

И. А. ВАКУЛЕНКО (ДИИТ), В. Г. РАЗДОБРЕЕВ, О. Н. ПЕРКОВ (Институт черной металлургии НАН Украины)

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИ УПРОЧНЕННЫЙ АРМАТУРНЫЙ ПРОКАТ

Досліджені мікроструктура, механічні та службові властивості високоміцного арматурного прокату, термомеханічно зміцненого за різними режимами.

Исследованы микроструктура, механические и служебные свойства высокопрочного арматурного проката, термомеханически упрочненного по различным режимам.

The article investigates the structure, mechanical and services characteristics of high-strength rebar, thermomechanically strengthened under different cooling modes.

В настоящее время термической и термомеханической обработке с прокатного нагрева подвергается широкий сортамент углеродистых и низколегированных сталей. Арматурный прокат является одним из самых массовых видов продукции черной металлургии, который находит широкое применение в строительной индустрии.

При изготовлении 1 м³ железобетонных конструкций безвозвратно расходуется в среднем около 70 кг стали. В железобетоне арматурный прокат, воспринимая растягивающие нагрузки, в значительной мере определяет эксплуатационные характеристики и их надежность, а также влияет на экономические показатели строительных работ.

Исследовали микроструктуру, механические и служебные свойства арматурного проката диаметром 12 мм из стали марки 20ГС, упрочненного по двум технологическим режимам прерывистого (режим 1) и прерванного (режим 2) охлаждения на мелкосортном стане 250-1 комбината «Криворожсталь».

Макроструктурными исследованиями установлено, что при применении режимов упрочнения с прерывистым (режим 1) охлаждением в макроструктуре стержней более контрастным выглядит прилегающий к поверхности кольцеобразный тонкий (толщиной 0,3...0,4 мм) слой. А в околоосевой зоне дополнительно выделяется прилегающий к кольцеобразному некоторый промежуточный слой, не имеющий четко выраженной границы с остальным полем зоны. При исследовании микроструктуры установлено, что прилегающий к поверхности слой состоит из высокоотпущенного мартенсита (рис. 1, а). Околоосевая зона представлена мартенситом, а при приближении к оси стержня постепенно через мартенситобейнитную структуру переходит в бейнитную (рис. 1, б). Исследование микроструктуры переходного слоя (рис. 1, в) выявило в нем множественные выделения кристаллов избыточного феррита. Избыточный феррит выделялся по границам бывших аустенитных зерен. Больше всего выделений избыточного феррита наблюдается у границы со слоем высокоотпущенного мартенсита.

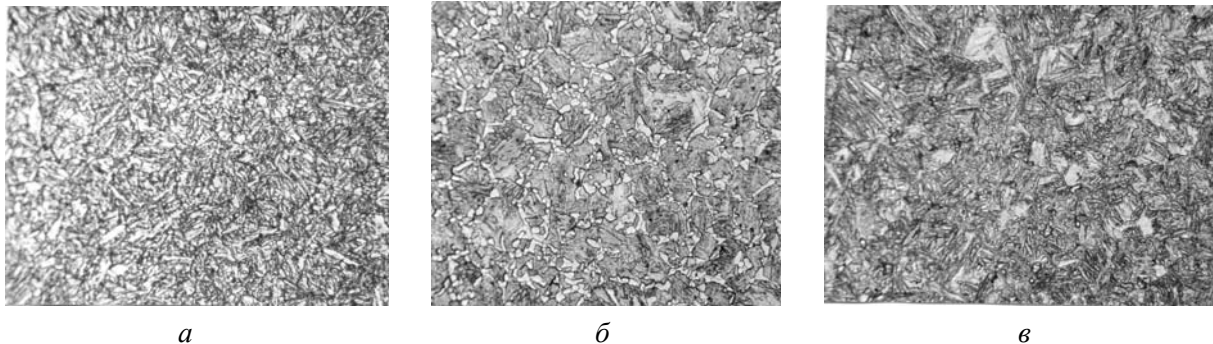


Рис. 1. Микроструктура по сечению арматурного стержня термически упрочненного с применением прерывистого охлаждения (x500):
а – поверхностный слой; б – переходная зона; в – сердцевинный слой

По мере удаления от него количество и размеры кристаллов быстро уменьшаются и структура становится чисто мартенситной. Исследования макро- и микроструктуры термически упрочняемой арматурной стали 20ГС (режим 2) показало, что в поперечном сечении стержня диаметром 12 мм наблюдаются разделенные четкой границей по всей окружности, прилегающей к поверхности, относитель-

но массивный кольцеобразный слой и сердцевинная зона.

