



УДК 669.74

Поступила 06.09.2013

Е. П. БАРАДЫНЦЕВА, Н. А. ГЛАЗУНОВА, С. В. СТЕФАНОВИЧ, О. В. РОГОВЦОВА,  
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АРМАТУРНОГО ПРОКАТА

*В данной статье описано исследование, проведенное в лаборатории металловедения, по определению наличия водорода в арматуре в зависимости от времени вылеживания и профиля арматуры, а также его влияния на пластические свойства арматурного проката. Для выявления наличия водорода в готовом арматурном прокате был применен метод глицериновых проб, суть которого заключается в том, что при выделении газа из металла пузырьки задерживаются на поверхности поперечных образцов под слоем глицерина. Выявленные закономерности позволяют рекомендовать мероприятия для обеспечения стабильных механических свойств термоупрочненной арматуры путем создания условий для снижения насыщенности стали водородом, предупреждая, тем самым, появление водородного охрупчивания арматуры на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».*

*The research carried out in laboratory of metal science on detection of hydrogen presence in reinforcement depending on period of aging and reinforcement profile and also its influence on plastic properties of reinforcing bar is described in this article. The method of glycerine tests was applied for identification of hydrogen presence in finished reinforcing bar, the essence of which is in the fact that at gas emission from metal the bubbles stay too long on the surface of cross samples under glycerin layer. The revealed regularities enable to recommend actions for providing stable mechanical properties of the heat-strengthened reinforcement by creation of conditions for lowering of steel saturation with hydrogen, preventing thereby occurrence of hydrogen embrittlement of reinforcement on JSC «BMZ» – management company of holding «BMK».*

Арматурный прокат является одним из самых массовых видов продукции черной металлургии, который находит широкое применение в строительной индустрии. В последнее время наиболее широкое распространение получила высокопрочная арматура класса 500–800.

Термомеханическое упрочнение стержневой арматуры в потоке мелкосортных станов с прерывистым охлаждением позволяет повысить на 20–30% пластические характеристики, сопротивляемость повторным нагревам при сохранении заданного уровня прочности. Получаемая таким способом арматура признана высокоэффективной продукцией, надежной при использовании в строительных конструкциях. Однако наряду с неоспоримыми достоинствами выявились и некоторые негативные моменты, в частности, термическое и термомеханическое упрочнение стали способствуют усилению чувствительности к повышенному содержанию в ней металлургического водорода.

Водород, присутствующий в стали, влияет на ее эксплуатационные свойства и приводит к специфическим металлургическим дефектам: образованию флокенов и водородному охрупчиванию стали. Водородное охрупчивание в арматуре про-

является снижением пластических свойств металла [1, 2].

Основными методами, позволяющими предупредить водородное охрупчивание арматуры, являются вылеживание непрерывнолитой заготовки перед прокаткой и вылеживание готового арматурного проката. Для определения эффективности процедуры вылеживания арматуры после деформации на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» было проведено исследование по определению наличия водорода в арматуре в зависимости от времени вылеживания и профиля арматуры, а также его влияния на пластические свойства. Для исследования был выбран массив плавок арматуры профилей № 10–32 класса прочности 500 с более низкими и более высокими показателями относительного удлинения, полученных при первичных механических испытаниях.

Выплавку, разливку и прокатку плавок арматуры из взятого массива осуществляли согласно технологической документации в одинаковых условиях.

Химический состав испытанных образцов соответствовал требованиям нормативных документов. Значительных различий в процентном содер-

жании химических элементов между образцами с более низкими и более высокими показателями пластичности не выявлено.

Результаты механических испытаний первичных и после вылеживания некоторых плавок приведены в таблице.

