

УДК 621.771.25

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ НИОБИЕМ
ВЗАМЕН ВАНАДИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ГОРЯЧЕКАТАНОЙ АРМАТУРЫ****Ю. Л. Бобарикин, А. И. Пости***Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Наиболее распространенным микролегирующим элементом при производстве арматуры класса 500 массового назначения является ванадий. Технология производства этой продукции является многостадийной и затратной, поэтому применение феррованадия делает производство ванадийсодержащей арматуры нерентабельной. В связи с этим возникла необходимость снижения себестоимости готовой продукции. Предложено заменить феррованадий на феррониобий с сохранением всех механических, физических и эксплуатационных характеристик металла арматуры.

Цель работы – определить влияние количественного содержания ниобия в стали при производстве горячекатаной арматуры S-500WC в бухтах на стане 370/150 ОАО «БМЗ» в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 при различных температурно-скоростных параметрах проката.

Нормируемыми показателями механических свойств арматурной стали S-500WC всех арматурных профилей (№ 8–16) в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 являются – предел текучести $R_e = 500–650$ МПа, пластичность $R_m/R_e = 1,15–1,35$. Относительное удлинение A_{10} не менее 11 % и A_{gt} не менее 7,5 %.

Как правило, микролегирование ниобием ассоциируется с термомеханической (ТМ) прокаткой, при которой либо до, либо во время конечной прокатки происходит подавление рекристаллизации аустенита до такой степени, чтобы фактически рекристаллизация аустенита не произошла, т. е. прокатка при температуре, при которой не происходит рекристаллизация стали или кратко T_{nr} . При дальнейшей горячей прокатке аустенитные зерна будут эффективно «расплющиваться», т. е. удлиняться, что является положительным эффектом. Эту критическую температуру в °С можно приблизительно определить, используя опубликованные уравнения [1]:

$$T_{nr} = 887 + 464C + (6445Nb - 664Nb^{1/2}) + (732V - 230V^{1/2}) + 890Ti + 363Al - 357Si.$$

Широко известно, что замедление рекристаллизации аустенита связано с явлением примесного торможения атомами ниобия и главным образом за счет вызванного деформацией выделения «свежих» или «новых» фаз Nb (C, N). В результате при последующих восстановлениях аустенитные зерна становятся удлиненными и, таким образом, образуют большую эффективную площадь поверхности границ зерен. Вместе с образованием полос деформации внутри зерен способность к образованию ферритных зерен существенно увеличивается. Именно этот процесс образования расплющенного или удлиненного аустенита, который называют «улучшением» структуры и основной характеристикой классической термомеханической прокатки (ТМ), что, в свою очередь, приводит к развитию более мелкого ферритного зерна и, следовательно, более высокой прочности и улучшенной ударной вязкости (уравнение Холла–Петча).

В соответствии с общепринятой практикой для этого должно быть достаточное количество растворенного ниобия в начале процесса, так как в итоге количество рас-

творенного ниобия будет определяющим в эффективности ТМ прокатки за счет примесного торможения и выделения, вызванного деформацией. Следовательно, в целях максимально возможного увеличения эффективности ниобия требуется достаточно высокая температура предварительного нагрева заготовки для повторного введения ниобия в раствор в высокотемпературную аустенитную микроструктуру. Эта критическая температура в первую очередь зависит от содержания углерода С, азота N и ниобия в самой стали. Условия равновесия для растворения микролегирующего элемента можно рассчитать с помощью «произведения растворимости», которое эффективно обеспечивает управление этой критической температурой, при которой достигается полная растворимость. Обычно применяемое произведение растворимости в опубликованной литературе представлено Ирвином и Пикерингом [2]:

$$\text{Log}[\text{Nb}][\text{C} + 12/14\text{N}] = 2,26 - 6700/T,$$

где T – температура растворимости, °К.

Уравнение показывает, что путем снижения содержания углерода и азота можно использовать больше ниобия для процесса ТМ прокатки, а также для вторичного дисперсионного упрочнения. Кроме того, для заданного содержания углерода и азота применение более высокой температуры позволит использовать больше ниобия (в качестве растворенного вещества). Однако для коммерческой горячей прокатки арматуры существуют некоторые ключевые факторы, которые при первоначальном рассмотрении, исходя из вышеизложенного, позволяют предположить, что роль ниобия в арматуре может быть ограничена: 1) температурами нагрева < 1150 °С; 2) более высоким содержанием углерода > 0,20 % С; 3) высокими обычными температурами чистовой прокатки > 975 °С.