Ширина кольцеобразного слоя зависит от количества введенных в трассу упрочнения секций охлаждения. Микроструктурно прилегающий к поверхности кольцеобразный слой состоит из низкоотпущенного мартенсита (рис. 2, а), а в сердцевинной зоне структура представляет собой бейнит (рис. 2, б).

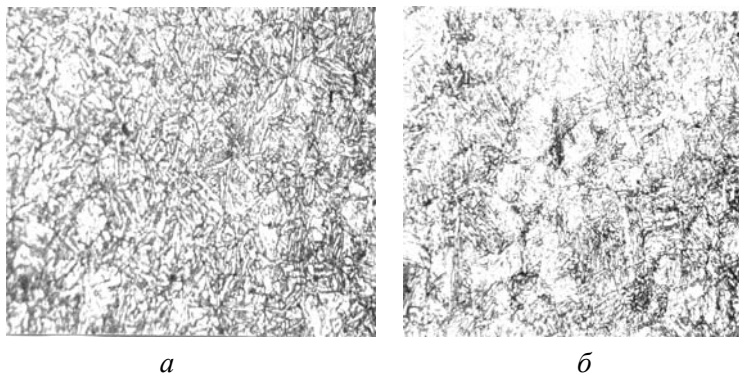


Рис. 2. Микроструктура по сечению арматурного стержня диаметром 12 мм при термическом упрочнении по режиму с непрерывным охлаждением: а – поверхностный слой; б – сердцевинный слой (x500)

Испытания на статическое растяжение показали, что арматурный прокат с высокоотпущенным мартенситным слоем даже при более высоких прочностных свойствах (класс прочности А1000) имеет в среднем более высокие пластические характеристики (режим 1), чем прокат (класс прочности А800) мартенсит которого высокого отпуска не испытывал (режим 2). У такого проката значения условного предела упругости не достигают требуемых по национальному стандарту ДСТУ 3760-98 и межгосударственному стандарту на термоупрочненную арматуру ГОСТ 10884-94 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний арматурной стали 20ГС диаметром 12 мм на статическое растяжение

Номер режима	Механические свойства				
	$\sigma_{0,02}$	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	$\delta_{рав}$
	Н/мм ²			%	
1	778	1 051	1 402	14,0	4,6
	778	1 051	1 402	18,5	4,2
2	693	916	1 275	14,5	4,3
	693	916	1 275	12,5	4,0

Стойкость к коррозионному растрескиванию определяли в соответствии с ДСТУ 3760-98 и ГОСТ 10884-94 в кипящем нитратном растворе при напряжении $0,9\sigma_b$ для классов проч-

ности А800 и А1000. Результаты показали, что, в отличие от арматурного проката без высокоотпущенного слоя и имеющего очень низкую стойкость при испытаниях, прокат с высокоотпущенным слоем обладает стойкостью к коррозионному растрескиванию, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к коррозионно-стойкой арматуре (табл. 2).

Таблица 2

Результаты испытаний арматурной стали 20 ГС на стойкость к коррозионному растрескиванию

Номер режима	Время до разрушения, часов	
	$\sigma_0 = 720$ Н/мм ²	$\sigma_0 = 90$ Н/мм ²
1	220 →	220 →
	220 →	220 →
2	2,0	1,1
	2,5	0,8

Анализ результатов испытаний на усталость (рис. 3) показал, что предел выносливости арматуры, упрочненной по режиму 1, значительно превышает достигнутый для арматуры, упрочненной по режиму 2. Усталостная прочность арматуры с высокоотпущенным слоем выше во всем исследованном диапазоне напряжений цикла, чем арматуры, у которой высокоотпущенный слой отсутствует.