Результаты первичных и повторных (после вылеживания) механических испытаний арматуры

Номер плавки	Профиль	Марка	Первичные испытания	Повторные испытания
1	16	A500HW	$A_{gt}$ min-10,1; max-16,4; ср-12,6	min-12,1; max-17,0; ср-14,0 (через 21 день)
2	32	S500	$\delta_5$ min-12,9; max-14,4; ср-13,7	min-15,5; max- 20; ср-17,7 (через 14 дней)
3	28	A500C	$\delta_5$ min-10,5; max-13,5; ср-12,0	min-14,5; max-17,5; ср-16,2 (через 5 дней)
4	28	A500C	$\delta_5$ min-12,5; max-15,5; ср-14,0	min-15,5; max-18,5; ср-17,0 (через 4 дня)
5	20	A500HW	$A_{gt}$ min-10,5; max-14,0; ср-12,3	min-14,0; max-14,8; ср-14,4 (через 14 дней)
6	10	A500C	$\delta_5$ min-21,0; max-23,0; ср-21,7	

Как видно из таблицы, после вылеживания арматуры пластические показатели улучшаются.

В макроструктуре поперечного сечения исследуемых образцов несплошностей, вызванных наличием усадочных раковин, рыхлостей, пузырей, трещин, расслоений, шлаковых включений, не выявлено. Существенных различий в макро-, микро-структуре и загрязненности неметаллическими включениями не обнаружено. Кольцо самоотпуска – ярко выраженное с четкими границами по периметру (рис. 1).

Микроструктура образцов с более низкими и более высокими показателями пластичности пред-

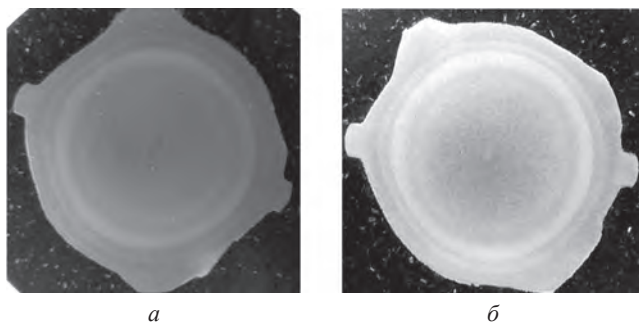


Рис. 1. Макроструктура: образца плавки № 5 с более низкими показателями пластичности при первичных механических испытаниях (а); образца плавки № 5 с более высокими показателями пластичности при первичных механических испытаниях (б)

ставляет собой у поверхности структуру отпуска, в центре – структуру закалки. Различий в структуре и химической неоднородности не выявлено. Дальнейший металлографический анализ показал, что различий в размере аустенитного зерна нет. Размер аустенитного зерна всех образцов соответствовал 7, 6,8 номерам шкалы ГОСТ 5639.

Металлографические методы исследования и анализ технологии производства арматурного проката не позволили однозначно установить причину получения пластических характеристик арматуры на нижнем допустимом пределе.

Анализ литературы показал, что в большинстве случаев изменение механических свойств арматурного проката на других металлургических предприятиях не могло быть объяснено изменением химического состава стали, параметров прокатки и термического упрочнения. Более того, наблюдалось также изменение пластических свойств термомеханически упрочненной арматуры при вылеживании, что указывало на возможное водородное охрупчивание.

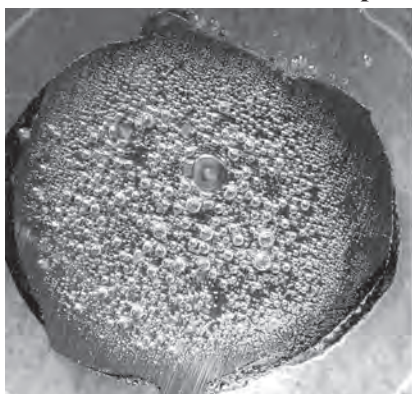
Содержание водорода в арматурной стали на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» не регламентируется.