Освоение технологии производства арматуры S-500WC в бухтах четырехстороннего периодического профиля происходило на трех плавках с различным содержанием ниобия (см. таблицу).

Содержание ниобия в разливочной пробе, углеродный эквивалент

Номер плавки	Содержание ниобия, %	Углеродный эквивалент
1	0,0594	0,515
2	0,0282	0,448
3	0,0241	0,422

Температура поверхности непрерывно литых заготовок сечением 140 × 140 мм после нагрева в проходной нагревательной печи стана 370/150 и последующем прохождении гидросбива перед задачей в первую прокатную клетку составляла 1080 ± 20 °С.

На рис. 1 представлена зависимость механических свойств арматуры S-500WC плавки № 1 микролегированной ниобием от температуры самоотпуска в зоне виткообразователя. При каждой последующей прокатке увеличивалась температура в зоне виткообразователя (температура самоотпуска). Можно отметить, что до температуры 730 °С на виткообразователе, стабильно имеем предел текучести выше 500 МПа. При увеличении этой температуры значение предела текучести снижается и увеличивается пластичность металла. Во всех случаях прокатки эстафетных заготовок значение пластичности металла превышает требуемые (1,15–1,35) ввиду высокой прочности, данная ситуация объясняется химическим составом стали. Также во всех

случаях производства арматуры профилей № 8–14 при механических испытаниях образцов зафиксированы несоответствия A_{gt} при норме не менее 7,5 %, большинство значений ниже либо находятся на минимально допустимом уровне.

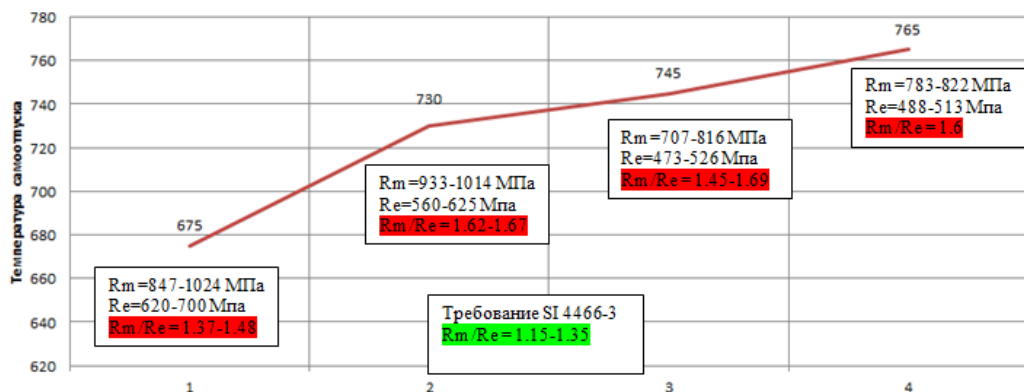


Рис. 1. Зависимость механических свойств арматуры S-500WC от температуры самоотпуска (в зоне виткообразователя): 1, 2 – профиль № 8; 3 – профиль № 10; 4 – профиль № 14

Ввиду неполучения требуемых механических свойств в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013 на плавке № 1 было принято решение провести эстафетную прокатку плавки № 2. Температурно-скоростные параметры производства представлены на рис. 2 со скорректированным химическим составом по количественному содержанию ниобия и углеродному эквиваленту (см. таблицу).

