.Г. Узлов, В.Я. Савенков, С.Н. Поляков. – К.: Техника, 1981. – 159 с.
4. Кукушкин, А.А. Высокопрочная арматурная сталь / А.А. Кукушкин, И.Г. Узлов, В.В. Калмыков [и др.] – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
5. Натапов, А.С. Производство эффективных арматурных профилей для железобетона / А.С. Натапов, Л.Н. Левченко, С.Л. Баскин – М.: Металлургия, 1992. – 208с.
6. Мадатян, С.А. Арматура железобетонных конструкций / С.А. Мадатян – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.
7. Козлов, Э.В. Кривые течения, механизмы разрушения и размерный эффект малоуглеродистых низколегированных сталей с квазикомпозитной структурой / Э.В. Козлов, А.В. Плевков, А.Б. Юрьев, В.Е. Громов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2002. – № 3. – С. 49–60.
8. Юрьев, А.Б. Структура термически упрочненной стержневой арматуры / А.Б. Юрьев, В.Я. Чинокалов, О.Ю. Ефимов, Н.В. Мыскова, О.С. Прокофьева // Технология металлов. – 2005. – № 9. – С. 5–7.
9. Чинокалов, В.Я. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры / В.Я. Чинокалов, А.Б. Юрьев, О.Ю. Ефимов, И.А. Михаленко, Н.В. Мыскова // Технология металлов. – 2005. – № 10. – С. 15–18.

10. Большаков, В.И. Взаимосвязь структурной неоднородности термически упрочнённой арматуры с изменением твёрдости по сечению стержней /В.И. Большаков, В.А. Шеремет, А.О. Чайковская [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Вып. 36. – Ч. 1. – Днепропетровск: ПГА-СА, 2006. – С. 159–167.
11. Ефременко, В.Г. Структурные градиенты в стальных мелющих шарах, термоупрочнённых с прокатного нагрева / В.Г. Ефременко,

Ф.К. Ткаченко, С.О. Кузьмин, О.И. Труфанова, О.И. Бруй, Н.А. Калашников // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов [Электронный ресурс]. – 2009. – Т. 2. – Режим доступа: <http://www.nbu.gov.ua/portal/natura/smm/texts.html>.

Материал поступил в редакцию 07.10.10

MOISSEITCHIK E.A. Structural fittings stratification of low-carbon thermostrengthening steels

The structure of rebar production RUE BMZ. Shown that the reinforcing steel is rolled layered structure with 5 layers of coaxially arranged with different mechanical properties, and reinforcing bar can be regarded as kvazikompozitny rod with a layered structure. The values of microhardness of layers measured in the transverse and longitudinal sections of the same rod, differ among themselves. It is shown that the duration of heat treatment of valves in the flow of the camp should significantly affect the distribution of hardness in the surface layers, and in the deeper layers of this difference should be negligible. It is noted that changes in technology thermostrengthening can adjust the size, structure and mechanical characteristics of the layers of rebar.