Для определения наличия водорода в арматурном прокате использовали метод глицериновых проб, суть которого заключается в том, что при выделении газа из металла пузырьки задерживаются на поверхности поперечных образцов под слоем глицерина [3].

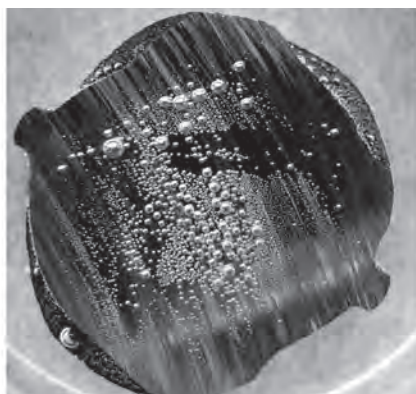
Для проверки степени влияния водорода на пластические свойства арматуры проведены исследования по определению наличия водорода в арматуре в зависимости от времени вылеживания и профиля арматуры. От прутков арматуры с более низкими значениями относительного удлинения, а также для сравнения от прутков с более высокими показателями пластичности вырезали поперечные образцы толщиной 10 мм и помещали в емкость с глицерином.

На поверхности поперечных сечений образцов с более низкими значениями относительного удлинения через 3 ч начиналось выделение газовых пузырьков. Через 1 сут количество пузырьков увеличивалось, а на следующий день увеличивался их размер. В последующие дни размер и количество пузырьков не менялись. В течение недели каждый день от той же пробы на расстоянии 50 мм от последнего реза вырезали по одному образцу толщиной 10 мм и также помещали в емкость с глицерином. С каждым днем вылеживания арматуры количество выделившихся пузырьков на поверхности поперечных образцов уменьшалось

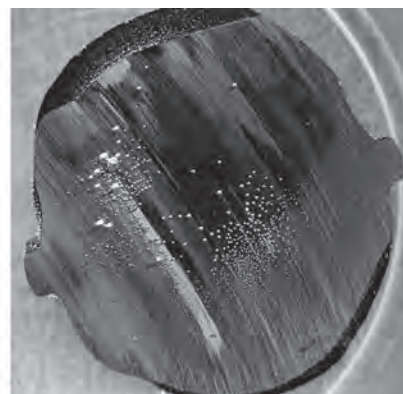
**Плавка № 5, арматура № 20 с более низкими показателями пластичности**



Проба № 1 в первые сутки после прокатки



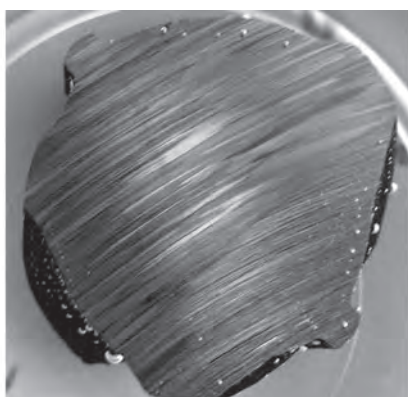
Проба № 2 после вылеживания арматуры 2 сут



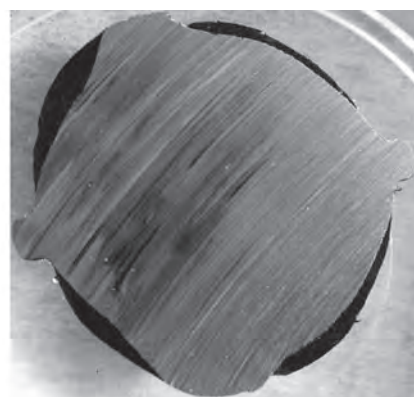
Проба № 3 после вылеживания арматуры 4 сут



Проба № 4 после вылеживания арматуры 5 сут



Проба № 5 после вылеживания арматуры 7 сут



Проба № 6 после вылеживания арматуры 45 сут

**Плавка № 6, арматура № 10, пробы с более высокими показателями пластичности из разных пакетов после первичных испытаний**