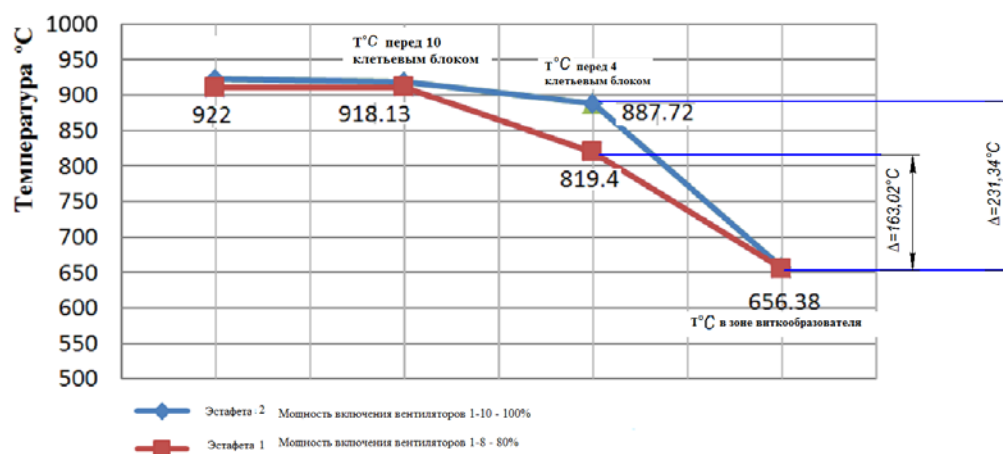


Рис. 2. Температурный режим производства арматурного профиля № 8 марки стали S-500WC плавки № 2

По результатам эстафеты № 1 плавки № 2 были получены несоответствующие значения механических свойств в соответствии с требованиями израильского стандарта SI 4466-3:2013, а именно отношение прочности к текучести R_m/R_e (при норме 1,15–1,35, факт 1,36–1,43), остальные значения соответствовали стандарту. Данное несоответствие объясняется высокими значениями предела прочности $R_m = 711–736$ МПа.

С целью увеличения предела текучести для соответствия стандарту по механическим свойствам (показатель пластичности R_m/R_e) была проведена вторая эстафета плавки № 2, в которой был увеличен градиент между температурой перед ТМВ и температурой самоотпуска в зоне виткообразователя. Режимы двухстадийного охлаждения арматуры эстафеты № 2 представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, температурный градиент увеличился на 68,32 °С. Положительных результатов также достигнуто не было.

После проката эстафет двух плавок № 1, 2 и, проанализировав полученные результаты механических испытаний, которые не соответствуют требованиям израильского стандарта, было принято решение скорректировать химический состав стали в сторону уменьшения легирующих элементов, а именно снижено содержание Nb и углеродного эквивалента – плавка № 3 (см. таблицу). Все результаты механических испытаний после производства плавки № 3 (см. таблицу) соответствуют требованиям израильского стандарта SI 4466-3:2013.

Таким образом, разработан химический состав стали, позволяющий получить механические свойства арматуры S-500WC в соответствии с SI 4466-3 с использованием микролегирования ниобием взамен ванадия.

На основе данного химического состава разработаны температурно-скоростные параметры производства арматуры S-500WC – профиля № 8, 12, 14, 16, микролегированной ниобием.

Выявлены основные факторы, влияющие на механические свойства арматуры S-500WC микролегированной ниобием, такие как температура конечной деформации, способ водяного распределения и охлаждения в водяных камерах, температура самоотпуска.

Литература

1. Yue S. and Jonas J. J. The three critical temperatures of steel rolling and their experimental determination. *Materials Forum*, 14, 1990. – P. 245–252.
2. Irvine K. J., Pickering F. B. and Gladman T., *J. Iron Steel Inst.*, 205 (1967). – P. 161–182.
3. Speich G. R. [et al.], in “Phase Transformations in Ferrous Alloys”, ed. A. R. Marder [et al.], (TMSAIME, Warrendale, PA, USA, 1984)/ – P. 341–390.

УДК 624

К ВОПРОСУ О НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

И. Н. Плющевский, Е. А. Бородавко

*Государственное научное учреждение «НИЭИ Минэкономики
Республики Беларусь», г. Минск*

Необходимость повышения эксплуатационной надежности и срока службы изделий различных отраслей промышленности, работающих в условиях той или иной степени экстремальности (температура, агрессивные среды, эрозионное воздействие), ставит задачу разработки новых материалов.

Зачастую предприятие интересуется новым материалом, как правило, в виде изделия, готового непосредственно для использования в производстве. В условиях, например, предприятий Министерства промышленности Республики Беларусь (далее – Минпром) говорить о новом материале требуемой функциональности можно, как правило, только как об изделии. Непосредственно материал как сырье или полуфабрикат, из которого изготавливается та или иная деталь или изделие, в случае металла