

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, Г.С. Гун,
Г.Ш. Рубин, М.А. Полякова, Д.К. Долгий*

CHARACTERISTICS OF DEFORMATION PROCESSING OF HIGH-STRENGTH REINFORCEMENT FOR THE NEW GENERATION REINFORCED CONCRETE TIES

*A.G. Korchunov, M.V. Chukin, G.S. Gun,
G.Sh. Rubin, M.A. Polyakova, D.K. Dolgy*

Проведен комплекс исследований по возможности применения для производства высокопрочной арматуры больших диаметров высокоуглеродистой легированной стали 80ХФЮ. Предложен критерий оценки равномерности напряженного состояния в очаге деформации заготовки при волочении. На основе исследований равномерности напряженного состояния по переходам маршрутов волочения для получения качественной продукции выбран маршрут с убывающими обжатиями.

Ключевые слова: высокопрочная арматура, высокоуглеродистая сталь, маршрут волочения, критерий оценки напряженного состояния, микротвердость.

The authors studied the possibility of application high-carbon alloy steel 80KhFYu for manufacturing high-strength large diameter reinforcement. A criterion is offered for assessment of the stressed state uniformity of the work piece deformation zone during drawing. On the basis of the study of stressed state uniformity for various drawing sequences, the drawing sequence with decreasing reduction was chosen for manufacturing a high quality product.

Keywords: high-strength reinforcement, high-carbon steel, drawing sequence, assessment criterion of the stressed state, microhardness.

Мировой тенденцией в области технологий производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал является переход от технологий горячей прокатки и термического упрочнения к технологиям деформационного упрочнения в сочетании с последующей механотермической обработкой. Реализуются такие технологии на производственных комплексах, обладающих большей технологической гибкостью и мобильностью.

В европейских странах для производства высокопрочной арматуры широкое распространение получила технология, основанная на деформационном упрочнении в сочетании с механотермической обработкой – отпуском под сильным натяжением. Такое одновременное воздействие обеспечивает высокие упругие свойства в сочетании с высокими пластическими характеристиками готовой продукции. Релаксационная стойкость арматуры увеличивается в три-четыре раза и очень мало изменяется с течением времени. Полученную таким способом арматуру в зарубежной практике называют релаксационно-стойкой или с низкими потерями от релаксации, в отечественной – стабилизированной [1].

Впервые решение об организации выпуска отечественной высокопрочной стабилизированной арматуры диаметром 9,6 мм для современных железобетонных шпал в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» было принято на совещании представителей ОАО «Российские железные дороги» и ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». При этом завод рассматривался как предприятие, имеющее значительный многолетний опыт производства высокопрочной шпальной арматуры. Однако специфика требований, предъявляемых к стабилизированной арматуре, отсутствие отечественного опыта деформационной обработки в холодном состоянии подката таких диаметров из высокопрочных сталей и ограниченные возможности прямого использования и адаптации зарубежных разработок не позволили решать задачи выпуска данной продукции на основе копирования традиционных подходов к определению технологических режимов, применяемых на заводе при изготовлении других видов армирующих материалов. Технологический процесс на этапе освоения не

обеспечивал заданный комплекс показателей качества готовой продукции и не удовлетворял спрос со стороны заводов, производящих железобетонные шпалы.

Специалистами предприятия совместно с учеными ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» был проведен комплекс исследований по выбору марки стали для производства высокопрочной арматуры больших диаметров. Выполненный анализ качества исходного подката диаметром 15,0 мм из новой высокоуглеродистой легированной стали марки 80ХФЮ производства ОАО «ММК» показал, что по химическому составу, механическим свойствам и микроструктуре металла сталь марки 80ХФЮ полностью отвечает условиям ее дальнейшей деформационной обработки. В ходе проведения исследований определены особенности реологических свойств стали марки 80ХФЮ при холодной пластической деформации. Установлено, что динамика изменения сопротивления деформации стали марки 80ХФЮ от степени деформации характеризуется тремя областями: областью интенсивного упрочнения при малых степенях деформации (10–20 %); областью слабого упрочнения при степенях деформации (20–50 %) и областью интенсивного упрочнения при высоких степенях деформации (более 50 %) [2].

Для моделирования деформационных режимов обработки был использован принцип количественной оценки равномерности напряженного состояния стали марки 80ХФЮ в процессе обработки. В качестве показателя, описывающего напряженное состояние в очаге деформации, использовали критерий [3]:

$$k = \frac{\sigma}{T}, \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – среднее напряжение (гидростатическое давление);

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} -$$

интенсивность касательных напряжений.