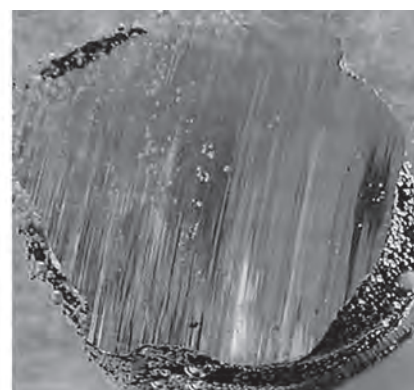
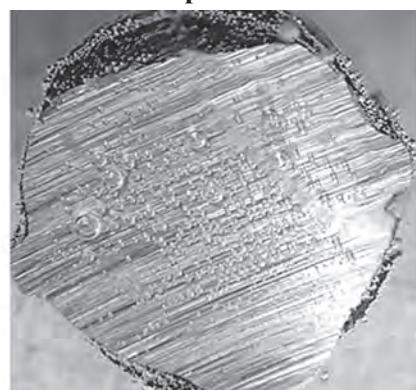
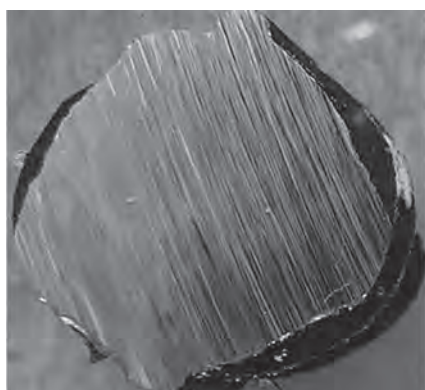


Рис. 2. Результаты испытаний арматуры методом глицериновых проб

и через неделю выделение практически прекращалось.

Аналогично исследовали пробы из разных пакетов одной плавки с более высокими пластическими показателями, полученными при механических испытаниях в первые сутки после прокатки. На всех пробах выделилось разное количество пузырьков. Такое распределение пузырьков говорит о неравномерной газонасыщенности образцов по длине и сечению. Но в данном случае количество и размер пузырьков были незначительными.

Проведенные опыты показали, что количество газа уменьшалось с увеличением времени вылеживания арматуры после прокатки. Также выявлена закономерность: чем крупнее профиль, тем больше его газонасыщенность, так как требуется больше времени для выхода газа на поверхность. Поэтому при первичных механических испытаниях более низкие показатели пластичности получены в основном на профилях № 16–32.

Фотографии глицериновых проб плавки № 5 и 6 приведены на рис. 2.

Пробы с различными сроками вылеживания сфотографированы после нахождения их в глицерине 1 сут.

Для обеспечения стабильных механических свойств термоупрочненной арматуры необходимо создать условия для снижения насыщенности стали водородом. Так, на одних предприятиях при производстве высокопрочного горячекатаного арматурного проката дегазация производится путем выдержки заготовок при температуре выше 400 °С [4], на других предприятиях дегазацию производят при температуре 900–1000 °С в течение 3–6 ч [5]. На некоторых предприятиях апробирована технология регламентированного охлаждения заготовок, предназначенных для производства высокопрочного арматурного проката, заключающаяся в применении медленного охлаждения (0,005–0,006 °С/с) в интервале температур 850–600 °С [6, 7].

Многие предлагают пассивную форму борьбы с водородной хрупкостью, заключающуюся в вылеживании готового проката до достижения им требуемых механических свойств [8–10].

Французские и американские ученые предлагают для производства арматурного проката создание сталей, не склонных к водородному охрупчиванию [11].

Существует предположение, что водород из стали полностью не удаляется, а, скапливаясь в коллаторах (пустотах), остается там [12]. В этих случаях металл после вылеживания выдерживает стандартные испытания, но может разрушиться при статических нагрузках, особенно в зонах со значительным градиентом температур. Этот эффект наиболее опасен для высокопрочной термоупрочненной арматуры, так как арматурный прокат классов А800 и А1000 является предварительно напрягаемым.