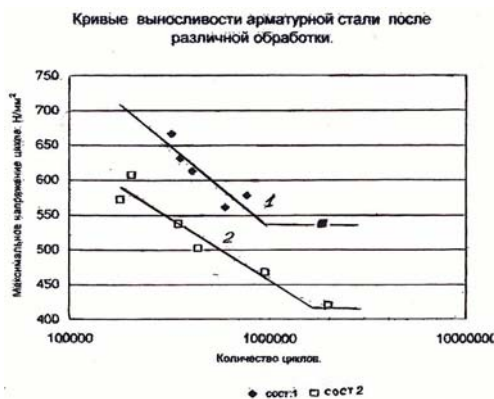


Рис. 3. Кривые выносливости арматурной стали 20ГС с высокоотпущенным мартенситным слоем (1) и без высокоотпущенного слоя (2)

Пластическая деформация после термического или термомеханического упрочнения оказывает существенное влияние на структуру стали, позволяет в широком диапазоне изменять комплекс свойств.

Значительная часть термоупрочненной стержневой арматуры высоких классов изготавливается из низколегированных сталей. При охлаждении металла со скоростями выше критических наблюдаемое пересыщение твердого раствора атомами внедрения является основным фактором повышения прочности свойств. Однако частичный распад пересыщенного раствора за счет нагрева поверхностных слоев теплом осевых объемов приводит к снижению уровня внутренних напряжений, что неизбежно понижает агрегатную прочность проката. С другой стороны, при отпуске поверхностных закаленных объемов наблюдается выделение карбидных частиц, дисперсность и морфология которых определяются температурой самоотпуска. Подвергая такой металл холодному пластическому деформированию, получают прирост прочностных свойств. При этом темп прироста прочности определяется параметрами деформационного упрочнения, характеризующими поведение стали с различным структурным состоянием.

На примере стали 20ХГС2, термической упрочненной в потоке мелкосортного стана 250 Криворожского меткомбината, рассмотрена принципиальная возможность получения за счет холодного деформирования арматуры высоких классов прочности. После достижения температуры конца охлаждения 300...350 °С арматурная сталь 20ХГС2 имеет уровень прочностных свойств, соответствующий классу прочности. Анализ микроструктуры показал довольно существенный градиент структуры: от отпущенного мартенсита на поверхности до различного сочетания объемных долей бейнита с отдельными мартенситными участками в осевых зонах металла.

Способность металла подвергаться холодной пластической деформации, например, при волочении, оценивают по максимально возможной вытяжке (μ), которая, в свою очередь, связана с параметрами деформационного упрочнения

$$\sigma_B = \sigma'_B (\ln \mu)^n,$$

где σ_B – временное сопротивление разрыву; σ'_B – коэффициент прочности; n – коэффициент деформационного упрочнения. Холодное волочение термоупрочненной арматуры диаметром

10 мм из стали 20ХГС2 на 20 %, как и следовало ожидать, привело к росту прочности до 2000...2100 Н/мм², при этом удлинение при испытаниях на расстоянии составило значение порядка 6 %. Прирост деформации до 36 % сопровождается дальнейшим повышением прочности и снижением пластических характеристик. Упрочнение металла при этом уменьшилось и составило лишь 190 Н/мм², а относительное удлинение достигло значений около 2,5 %. Таким образом, подвергая холодной пластической деформации волочением до 20 % предварительно термоупрочненную сталь 20ХГС2 на класс прочности, можно получать арматуру с прочностью 2000 Н/мм² при относительном удлинении порядка 5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков В. И. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности / В. И. Большаков, К. Ф. Стародубов, М. А. Тылкин. – М.: Металлургия, 1977. – 200 с.
2. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 1172 с.
3. Вакуленко И. А. Влияние доли термически упрочненного слоя на прочность низкоуглеродистого проката / И. А. Вакуленко, В. Г. Раздобреев // Металлы, 2006. – № 2. – С. 89–93.
4. Вакуленко И. А. Зависимость предела текучести от субструктурных характеристик термически упрочненной низкоуглеродистой стали 12ГС2 / И. А. Вакуленко, В. Г. Раздобреев // Металлы, 2005. – № 4. – С. 40–45.
5. Раздобреев В. Г. Влияние степени деформации волочением на свойства термически упрочненных низкоуглеродистых сталей // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов / В. Г. Раздобреев, И. А. Вакуленко, О. Н. Перков. – Харьков, 2005. – С. 170–173.
6. Вакуленко И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании. – Д.: Gaudeamus, 2003. – 94 с.

Поступила в редколлегию 07.07.2006.