Показатель k характеризует соотношение среднего уровня нормальных и касательных напряжений: при $k > 0$ преобладают растягивающие напряжения, а при $k < 0$ – сжимающие [4]. При положительных значениях коэффициента k схему напряженного состояния следует считать жесткой и тем более жесткой, чем больше величина k . Наоборот, при отрицательных значениях коэффициента k схему напряженного состояния следует считать мягкой и тем более мягкой, чем больше абсолютное значение отрицательной величины k .

Для количественной оценки степени равномерности напряженного состояния и сравнения различных технологических режимов деформационной обработки арматуры был предложен критерий:

$$\omega = \frac{|\bar{k}|}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (\bar{k} - k_i)^2}}, \quad (2)$$

где \bar{k} и k_i – значения критерия, полученного по уравнению (1), среднее по сечению проволоки и в текущей точке поперечного сечения соответственно; n – количество точек измерений по результатам моделирования в комплексе DEFORM – 2D.

Таким образом, чем выше значение критерия ω , тем более равномерное напряженное состояние материала при обработке давлением.

Многолетняя практика проволочного производства определила варианты построения маршрутов волочения высокоуглеродистой проволоки: равные весьма малые единичные обжатия; равные большие единичные обжатия; уменьшающиеся единичные обжатия; комбинированные единичные обжатия (малые, средние, уменьшающиеся); чередующиеся (большие и малые) единичные обжатия. При этом выбор того или иного варианта зависит от марки стали, величины полуугла волоки, скоростных режимов волочения и др.

Поскольку для исследуемой марки стали отсутствовал опыт деформационной обработки, были проведены количественная оценка степени равномерности напряженного состояния металла в очаге деформации и сравнение маршрутов деформационной обработки. По результатам моделирования были выполнены расчеты критерия ω в точках поперечного сечения очага деформации, характеризующихся наибольшей неравномерностью распределения напряжений. Обработку результатов моделирования провели в программе Microsoft Excel. Распределение значений критерия оценки равномерности напряженного состояния металла по проходам маршрутов волочения представлено на рис. 1.

Результаты расчета критерия ω показали, что более равномерное напряженное состояние в стали марки 80ХФЮ в процессе обработки обеспечивает маршрут волочения, построенный по принципу убывающих единичных обжатий. Это позволяет обрабатываемой стали наиболее полно реализовать ресурс пластических характеристик. Данный результат хорошо согласуется с многочисленными теоретическими исследованиями, содержащимися в научно-технической литературе, в которых указывается, что такой принцип построения маршрута волочения наиболее полно учитывает влияние масштабного эффекта при холодной пластической обработке [5–9].

На практике при проектировании маршрута волочения по принципу убывающих единичных обжатий при известных значениях диаметра исходной заготовки и готовой проволоки задаются значениями среднего единичного обжатия и обжатия в последнем переходе обработки. В этом случае, в зависимости от кратности волочения, рас-

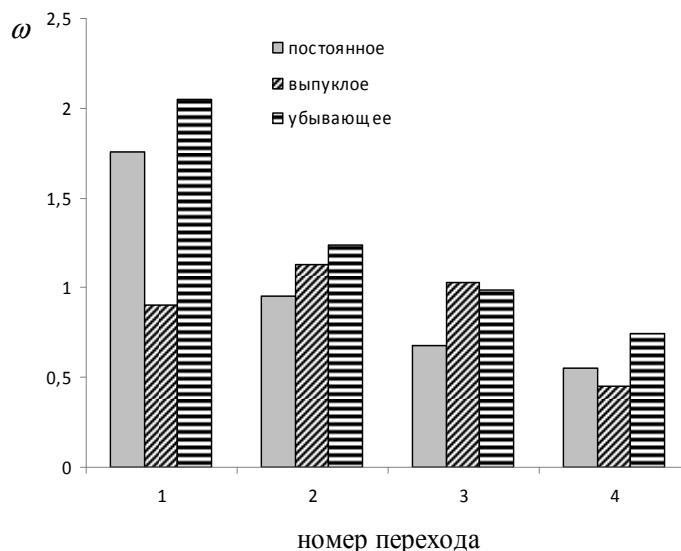


Рис. 1. Динамика изменения критерия ω по переходам маршрутов волочения с различным распределением единичных обжатий

пределение обжатий по переходам маршрута волочения может быть описано следующей зависимостью:

$$\varepsilon_{n_i} = \varepsilon_k - \frac{2(\varepsilon_{\text{ср}} - \varepsilon_k)}{(n-1)}(n_i - n), \quad (3)$$

где ε_{n_i} , ε_k – значения единичного обжатия на промежуточном n_i -м и последнем переходах маршрута волочения соответственно; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – среднее единичное обжатие по маршруту волочения; n , n_i – общее количество и промежуточный переход волочения.