Также важное значение имеет подразделение водородной хрупкостью на обратимую и необратимую. Под обратимостью водородной хрупкости понимают восстановление пластичности металла

в результате десорбции водорода из металла в процессе вылеживания при комнатной температуре или в результате отжига либо отпуска на воздухе или в вакууме. Если после удаления водорода из металла в нем остаются дефекты, снижающие пластичность, то водородную хрупкость называют необратимой.

Для предотвращения появления водородного охрупчивания арматуры на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» необходимо ужесточить контроль влажности материалов и оборудования при выплавке и разливке, перед прокаткой производить вылеживание непрерывнолитой заготовки.

### Выводы

1. Проведенные исследования наличия водорода в арматуре методом глицериновых проб дают основание утверждать, что причиной снижения пластических свойств арматуры является водород.

2. Результаты исследований говорят о неравномерной газонасыщенности образцов по длине и сечению, а также выявлена закономерность: чем крупнее профиль, тем больше его газонасыщенность, так как требуется больше времени для выхода газа на поверхность.

3. При вылеживании арматуры после прокатки наблюдается улучшение пластических свойств термомеханически упрочненной арматуры. Длительность вылеживания должна варьироваться в зависимости от химического состава стали, профиля арматуры, температурных параметров окружающей среды.

4. При возникновении необратимой водородной хрупкости арматуры метод вылеживания не эффективен.

5. Для недопущения образования в арматурном прокате водородной хрупкости целесообразно перед прокаткой производить вылеживание непрерывнолитой заготовки.

### Литература

1. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали. Учеб. для вузов. М.: Мир, ООО «Изд-во АСТ», 2003.
2. Касаткин Г. Н. Водород в конструкционных сталях. М.: Интермет Инжиниринг, 2003.
3. Морозов А. Н. Водород и азот в стали. Л.; М.: Металлургиздат, 1950.
4. Гуляев А. П., Ильченко М. М. Исследование и совершенствование технологии производства арматурной стали 23Х2Г2Т // Сталь. 1977. № 8. С. 751–753.
5. А. с. СССР № 1102816: Способ изготовления стальных кольцевых изделий / В. И. Шаповалов, Н. В. Антипова, В. В. Трофименко и др. Б. И. 1984. № 26. Бюл. изобрет., 1984. № 3.
6. Водородное охрупчивание высокопрочной низкоуглеродистой кремнемарганцовистой арматурной стали / В. Т. Черненко, О. Г. Сидоренко, И. П. Федорова и др. // Сталь. 1988. № 6. С. 85–89.
7. А. с. СССР № 1335573: Способ производства высокопрочной стержневой арматуры / О. Г. Сидоренко, В. К. Бабич, И. П. Федорова и др. Бюл. изобрет., 1987. № 3.
8. Влияние водорода на пластические свойства высокопрочной арматурной стали 80С / В. М. Тупилко, В. С. Сапиро, В. Т. Терещенко, К. С. Алферов // МиТОМ. 1971. № 2. С. 64–65.

9. Исследование влияния водорода на комплекс сдаточных механических свойств термомеханически упрочненной арматурной стали. Отчет о НИР. Днепропетровск, 1989.
10. Влияние водорода на механические свойства готового проката / И. Н. Смияненко, М. А. Бабенко, В. А. Щур, И. А. Гунькин, Ю. Д. Костенко // Теория и практика металлургии. 2004. № 3–4.
11. Atomic mechanism and prediction of hydrogen embrittlement in iron. Jun Song & W. A. Curtin.
12. О природе разрушений высокопрочной термически упрочненной арматурной стали / Б. А. Кустов, Н. В. Пушница, Е. Д. Демченко и др. // Сталь. 1994. № 6. С. 69–74.