Данная зависимость описывает характер интенсивности убывания единичных обжатий по маршруту волочения. Полученная нами зависимость использована при определении предпочтительных параметров маршрута волочения, построенного по принципу убывающих обжатий.

Следующим этапом исследований для определения предпочтительных параметров маршрута волочения при построении маршрута обработки по принципу убывающих обжатий явилось проведение вычислительного эксперимента. В качестве исследуемых параметров было выбрано единичное обжатие в последнем переходе маршрута волоче-

ния $x_1 - \varepsilon_k$ и основной параметр рабочего инструмента – полуугол канала волокна $x_2 - \alpha$ (см. таблицу). Среднее единичное обжатие по маршруту волочения и коэффициент трения фиксировались на постоянном уровне и в ходе экспериментов не изменяли своего значения. В качестве функций отклика служил безразмерный комплекс $y - \omega$, рассчитанный по уравнению (2), характеризующий степень равномерности напряженного состояния стали в процессе волочения.

Обработку результатов полного факторного эксперимента провели по стандартной методике [10]. После расчетов коэффициентов уравнения регрессии, проверки их значимости получили зависимость, позволяющую управлять степенью равномерности напряженного состояния стали марки 80ХФЮ при волочении:

$$y = 0,578 + 0,34x_1 - 0,353x_2 - 0,23x_1x_2. \quad (4)$$

Проверка с помощью критерия Фишера показала, что полученная зависимость адекватно описывает результаты вычислительного эксперимента в исследуемой области изменения технологических параметров волочения.

Анализ результатов моделирования показывает, что более равномерное напряженное состояние

Факторы численного эксперимента

Уровни значений	Факторы	
	Единичное обжатие в последнем переходе маршрута волочения ε_k , %	Полуугол рабочего канала волокна α , град
	X_1	X_2
Основной (0)	14	6
Нижний (-)	10	4
Верхний(+)	18	8
Интервал варьирования	4	2

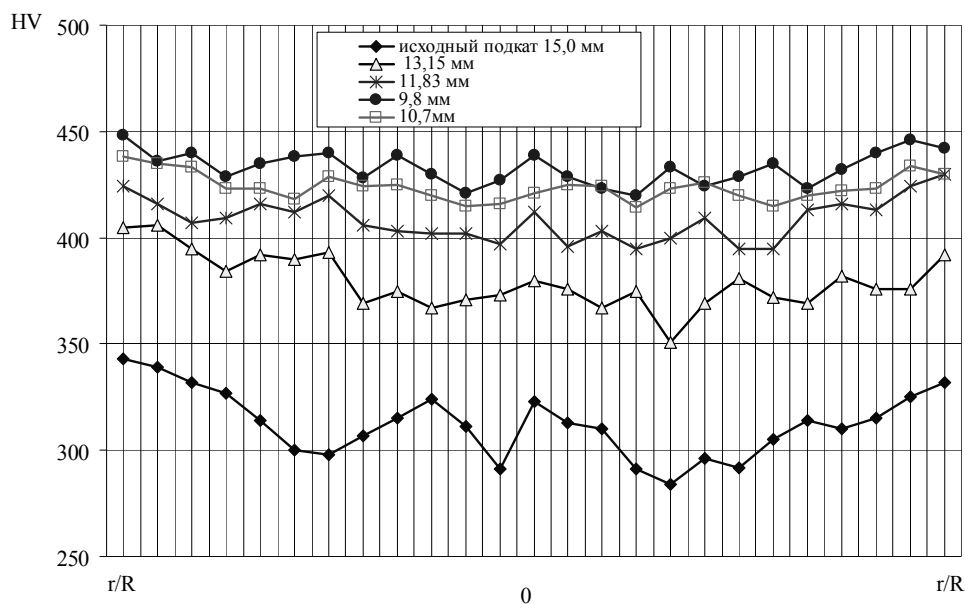


Рис. 2. Характер распределения микротвердости в поперечном сечении образцов, отобранных по маршруту волочения

обрабатываемой стали при волочении по маршруту с убывающим распределением единичных обжатий по проходам достигается при одновременной вариации величиной единичного обжатия и значений полуугла рабочего конуса волокна. Однако при построении маршрута волочения, единичные обжатия которого могут существенно отличаться от перехода к переходу, будет требоваться использование разных углов волокон в одном маршруте, что вызовет определённые трудности в реализации этого условия в производстве. Кроме того, использование чрезмерно завышенных единичных обжатий на первых переходах маршрута волочения подката диаметром 15,0 мм из стали марки 80ХФЮ может существенно повышать нагрузку на привод волочильных блоков. Для практики наиболее предпочтительным является вариант построения маршрута деформационной обработки, основанный на определении интенсивности снижения единичных обжатий, обеспечивающей равномерность напряженного состояния в очаге деформации при постоянном угле волокна на каждом переходе с проверкой нагрузок на двигатели волочильных блоков.

Разработанный в результате проведенных исследований маршрут волочения в опытном порядке был апробирован в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». Исходный ускоренно-охлажденный прокат стали марки 80ХФЮ диаметром 15,0 мм производства ОАО «ММК» (плавка № 450568) по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре, предельным отклонениям и качеству поверхности полностью соответствовал требованиям ТС 14-101-621. Подготовку поверхности исходного подката к холодной пластической обработке выполнили в соответствии с действующими на заводе технологическими инструкциями. Воло-

чение подката на размер под профилирование осуществляли на прямоточном стане RI 120/8 по разработанному в ходе исследований маршруту деформационной обработки:

$$15,00 \xrightarrow{23,1\%} 13,15 \xrightarrow{19,1\%} 11,83 \xrightarrow{18,2\%} 10,70 \xrightarrow{16,1\%} 9,8.$$

Скорость волочения на последнем переходе составляла 1,0 м/с. Волочение вели с применением смазок зарубежного производства TECNOLUBRE.

Анализ измерения микротвердости по сечению полученной арматуры (рис. 2) показал, что различие величины микротвердости поверхностных и центральных слоев деформированной стали в зависимости от перехода волочения составляло от 7 до 18 %, что свидетельствует об однородности структуры металла, полученного по усовершенствованному режиму волочения, и предопределяет повышение показателей качества готовой продукции и снижение их вариаций.

По результатам опытно-промышленной апробации было принято решение о внесении изменений в ТК ММК-МЕТИЗ К.ПР-114-2008 и внедрении на ОАО «ММК-МЕТИЗ» разработанного режима деформационной обработки в массовое производство высокопрочной стабилизированной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008 [11]. Разработанные усовершенствованные режимы деформационной обработки в полном объеме внедрены в промышленное производство в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 13.G25.31.0061), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2013 годы)» (проект 2.1.2/9277).

Литература

1. Михайлов, К.В. Задачи отечественной строительной науки в области арматуры и предельно напряженных железобетонных конструкций / К.В. Михайлов. // Бетон и железобетон. – 2004. – № 2. – С. 3–5.
2. Особенности реологических свойств высокоуглеродистой легированной стали для арматуры железобетонных шпал / В.Н. Лебедев, М.В. Чукин, Г.Ш. Рубин и др. // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 34. – С. 50–53.
3. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2001. – 836 с.
4. Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 271 с.
5. Зубов, В.Я. О масштабном факторе при разрушении стальной проволоки / В.Я. Зубов, Л.А. Мальцева // Термическая обработка и физика металлов. – Свердловск: УПИ, 1976. – Вып. 2. – С. 15–19.
6. Семавина, А.Н. О природе масштабного эффекта в холоднотянутой стальной проволоке / А.Н. Семавина, В.Г. Гаврилюк, С.А. Терских // Физико-химическая механика материалов. – 1979. – № 2. – С. 24–28.
7. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
8. Кулеша, В.А. Построение маршрутов волочения на основе масштабного фактора / В.А. Кулеша, В.Н. Рукер // Сталь. – 1988. – № 1. – С. 12–14.
9. Богатов, А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирецкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
10. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1978. – 430 с.
11. Лебедев, В.Н. Опыт освоения производства высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / В.Н. Лебедев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 2. – С. 74–76.

Поступила в редакцию 11 августа 2011 г.